

触觉反馈遥操作机器人关键控制技术的发展现状*

田 大 鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 航空光学成像与精密测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对现有的综述难以全面涵盖在触觉反馈遥操作控制领域的新成果与新方向这一问题,分析了传统双向控制结构,对国内外新提出的改进四通道控制方法、移动机器人异构双向控制、多向控制结构、通信干扰观测器等方法进行了论述。对关键的四通道控制方法进行了实验和评价,分析了存在定常/时变通信延迟时的稳定控制方法,从而理清了遥操作机器人控制领域的研究脉络与方向。研究结果表明,触觉反馈遥操作机器人的控制技术将按有、无通信延迟划分,在两个方向上并行发展:一方面将以四通道方法为基础提出新的异构形式和多机器人控制结构,并通过干扰抑制来提高系统透明性;另一方面将以无源性理论以及干扰观测理论为基础发展出适用于时变延迟的高透明双向控制和多向控制方法。

关键词:触觉反馈;遥操作;机器人;控制

中图分类号:TP273;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1042-09

Development and present situation on pivotal control technology of teleoperation robots with haptic feedback

TIAN Da-peng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Machine and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the problem that new results and developments are difficult to be covered by current overviews in the field of teleoperation control with haptic feedback, the recently proposed methods were investigated based on the analysis of the traditional bilateral control, such as the improved four-channel control, bilateral control of mobile robots with different structure and multilateral control. The key four-channel method was evaluated and tested by experiment. Besides, stabilizing controllers were analyzed in the presence of time invariant or time-varying communication delay. Developing directions of the studies in this field were cleared. The results indicate that the control of teleoperation robots with haptic feedback is developing in two parallel directions with or without the communication delay. On one hand, new structures facing to different and multiple robots are developing based on the four-channel bilateral control. The transparency will be further improved by the disturbance rejection. On the other hand, highly transparent bilateral control and multilateral control are developing based on the theories of passivity and disturbance observer, which is feasible in the presence of varying delay.

Key words: haptic feedback; teleoperation; robot; control

0 引 言

实现触觉传递的遥操作系统可追溯至 1954 年美

国 Arogonne 实验室面向核反应堆操作研制成功的电气式主-从机械臂。经过几十年的发展,主-从式遥操作机器人系统已被时代赋予了更多的价值。

收稿日期:2013-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304032);吉林省科技发展计划资助项目(20130522156JH);吉林省重大科技攻关资助项目(11ZDGG001)

作者简介:田大鹏(1984-),男,辽宁铁岭人,博士,助理研究员,主要从事运动控制相关理论与实践方面的研究. E-mail:d.tian@ciomp.ac.cn

除核工业领域外,主-从式遥操作机器人在深空探测、海洋开发、微创医疗、微操作等领域的应用也都可见一斑。如加拿大空间局为航天器维护、交会对接等开发了遥操作系统 SSRMS (Space Station Remote Manipulator System)^[1]、德国开发的 ROTEX 空间机器人能实现空间遥操作^[2];美国 Utah 大学开发的具有力反馈的主-从遥操作系统,能完成多种海底精细作业任务^[3];日本港湾空港技术研究所也研制了水下作业工程机械力反馈遥操作系统,使水下作业的效率基本达到了陆上作业的水平^[4]。能实现精细微创手术的有触觉反馈手术机器人也在研发之中。2011年,日本庆应义塾大学研制的触觉钳子手术机器人实现了小鼠远程肝脏剥离,并使医生清晰地感觉到钳子与活体组织间微弱的触感^[5]。此外,在现代材料学、基础医学等研究中也主-从式机器人的用武之地。如在原子力显微镜的操作中利用有触觉反馈的微操作机器人可以为操作者提供探针与试样之间的触感,使人们可以在数十至数百纳米量级上高效地作业^[6]。

在国家的大力支持下,东南大学、吉林大学、上海交通大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学以及中国科学院的一些研究所等纷纷开展了面向触觉的机器人研究。近年来,随着中国空间站计划、“嫦娥”探月计划、“蛟龙”深海潜水器等项目的实施,有触觉反馈机器人系统正逐渐获得更密切的关注。

在遥操作机器人中进行合理的运动控制,最能真实、直观并且经济地将操作者和环境物体连接起来,实现触觉的传递。由于运动控制的实时性要求,这种方式能够将操作时的触感最快速地反馈给操作者,提高作业效率。近年来,国内外在这一领域的研究飞速发展,已有的综述性文章已难以指示本领域的最新研究成果和发展方向。本研究从控制方法的角度对近年来的新成果进行更全面的梳理和总结,提出这一课题的发展方向和趋势,以期对我国相关领域的理论和工程技术研究有所启示。

1 触觉反馈控制结构的研究

在有触觉反馈的遥操作机器人系统中,人、环境与机器人之间相互作用而产生的作用力和反作用力以及机器人的速度、位移等运动信息被用于构成机器人之间的控制反馈。因此,处理好机器人之间的信号反馈,即处理好位置控制和力控制二者之间的关系,是实现高性能触觉交互系统的关键。

1.1 一般触觉反馈系统双向控制结构的研究进展

主-从双机形式是最简单、最基本的系统构成形式。这类系统的控制称为双向控制或双边控制(Bilateral Control),表示控制具有“双向性”。其基本的控制结构是使从机器人跟踪主机器人的运动,并向主机器人反馈从机器人的控制力,形成的力反馈-位置型结构,如图1所示。这里,主机器人处于力控制状态,从机器人处于位置控制状态。

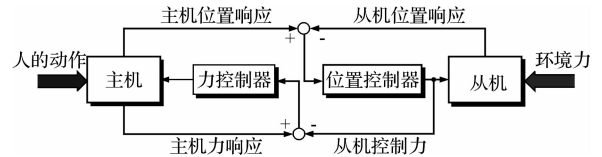


图1 力反馈-位置型控制结构

该结构还有若干的变化,如主-从机均采用位置控制而不采用力控制的位置-位置型结构、用环境力代替控制力反馈给主机的直接力反馈-位置型结构等。国内多家单位针对这类结构进行研究,得到了这类结构下控制器设计、参数选取原则等结果^[7-11]。由于主从机器人之间仅有两条通信通道,这种形式的双向控制称为二通道结构。二通道结构简单且易于实现,但是该结构不利于系统性能的提高。

用于描述双向控制器性能的指标被称作“透明性”(Transparency),可用混合矩阵 H 来度量:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -X_s \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}}_H \begin{bmatrix} X_m \\ -F_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X, F —位置和力;下标 m, s, h, e —主机、从机、操作者和环境。

理想的透明性需要实现 $H_{11} = H_{22} = 0$ 以及 $H_{12} = -H_{21} = 1$,从而令操作者感觉仿佛直接触摸到环境一样,这样的情况可用如图2所示的零阻抗刚性杆表示。

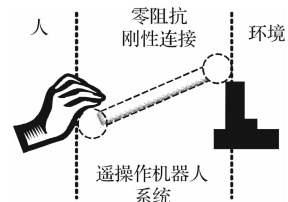


图2 理想透明性的含义

二通道结构的性能取决于控制增益的大小,通过无穷大的增益才能取得理想的性能,而实际系统往往无法实现很大的控制增益。D. A. Lawrence^[12]于1993年提出了四通道控制结构,在有限增益下实现了理想的透明性。该方法有4条信息的传送通道:两条位置通道和两条力通道,四通道控制结构如图3所示。在

控制器的设计上, Lawrence 在四通道结构中的位置控制器里加入了机器人的逆模型, 从而抵消机器人自身的阻抗, 形成零阻抗系统。他同时也指出了透明性和稳定性对于双向控制系统而言是矛盾的。追求理想的透明性就要降低系统的稳定性; 反过来, 追求系统的稳定性也要以降低透明性作为代价。

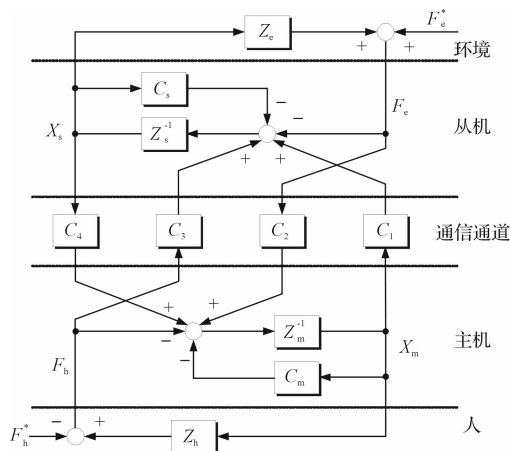


图 3 四通道控制结构

C—控制器; Z—阻抗; F*—除阻抗模型以外的环境力或操作力

国内有学者针对 Lawrence 四通道结构进行了研究, 利用从机器人的控制量代替环境力的测量值发展出一种无环境力反馈的四通道控制^[13]。需要指出的是, 在工程实现时, 图 3 所示结构中的环境阻抗实际上是不需要建模的, 它只是用来描述环境力的来源, 真正在实现系统时只需要测量力 F_h 和 F_e 以及主从机器人的位置响应。系统的性能也与环境阻抗无关, 而仅由机器人动力学特性、位置控制器和力控制器确定。

2004 年, Y. Sumiyoshi^[14] 将 Lawrence 四通道结构中的力控制部分进行变形得到更简明的四通道控制结构, 并引入干扰观测器 (Disturbance Observer, DOB) 来使机器人的动力学归一化, 利用 DOB 保证被控对象特性与名义模型一致, 提出了具有很高工程实用价值的四通道控制策略^[15]。

出于实用化的考虑, Sumiyoshi 去掉了原位置控制中的逆动力学部分, 只采用比例微分位置控制。但从透明性的角度来看, 该方法在提高可用性的前提下仍然保证了高透明性: 在低频域实现了主-从机之间完全的力传递和位置跟踪。应用这种方案可实现的透明性的混合矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -X_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{s^2}{C_f} & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ -F_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: C_f —力控制器。

该策略不抵消机器人本身的阻抗, 但这也更符合

人们通常的作业习惯, 即感受到“工具”的存在。

在触觉反馈系统中, 通常都需要对力或力矩进行测量。由于力或力矩传感器基于应变片的转换原理, 测量精度和测量带宽有限。为解决这一问题, K. Murakami^[16] 基于干扰观测的原理提出了一种反作用力/力矩观测器 (Reactive Force/Torque, Observer, RFOB/RTOB), 将机器人的受力 F_{reac} /力矩 $\hat{\tau}_{\text{reac}}$ 以经过截止频率为 g_{reac} 的低通滤波的形式估计出来:

$$\hat{F}_{\text{reac}} = \frac{g_{\text{reac}}}{s + g_{\text{reac}}} F_{\text{reac}}, \hat{\tau}_{\text{reac}} = \frac{g_{\text{reac}}}{s + g_{\text{reac}}} \tau_{\text{reac}} \quad (3)$$

在此基础上, 文献[17]结合 DOB、RTOB 以及四通道控制实现了无力传感器的高透明性触觉反馈系统。这种基于 DOB、RFOB/RTOB 和四通道控制相结合的设计方案能够有效保证主、从机之间的位置跟踪以及高性能、宽频带的力反馈, 得到了学者们的证实和认可^[18-19]。

本研究在平动式单自由度主-从机器人上对基于 DOB 和 RFOB 的无力传感器四通道控制方法进行了复现实验, 实验结果如图 4 所示。

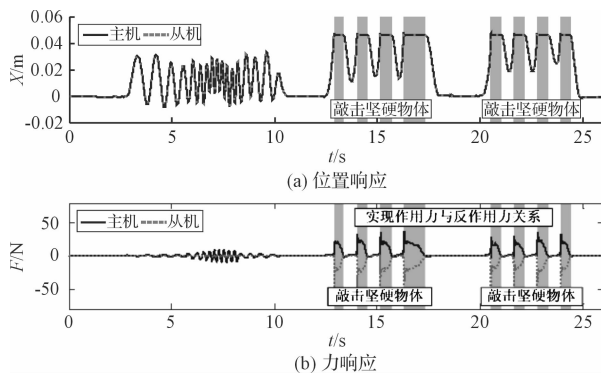


图 4 基于 DOB + RFOB + 四通道方案的实验结果

实验中, 从机器人与铝块进行了接触操作, 结果与式(2)所示情况一致, 系统具有较高的透明性。在相同的控制器作用下对海绵等其他物体进行操作时也有类似结果, 操作者可以清楚地分辨操作时的触感。

目前, 对于这一方案的研究主要集中在如何通过改进干扰抑制环节进一步提高系统透明性的方面。文献[20]讨论了改变干扰观测器中名义模型的质量对系统透明性的影响。文献[21]提出了一种滑模辅助干扰观测器通过补偿高频干扰提高透明性。这种加入干扰观测和补偿的控制思想已经引起了国内学者的重视。文献[22]和[23]分别在遥操作控制的主机和从机中结合了干扰观测器, 但针对的是二通道系统且未进行对大刚度物体(如金属、岩石)的接触操作验证。文献[24]研究了基于干扰观测器的四通道算法, 并进行了向非线性形式的拓展。

此外,在 Lawrence 四通道结构的基础上, K. Hashtrudi-Zaad 等^[25]通过断开主-从机之间的一条通信通道提出了三通道控制结构。此后, R. Kubo 等^[26]又提出了基于 DOB 和 RTOB 的三通道系统。理论分析表明,该方法同样能够实现式(2)所示的透明性。特别是在力的传递方面,使用三通道方法时操作者完全感受不到主-从机之间的位置误差带来的附加的操作力,全部的力反馈均来自环境,对环境的触觉感知更为直接。可见,以四通道结构为基础且通过增加或减少主、从机器人之间的控制通道获取不同的触觉反馈性能同样是一个重要的研究方向。

1.2 异构双向控制

近年来,除传统意义上的双向控制外,许多新的控制结构相继诞生。如 W. Yamanouchi 等^[27]提出了一种称为“Hapto”的双向控制方案,以实现固定的主机器人与移动的从机器人之间的双向控制, Hapto 方案如图 5 所示。



图5 Hapto 方案

该方案使操作者感受到作为从机的移动机器人在路面上移动时受到的阻抗,实现了对从机器人移动过程中的触觉感知。该方案设操作者施加在从机上的力矩为 τ_m , 从机受到的外界抵抗力形成的力矩总和为 τ_s , 主机的角位置为 q_m , 从机的行进的速度为 \dot{q}_s ; 则 Hapto 方案的控制目标如下:

$$q_m - \dot{q}_s = 0 \quad (4)$$

$$\tau_m + \tau_s = 0 \quad (5)$$

由于从机是速度控制系统,被控对象在每个自由度上的名义模型简化为一阶传函;而主机是位置控制系统,每个自由度等效为二阶系统,因此 Hapto 是一种异构构造双向控制系统,主机和从机具有不同的动力学特性,如何解决好不同动力学特性的机器人之间的双向控制是这一研究方向的主要研究内容。文献[28]提出了一种简化的 Hapto 方案。文献[29]提出了一种在斜交坐标系下设计 Hapto 系统的方法,相比传统直角坐标系下的设计能够提高异构双向系统的性能。

国内,如哈尔滨工业大学也开展了类似的研究,基于位置-速度控制方案实现移动机器人力觉反馈,并已经开始考虑主-从机之间的通信延迟问题^[30]。

1.3 多向控制结构

除双向控制外,面向两台以上机器人提出的多向控制(Multilateral Control)策略正作为一个新兴的研究方向快速发展^[31]。它能够实现触觉信息的共享,具有更广阔的应用空间,可用于协同作业或技能训练等领域,多向控制系统如图 6 所示。

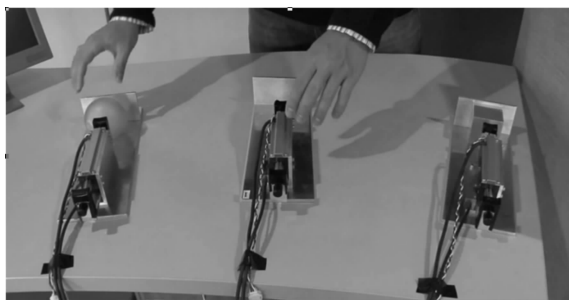


图6 多向控制系统

最基本的多向控制是使系统中所有机器人具有同样的位置响应,并使作用在所有机器人上的外力之和为零,即位置一致以及合力平衡,如下式所示^[32]:

$$X_1 = X_2 = \dots = X_n \quad (6)$$

$$F_1 + F_2 + \dots + F_n = 0 \quad (7)$$

通过多向控制,可使得整个多向控制系统的动力学特性如下式所示:

$$C_p \left\{ \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & L & 1 \end{bmatrix} - I \right\} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} - \frac{1}{M_n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = s^2 I \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: C_p —位置控制器, M_n —等效惯量。

文献[33]面向任务提出了一种新型的多向控制策略。文中提出了采用“模态变换”的方法,使得对于主机数量与从机数量不一致时的控制器设计问题得到简化。

多向控制包含多个被控对象,它们之间的连接关系对控制器设计有很大影响,因此有学者专门研究了多机器人之间的组网问题。文献[34]考虑了多向控制系统中机器人之间的连接情况以及连接程度,证实了系统中机器人的数量与力的传递特性是有关联的。文献[35]考虑了多向控制系统中机器人之间形成的拓扑结构的变化,设计了带有切换功能的控制律。文

献[36]面向技能训练,设计了双主机、一从机的六通道多向控制系统。该方法中,两个主机分别由训练者和受训者操作,通过设计一个“主导系数”(Dominance Factor),可以任意调整训练者和受训者感受到的来自对方以及环境信息的比重。

1.4 其他新结构

除常规的多机器人控制结构外,也有学者研究了实现触觉广播(Haptic Broadcasting)和动作再现(Motion Reproduction)的可行性。触觉广播可作为视觉和听觉广播的辅助,提高“听众”的临场感,是多媒体技术的扩充^[37]。动作再现则是对传统多媒体技术中声音和图像存储与播放技术的扩展^[38]。文献[39]提出了一种触觉广播的方案,该方法在普通双向控制的基础上辨识环境的阻抗信息(刚度、粘性等),并将这些信息发送到“听众”所操作的机器人上,实现对环境的触觉信息的广播。文献[40]研究了将实世界触觉信息以数据形式保存,并用机器人再现人对实世界环境的复杂交互过程。

未来在多机器人控制结构方面,应以四通道双向控制结构作为基础来衍生和发展出其他新结构。由于四通道结构中主从机器人都能够获得彼此的位置和力信息,其采用的控制信息是最全面的。以此为基础,结合各种先进的单机器人控制方法提高双向控制算法在遥操作机器人上的实现效果,并进一步发展出多机器人多向控制结构中各控制器的系统化设计方法,将具有很大的理论和实用价值。

2 有通信延迟的触觉反馈控制

从目前国内外的研究情况来看,除研究各种新型控制结构外,考虑通信延迟的影响已成为一个相对独立的重要课题。若机器人之间的距离较远或采用如Internet等非专用线路作为传输介质时,势必由于通信距离、带宽等限制而存在通信延迟。机器人之间形成的复杂闭环回路会因通信延迟的存在而导致性能的降低,甚至导致系统不稳定。因此,含延迟的触觉反馈控制正受到越来越多的关注。

2.1 波变量与波变换

基于二端口网络模型来描述系统的各个环节,并根据无源性理论提出的波变换(Wave Transformation)方法是近二十年内被提出的,针对的是二通道双向控制方案。一般的时延二通道控制系统中传递的信号如下式所示:

$$\dot{x}_{sd}(t) = \dot{x}_m(t - T_1), f_{md}(t) = f_s(t - T_2) \quad (9)$$

从机的速度参考值 \dot{x}_{sd} 直接取为延迟后的主机速度;主动力参考值 f_{md} 直接取为延迟后的从机控制力。由于通信延迟的存在,力和速度的传输通道出现有源现象(输出能量大于输入能量),从而导致系统不稳定。

波变换是将时域下的力和速度等能量信号编码为新的变量—波变量(Wave Variable):

$$u_m(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}} [b\dot{x}_m(t) + f_{md}(t)] \quad (10)$$

$$v_s(t) = \frac{1}{\sqrt{2b}} [b\dot{x}_{sd}(t) - f_s(t)] \quad (11)$$

利用波变量代替原来式(9)的形式:

$$u_s(t) = u_m(t - T_1), v_m(t) = v_s(t - T_2) \quad (12)$$

其在主、从机器人之间传递信息,保证了通信环节二端口网络的无源性,进而保证了系统的稳定性。

近年来,许多学者针对波变量方法进行了一系列的改进。文献[41]在原波变量的速度编码上加入了一个权值,使参与编码的速度量可以调节,从而减小由于延迟的速度反馈引起的主、从机在位置响应上的一致。文献[42]将波变量方法扩展至多自由度系统。文献[43]采用增强由主机发至从机的前向波的方法提高波变量方法的性能。文献[44]将波变量方法中的波阻尼 b 分解为面向主-从机器人的两项,分析了其透明性,完善了波变量理论。

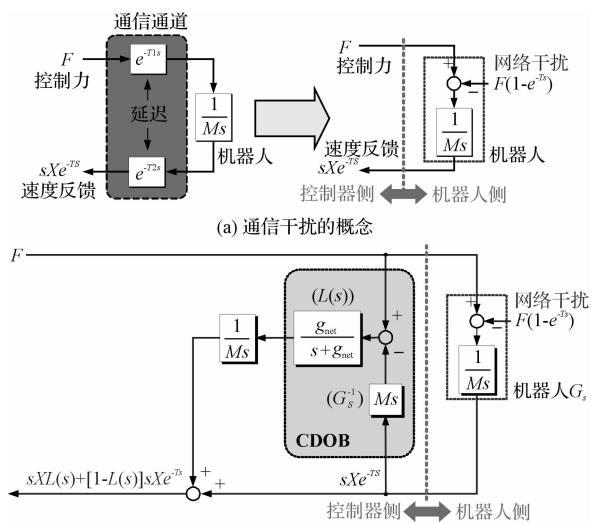
文献[45]尝试着将四通道方法中的4个通道进行变形,从而对四通道控制系统应用波变量方法。国内也有学者提出了类似的方法^[46]。此外,在文献[47]中还出现过一种波变量的应用方式—用环境力代替从机控制力作为力反馈进行波变量编码。但是值得注意的是,波变量方法是针对通信环节二端口网络设计的,其前提是需要保证主、从机都是无源的。对四通道结构进行变形或采用不同的力信息来编码波变量,会改变主、从机的二端口网络模型,有可能导致其有源。这是在今后的研究中应该注意的重要问题,即必须同时兼顾主机、通信环节和从机的二端口网络的无源性。

2.2 基于Llewellyn绝对稳定性的双向控制

在网络控制领域,也有学者对二端口网络的绝对稳定性进行了研究。二端口网络的绝对稳定性可用Llewellyn准则进行判定^[48]。文献[49]利用Llewellyn准则分析了系统的稳定性与性能。文献[50]基于Llewellyn准则设计了时延条件下的绝对稳定控制策略。Llewellyn准则也是针对二端口网络提出的,难以对于复杂的双向/多向控制结构进行设计,在应用上具有较大的局限性。

2.3 基于通信干扰观测器时延双向控制

近年来,日本学者 K. Natori^[51]提出了通信干扰观测器(Communication Disturbance observer, CDOB)方法,并用于处理双向控制的时延问题。其基本思路是将含有时延的反馈系统中的时延部分集中到前向通道,并等效为干扰的形式,称之为网络干扰(Network Disturbance, ND)。采用 ND 来描述系统的特性后,前向通道中不再串联有延迟环节。原系统中延迟造成的影响与新的描述形式下 ND 造成的影响是等效的。CDOB 是依据干扰观测原理设计的针对 ND 的干扰观测器,用于实现对 ND 的估计和补偿^[52],其原理如图 7 所示。



(a) 通信干扰的概念
(b) 通信干扰观测器的原理
图 7 多向控制方案

假设控制力 F 是通过反馈控制器 $C(s)$ 产生的,即:

$$F = C(s)(r - \dot{x}), \quad (13)$$

式中: r —机器人速度指令。

则这种一般反馈系统的闭环传递函数为:

$$G_{\text{close}}(s) = \frac{C(s)G_s(s)e^{-(T_1+T_2)s}}{1 + C(s)G_s(s)e^{-(T_1+T_2)s}} \quad (14)$$

其分母中的延迟环节容易使系统出现不稳定极点。

采用常见的 Smith 估计方法的闭环传递函数为:

$$G_{\text{close}}(s) = \frac{C(s)G_s(s)}{1 + C(s)G_s(s)} e^{-(T_1+T_2)s} \quad (15)$$

其目的为去除延迟造成的不稳定极点。

采用 CDOB 方法时的闭环传递函数为:

$$G_{\text{close}}(s) = \frac{C(s)G_s(s)e^{-(T_1+T_2)s}}{1 + C(s)G_s(s) \{L(s) + [1 - L(s)]e^{-(T_1+T_2)s}\}} \quad (16)$$

由于系统的工作频带通常为中低频,在低频域内低通滤波器 $L(s) \approx 1$,则在这种一般的时延反馈系统

中,采用 CDOB 方法可以取得与 Smith 估计方法相似的效果。

但是,Smith 估计方法需要网络延迟的模型,而 CDOB 则不需要。这意味着 CDOB 方法具有更强的适应性。

CDOB 是近年来新生的方法,仍处于完善和发展之中,而国内对基于 CDOB 的遥操作控制尚无报道。文献[53]给出了一种时间延迟系统 CDOB 一般化的设计方法。文献[54]考虑网络干扰的动态特性,给出了一阶和二阶 CDOB 的设计指标。文献[55]将通信干扰观测器应用到四通道双向控制系统中,并用数值方法分析了采用通信干扰观测器所能达到的透明性。文献[56]注意到通信干扰观测器应用于双向遥操作系统中时,从机模型的输出不能完全描述从机的动态这一问题,提出了远端模型的方法。文献[57]则设计了一个尺度下降因子,根据从机器人与环境的接触情况调整网络干扰补偿的程度,从而提高系统的透明性。

在实际应用中,机器人之间的通信延迟可能是变化的。文献[58]测试了 CDOB 方法在时变延迟下的应用效果,但在设计时仍然使用线性系统理论,而时变延迟使得控制系统变成了非线性系统,因此直接应用线性 CDOB 在理论上显得有些薄弱。不仅是 CDOB,许多按照固定延迟以及其他频域模型进行的设计对时变延迟情况都不适用。为此,越来越多的学者将目光聚焦在时变延迟的研究上。

2.4 基于非线性无源性的时变延迟双向控制

在直接对非线性的时变延迟双向控制系统设计控制器方面,非线性系统无源性理论是一种强有力的稳定性分析工具,通过构造 Lyapunov-like 函数可以实现对时变延迟双向控制系统的无源性分析^[59]。文献[60]将耗散变换(Scattering Transformation)的方法应用于时变延迟情况,设计了一个直接由主机向从机发送的位置通道,直接根据系统无源性的定义证明了该方法的无源性。文献[61]改进了文献[60]提出的方法,增加了一条从机向主机发送位置信息的通信通道,改善了主、从机之间的跟踪性能。文献[62]针对时变延迟情况设计了一种 PD 型双向控制器。该方案需假设通信延迟的变化率小于 1,而文献[63-64]分别提出了更简单的 PD 型控制方案。这些新提出的方案不需要文献[62]的方法所需要的通信延迟变化速率的信息,提高了算法的适用性。文献[65]利用环境信息对主机位置控制和力控制实现加权,大大提高了系统的性能。文献[66]从能量来源的角度对操作者的位置进行分辨,实现了双工通信,并改善了对环境物体进行

操作时的性能。这是一种新的折中思路,传统的思想是在所有工况下的性能与稳定性之间进行折中,在保证稳定性的同时难以提高性能。而新方法提高了系统在进行接触操作时的透明性,通过牺牲非接触操作时的性能换取稳定性。

目前,研究有时延的双向控制问题已取得了许多成果,并且多种方法各有所长。近年来提出的几种新方法在进一步提高系统性能方面仍有很大研究潜力。面向最新提出的移动遥操作的异构控制以及多机器人控制结构下的时间延迟问题的研究较少,且集中在固定延迟的情况,如文献[67-68]。时变延迟下的异构遥操作以及多机器人多向控制问题尚未得到有效地研究,这也是今后非常有潜力的一个发展方向。

3 结束语

触觉反馈遥操作机器人能够极大地扩展人类的活动空间,有着极其广泛的应用前景。依靠运动控制技术实现高精度的遥操作和触觉反馈是最直接有效的方式。从目前的研究情况看,通过较好地测量和处理力、位置、速度等信号并结合干扰抑制方法,可以有效地保证实际机器人动力学特性与理论分析设计情况相一致,进而提高遥操作系统的性能;而要获得令人满意的触觉反馈,还需要根据系统组成情况设计合理的多机器人控制结构。

未来这一领域的发展趋势将按照有、无通信延迟的划分展开。在无通信延迟情况下,将集中于建立和完善控制结构,实现理想的透明性;对于主-从双机形式的系统以四通道结构为基础结合先进的干扰抑制方法进一步提高系统的性能;对于两台以上机器人的情况,如何协调多个机器人之间的关系并建立起如双向四通道控制那样的标准化多向控制结构是一项有待研究的重要课题;此外,对于异形遥操作结构的研究也将异军突起,成为完善遥操作控制理论的重要组成。另一方面,存在通信延迟的触觉反馈遥操作控制技术的发展则主要集中于将已有的线性方法向非线性时变延迟情况转化,包括对无延迟情况下研究成果的改造,从而提出针对延迟的适应性更强、性能更高的新方法。

参考文献 (References):

[1] CHRISTIAN S. Canadian space robotic actives[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 41(4): 239-246.

[2] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, et al. RO-TEX the first remotely controlled robot in space[C]//Proc. of IEEE Int. Conf. on Rob. and Auto. USA: IEEE, 1994;

2604-2611.

[3] JACOBSON S C, IVERSEN E K, DAVIS C C, et al. Design of a multiple degree-of freedom, force-reflective hand master/slave with a high mobility wrist[C]//Proceedings of ANS/IEEE/SMC 3rd Topical Meeting on Robo. and Remote Sys. . USA: IEEE, 1989: 13-16.

[4] 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.

[5] MOTOOKA W, NOZAKI T, MIZOGUCHI T, et al. Development of 16-DOF telesurgical forceps master/slave robot with haptics[C]//Proc. of 36th Annual Conf. on IEEE Indus. Elec. Society. USA: IEEE, 2010: 1465-1470.

[6] RUBIO-SIERRA F J, STARK R W, THALHAMMER S, et al. Force-feedback joystick as a low-cost haptic interface for an atomic-force-microscopy nanomanipulat-or[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Proc.*, 2003, 76(6): 903-906.

[7] 陈卫东, 席裕庚, 蔡鹤皋. 力觉临场感遥操作系统的双向控制[J]. *机器人*, 1998, 20(3): 214-220.

[8] 张祝新. 主-从机器人双向伺服控制方法研究[J]. *长春工程学院学报: 自然科学版*, 2010, 11(3): 68-72.

[9] 冯石柱, 赵丁选, 尚涛, 等. 遥操作工程机器人 p-f 力反馈控制方法[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(2): 120-124.

[10] 赵丁选, 侯敬巍, 尚涛, 等. 遥操作机器人执行末端的力反射型变增益力反馈算法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2008, 38(3): 570-574.

[11] 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.

[12] LAWRENCE D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624-637.

[13] 王裕基, 孙富春, 刘华平, 等. 无环境力反馈的四通道双边控制[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 315-320.

[14] OHNISHI K, SHIBATA M, MURAKAMI T. Motion control for advanced mechatronics[J]. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 1996, 1(1): 56-67.

[15] SUMIYOSHI Y, OHNISHI K. The transformation of modified 4-channel architecture[C]//Proceedings of 8th IEEE Intl. Workshop on Advanced Motion Control. Japan: IEEE, 2004: 211-216.

[16] MURAKAMI T, YU F, OHNISHI K. Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(2): 259-265.

[17] 桂誠一郎, 大西公平. バイラテラル制御による力覚の転達と再現[J]. *電気学会論文誌 D*, 2003, 123(11): 1371-1376.

[18] SHIMONO T, KATSURA S, OHNISHI K. Haptic motion

- control for physical human support[J]. **IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Eng.**, 2009, 4(2):166-175.
- [19] KATSURA S, MATSUMOTO Y, OHNISHI K. Shadow robot for teaching motion[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2010, 58(7):840-846.
- [20] SHIMONO T, KATSURA S, OHNISHI K. Improvement of operability for bilateral control based on nominal mass design in disturbance observer[C]//Proc. of 31st Annual Conf. of IEEE Ind. Elec. Society. USA: IEEE, 2005: 2035-2040.
- [21] TIAN D, YASHIRO D, OHNISHI K. Improving transparency of bilateral control system by sliding mode assist disturbance observer[J]. **IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering**, 2013, 8(3):277-283.
- [22] 文 广, 章 甫, 赵丁选, 等. 新型力反馈双向伺服系统干扰观测器 PID 控制算法的研究[J]. 重庆邮电学院学报:自然科学版, 2006, 18(2):235-238.
- [23] 郭 语, 孙志峻. 基于扰动观测器的时延双边遥操作系统鲁棒阻抗控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21):15-21.
- [24] 刘 霞, 黄 琦, 陈 勇. 不确定遥操作系统带干扰观测器的自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5):681-687.
- [25] HASHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation[J]. **IEEE Trans. on Robotics and Automation**, 2002, 18(1):108-114.
- [26] KUBO R, IYAMA N, NATORI K, et al. Performance analysis of a three-channel control architecture for bilateral teleoperation with time delay[J]. **IEEJ Trans. on Ind. Applications**, 2007, 127(12):1224-1230.
- [27] 山之内亘, 桂誠一郎, 大石潔. モバイルハプト実現のための次元スケーリングに基づく異構造バイラテラル力覚フィードバック制御[J]. 電気学会論文誌 D, 2011, 131(2):180-186.
- [28] SAKAINO S, SATO T, OHNISHI K. Mobile-hapto with yaw rate control for traveling on rough terrain[C]//Proc. of 36th Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010:1565-1570.
- [29] SAKAINO S, SATO T, OHNISHI K. A novel motion equation for general task description[C]//Proc. of 11th IEEE Intl. Workshop on Adv. Motion Control. Japan: IEEE, 2010:566-571.
- [30] 于振中. 移动操作机器人及其共享控制的力反馈遥操作研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2011.
- [31] MENDEZ V, TAVAKOLI M. A passivity criterion for n-port multilateral haptic systems[C]//Proc. of 49th IEEE Conference on Decision and Control. USA: IEEE, 2010: 274-279.
- [32] KATSURA S, MATSUMOTO Y, OHNISHI K. Realization of "law of action and reaction" by multilateral control[J]. **IEEE Trans. on Ind. Elec.**, 2005, 52(5):1196-1205.
- [33] KUBO R, SHIMONO T, OHNISHI K. Flexible controller design of bilateral grasping systems based on a multilateral control scheme[J]. **IEEE Transactions on Ind. Elec.**, 2009, 56(1):62-68.
- [34] OKURA T, KATSURA S. Analysis of system connection in multilateral control system considering number of subsystems[C]//Proc. of 36th Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2010: 1234-1239.
- [35] TUMERDEM U, OHNISHI K. Multi-robot teleoperation under dynamically changing network topology [C]//Proceedings of IEEE Intl. Conf. on Industrial Technology. Australia: IEEE, 2009:1-6.
- [36] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. Dual-user teleoperation systems: new multilateral shared control architecture and kinesthetic performance measures [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2012, 17(5):895-906.
- [37] CHA J, HO Y, KIM Y, et al. A Framework for Haptic Broadcasting[J]. **IEEE Multimedia**, 2009, 16(3):16-27.
- [38] YOKOKURA Y, KATSURA S, OHISHI K. Stability analysis and experimental validation of a motion-copying system [J]. **IEEE Trans. on Ind. Elec.**, 2009, 56(10):3906-3913.
- [39] KITAMURA K, YASHIRO D, OHNISHI K. Haptic broadcasting system based on environmental impedance transmission[C]//Proceeding of 11th IEEE Intl. Workshop on Advanced Motion Control. Japan: IEEE, 2010:530-535.
- [40] TSUNASHIMA N, KATSURA S. Spatiotemporal coupler: storage and reproduction of human finger motions [J]. **IEEE Trans. on Ind. Elec.**, 2012, 59(2):1074-1085.
- [41] KAWASHIMA K, TADANO K, SANKARANARAYA-NAN G, et al. Bilateral teleoperation with time delay using modified wave variables[C]//Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems. France: IEEE, 2008: 424-429.
- [42] ALISE M, ROBERTS R G, REPPERGER D W, et al. On extending the wave variable method to multiple-DOF teleoperation systems [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mech.**, 2009, 14(1):55-63.
- [43] YE Y Q, LIU P X. Improving haptic feedback fidelity in wave-variable-based teleoperation orientated to tele-medical

- applications[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2009, 58(8):2847-2855.
- [44] 张永林, 宋爱国. 广义波变量遥操作系统的透明性分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(2):688-693.
- [45] AZIMINEJAD A, TAVAKOLI M, PATEL R V, et al. Transparent time-delayed bilateral teleoperation using wave variables[J]. **IEEE Trans. on Control Systems Technology**, 2008, 16(3):548-555.
- [46] 于振中, 闫继宏, 赵杰, 等. 利用波域预测的四通道时延双边遥操作[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5):32-36.
- [47] AZIMINEJAD A, TAVAKOLI M, PATEL R V, et al. Stability and performance in delayed bilateral teleoperation: theory and experiments [J]. **Control Eng. Practice**, 2008, 16(11):1329-1343.
- [48] LLEWELLYN F B. Some fundamental properties of transmission systems [J]. **Proceedings of the IRE**, 1952, 40(3):271-283.
- [49] HASHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S E. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators[J]. **Intl. Journal of Robo. Research**, 2001, 20(6):419-445.
- [50] 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, 824.
- [51] NATORI K, TSUJI T, OHNISHI K, et al. Robust bilateral control with Internet communication [C]//Proceeding of 30th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. South Korea: IEEE, 2004:2321-2326.
- [52] NATORI K, OHNISHI K. An approach to design of feedback systems with time delay [C]//Proc. of 31st Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. USA: IEEE, 2005:1931-1936.
- [53] NATORI K, OBOE R, OHNISHI K. Stability analysis and practical design procedure of time delayed control systems with communication disturbance observer [J]. **IEEE Transactions on Ind. Inf.**, 2008, 4(3):185-197.
- [54] NATORI K, OHNISHI K. A design method of communication disturbance observer for time-delay compensation, taking the dynamic property of network disturbance into account [J]. **IEEE Transactions on Ind. Elec.**, 2008, 55(5):2152-2168.
- [55] NATORI K, KUBO R, OHNISHI K. Transparency of time delayed bilateral teleoperation systems with communication disturbance observer [C]//Proc. of Int. Conf. on Mechatro. . Japan: IEEE, 2007:1-6.
- [56] HIYAMA N, NATORTI K, OHNISHI K. Bilateral teleoperation under time-varying communication time delay considering contact with environment [J]. **Electro. and Communications in Japan**, 2009, 92(7):38-46.
- [57] SUZUKI A, OHNISHI K. Performance conditioning of time delayed bilateral teleoperation system by scaling down compensation value of communication disturbance observer [C]//Proceedings of 11th IEEE Intl. Workshop on Adv. Motion Control. Japan: IEEE, 2010:524-529.
- [58] NATORI K, TSUJI T, OHNISHI K, et al. Time-delay compensation by communication disturbance observer for bilateral teleoperation under time-varying delay [J]. **IEEE Transactions on Ind. Elec.**, 2010, 57(3):1050-1062.
- [59] NUNO E, BASANEZ L, ORTEGA R. Passivity-based control for bilateral teleoperation: a tutorial [J]. **Automatica**, 2011, 47(3):485-495.
- [60] CHOPRA N, SPONG M W, HIRCHE S, et al. Bilateral teleoperation over the Internet: the time varying delay problem [C]//Proceedings of America Control Conference. USA: IEEE, 2003:155-160.
- [61] CHOPRA N, SPONG M W, ORTEGA R, et al. On tracking performance in bilateral teleoperation [J]. **IEEE Trans. on Robotics**, 2006, 22(4):861-866.
- [62] FUJITA H, NAMERIKAWA T. Delay-independent stabilization for teleoperation with time varying delay [C] //Proc. of American Control Conf. USA: IEEE, 2009:5459-5464.
- [63] NAMERIKAWA T. Bilateral control with constant feedback gains for teleoperation with time varying delay [C]//Proc. of Joint 48th IEEE Conf. on Decision and Control and 28th Chinese Control Conf. . China: IEEE, 2009:7527-7532.
- [64] HUA C C, LIU X P. Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays [J]. **IEEE Transactions on Robotics**, 2010, 26(5):925-932.
- [65] TIAN D, YASHIRO D, OHNISHI K. Haptic transmission by weighting control under time-varying communication delay [J]. **IET Control Theory & App.**, 2012, 6(3):420-429.
- [66] TIAN D, YASHIRO D, OHNISHI K. Wireless haptic communication under varying delay by switching-channel bilateral control with energy monitor [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2012, 17(3):488-498.
- [67] YASHIRO D, TIAN D, OHNISHI K. Centralized controller based multilateral control with communication delay [C]//Proc. of IEEE Intl. Conf. on Mecha. Turkey: IEEE, 2011:991-996.
- [68] TUMERDEM U, OHNISHI K. Delay independent L_2 stable multilateral teleoperation with damping injection [C] //Proceeding of IEEE Int. Conf. on Industrial Technology. Chile: IEEE, 2010:88-93.