

人机交互力觉临场感遥操作机器人技术研究

宋爱国

东南大学仪器科学与工程学院, 南京 210096

人机交互式机器人是当前机器人学研究的前沿和热点之一,而临场感(telepresence)技术是人与机器人交互的核心。本文通过阐述力觉临场感遥操作机器人技术的产生、发展和现状,介绍了力觉临场感遥操作机器人的系统组成,指出力觉临场感遥操作机器人面临的3个难题:力感知、力反馈和大气时延力控制。针对以上问题,对力觉临场感遥操作机器人的四大关键技术:传感技术、力反馈与触觉再现技术、大气时延控制技术、虚拟预测环境建模技术进行了综述;介绍了东南大学仪器科学与工程学院机器人传感与控制技术研究所30年来开展人机交互遥操作机器人技术研究的进展及其在核探测、康复医疗领域应用的情况。展望了人机交互力觉临场感遥操作机器人技术未来研究与发展的重点。

20世纪90年代初,由于智能机器人技术经过近30多年的大规模研究一直没有达到预期目标,机器人领域专家对智能机器人的研究进行了深刻反思,结果表明,由于受到机构、传感、控制、人工智能等技术水平的限制,发展能在未知或复杂环境下工作的全自主式智能机器人是当前乃至今后相当长的时间内难以达到的目标^[1-3]。

许多机器人学研究者认为,机器人技术的研究重点应从全自主方式转向人机交互方式,尤其是在未知环境中作业的机器人,这样更具有现实意义^[4,5]。因此,工作在人与机器人交互方式下的遥操作机器人技术自20世纪90年代中期开始受到人们的广泛关注和研究^[6]。

所谓交互技术包括人与机器人的交互和机器人与环境的交互。前者的意义在于可由人去实现机器人在未知或非确定性环境中难以做到的规划和决策,而后者意义在于可用机器人去完成人所不能达到的恶劣环境(空间、深海、辐射、高温、战场、毒害等)下的作业任务。这里的关键是人-机器人-环境的交互界面问题,临场感(telepres-

ence)技术是人机交互遥操作的核心^[7]。

临场感在美国称为“telepresence”^[8],在日本称为“tele-existence”^[9]。其实人们早已有了这样的梦想:身处此地,而又同时如在另一地,并可自然地感受到彼此所发生的一切。“telepresence”从意义上侧重于远地环境在操作者周围的重现,即由计算机和各种感受作用装置(如主机械手、数据手套、数据衣、头盔显示器等)生成关于远地真实环境映射的虚拟环境;“tele-existence”在意义上侧重于由替身实现操作者在远地环境中的存在,即由机器人成为操作者在远地的替身。虽然两者的侧重点不同,但本质是一致的,即:一方面通过操作者操控(或穿戴)的多传感器系统将操作者的运动和位置信息实时检测并作为控制指令送到远地机器人控制器中;另一方面通过在远地机器人上安装的多传感器系统将机器人和环境的交互信息(视觉、听觉、力觉、触觉等信息)实时地检测并反馈到本地,并以自然和真实的方式直接作用于操作者的感觉器官,使操作者产生身临其境的感受,从而有效地感知环境及控制机器人完成复杂

的任务。具有临场感的遥操作机器人系统是一种人在回路(human in the loop)的复杂人机耦合系统^[10]。

临场感遥操作机器人的实现,将极大地改善机器人的作业能力,人们可以将自己的智慧同机器人的适应能力相结合而完成有害环境或远距离环境中的作业任务,如空间探索、海洋开发、核能利用、远程医疗、远程实验、军事战场、反恐安保等领域。

正是鉴于临场感遥操作机器人技术的重大意义和应用价值,美、日、德等发达国家竞相开展相关技术研究和开发,如力反馈和触觉再现技术、三维立体视觉显示技术和虚拟环境技术^[11-13]等。从20世纪90年代初开始,美国国家航空航天局(NASA)针对空间遥操作机器人关键技术进行深入研究^[14],日本也制定了一项为期8年的先进机器人研究计划实现临场感遥操作机器人系统^[15],德国针对空间机器人的应用开展临场感遥操作机器人ROTEX研究计划^[16]。

中国“863计划”在1993年就将临场感遥操作机器人作为关键技术进行立项研究。清华大学、东南大学、中国



科学院合肥智能机械研究所、中国科学院沈阳自动化所、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等单位从1992年开始先后开展了临场感遥操作机器人技术的研究工作^[17]。中国的载人航天与探月工程在2005年也将临场感遥操作技术作为空间机器人的关键技术立项研究,中国空间技术研究院、上海宇航技术研究所、哈尔滨工业大学、东南大学、清华大学等单位针对中国空间探测任务的需要,积极开展人机交互空间遥操作机器人技术的研究。

1 临场感遥操作机器人系统的组成

临场感概念的提出者之一,日本著名机器人专家Tachi认为临场感遥操作机器人系统应由类人型机器人及其监控系统、遥控子系统和一增强传感子系统等几部分组成,同时他还指出传感器技术对于临场感遥操作机器人系统是至关重要的^[18]。要实现临场感遥操作机器人系统就必须研究开发下列有关技术:1) 测量人体运动的技术;2) 研制与人类感觉器官功能和尺寸相仿的视觉、听觉、力觉、触觉的传感器技术;3) 类人型机器人的控制技术;4) 复现机器人感觉的感知再现技术。

Tachi对临场感遥操作机器人系统的说明,只是狭义上的临场感系统,广义上的临场感系统应包括操作者和环境在内,即临场感系统由操作者、人机感知交互设备(头盔、数据手套、数据背心、外骨架装置、手控器等)、计算机、机器人和环境组成,如图1所示。

临场感主要可分为力觉临场感(force telepresence)和视觉临场感(visual telepresence)两种形式。

对于力觉临场感遥操作机器人系统而言,一般由以下几个基本功能单元组成:运动传感器单元、控制器单元、力觉传感器单元、触觉传感器单元、力反馈单元、触觉再现单元,如图2所示。

根据现有的机器人硬件技术去实现此功能结构,目前亟待需要在以下2个基本功能单元上取得突破:1) 小型化

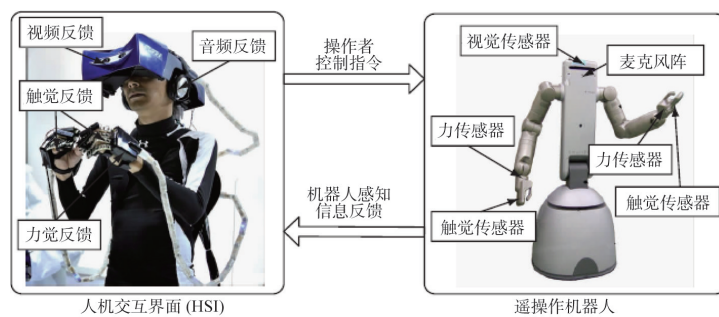


图1 临场感遥操作机器人系统的组成

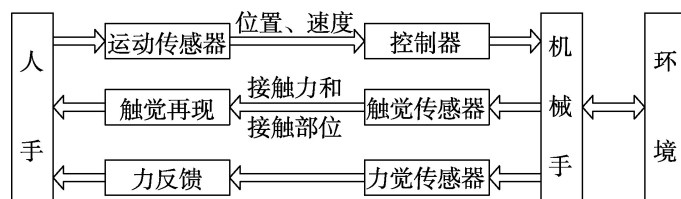


图2 力触觉临场感机器人系统的功能单元

的多维力觉传感器与类人皮肤的阵列触觉传感器研究;2) 小型化高精度力反馈与触觉再现人机交互感知装置研究^[19]。

此外,由于人机交互临场感遥操作机器人系统在人与机器人之间不仅距离遥远,而且存在着大量的控制与感知信号的双向交流,受通信环节信号带宽有限的影响,人与远地机器人之间的信号传输存在很大的时延,如空间站遥操作机器人与地面控制站之间的时延可达7 s之多,水下遥操作机器人与水面操作者之间的通信时延有10 s以上。这样大的通信时延造成了力觉临场感遥操作机器人的不稳定和难以操作。

因此,力感知、力反馈与大时延力控制成为人机交互力觉临场感遥操作机器人面临的3个难题。力觉临场感遥操作机器人技术涉及面广,其中,传感技术、力反馈与触觉再现技术、大时延控制技术、大时延下虚拟预测环境建模技术是力觉临场感遥操作机器人的四大关键技术。

2 力觉临场感遥操作机器人的传感技术

力觉临场感遥操作机器人的传感技术主要包括2个方面:1) 测量操作者运动和姿态的传感技术;2) 机器人

与环境交互感知的非视觉传感技术。

2.1 测量操作者运动的传感技术

人体运动测量装置有头盔显示器(head mounted TV)、外骨架装置(exo-skeletal device)、数据手套(data glove)等固定在操作者身体上的测量装置,也有采用机器视觉对人体姿态进行非接触测量的装置。

1) 头部运动位置的检测。检测操作者头部运动位置的传感装置通常是利用测向仪和超声波定位等方法测量操作者头部的运动。代表性装置是头盔显示器,一些头盔显示器还可以测量人眼球的运动。

2) 操作者身体运动位置的检测。检测操作者身体运动位置的传感设备包括两类:一类是用于检测操作者躯体运动的数据衣;另一类是用于检测手部运动和位置的外骨架装置或数据手套。目前主要有以下几种外骨架装置或数据手套:EXOS Dexterous Hand Master, VPL Data Glove, Immersion Data/Cyber Glove, Mattel Power Glove, 5DT Data Glove。

美国EXOS公司的Dexterous Hand Master(图3)是外骨架装置的典型代表^[20],它是固定在操作者肢体上的刚性串联连杆机构,连杆的关节位置与人体

关节位置相同,具有20个关节,每个关节上装有小巧的磁霍尔传感器测量手指转角,角度分辨率达到 0.1° 。

数据手套一般采用柔性材料制成手套形状,并在手套上安装柔性角度

传感器测量手指的关节角度。数据手套一般采用电阻式弯曲传感器与光纤型角度传感器2种方式测量关节角度。Immersion公司的Data/Cyber Glove具有18或22个光纤型角度传感器,分

辨率为 0.5° ,质量仅84 g;5DT公司的Data Glove具有14个光纤型角度传感器,分辨率为 0.1° ,质量300 g;日本Mattel公司的Power Glove采用塑料电位计式角度传感器测量关节角度(图4)。

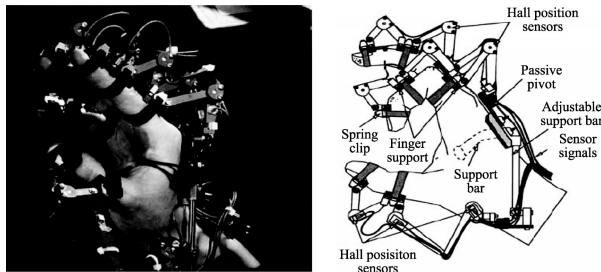
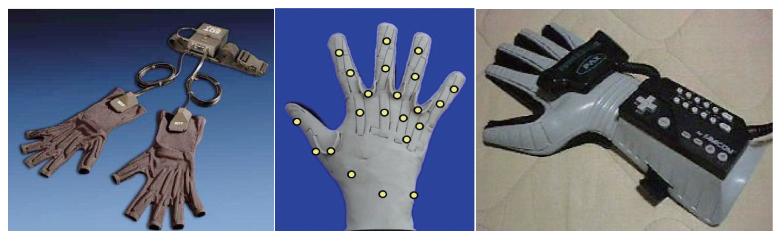


图3 EXOS公司的Dexterous Hand Master



(a) 5DT公司Data Glove (b) Immersion公司Data Glove (c) Mattel公司Power Glove

图4 几种常见的数据手套

2.2 机器人与环境交互感知的非视觉传感技术

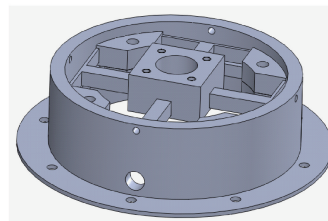
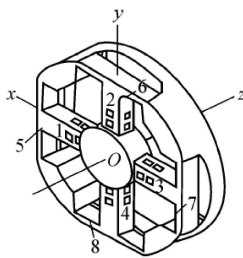
机器人非视觉传感技术主要有力觉传感器和触觉传感器。力觉传感器用于检测机器人同目标接触时产生的力和力矩,包括腕力传感器、指间力传感器和关节力传感器等。触觉传感器用于检测与目标接触时的压力分布、表面形状、振动、温度等信息。

1) 机器人力觉传感器。目前研究主要集中在各种机器人腕力传感器上,其典型结构为十字梁型弹性体结构(图5(a))^[21]。国内外代表性的产品为美国ATI公司的系列六维力/力矩传感器,以及中国科学院合肥智能机械研究所和东南大学仪器科学系联合研制的SAFMS型机器人六维腕力传感器^[22-24]。

机器人六维腕力传感器影响人机交互精度的主要问题:惯性力的影响严重、维间耦合干扰较大、体积大。

在力觉临场感遥操作机器人中要求力觉传感器体积小、重量轻、精度高,特别是应克服惯性力的干扰。这需要在结构和测量原理上探索新的方法和手段。

1) 机器人触觉传感器。目前研究较多的是光电式、压电式及半导体电容式阵列触觉传感器^[25,26]。大多数触觉传感器仍长期停留在对法向力的检测上,



(a) 典型的十字梁结构 (b) 东南大学的六维力传感器结构 (c) 东南大学研制的六维力传感器

图5 机器人六维腕力传感器的十字梁型弹性体结构

三维触觉传感器虽取得一定进展,但其一致性和维间干扰仍难以完全解决。

2) 在力觉临场感遥操作机器人中迫切要求触觉传感器面积大、厚度薄、分辨率高、一致性好、具有类似人类皮肤的柔软性。

3 临场感遥操作机器人的力/触觉再现技术

力/触觉再现技术主要包括力反馈技术和触觉再现技术。力反馈装置具有力反馈功能,使操作者能够感受到远地机器人与环境之间的作用力。触觉再现将远地机器人所接触物体的外形轮廓与触觉特征再现给操作者,使操作者产生实际接触远地物体的触觉感觉。

3.1 力反馈技术及装置

力反馈装置主要有力反馈数据手

套、手控器、操纵杆等。

力反馈数据手套如Immersion公司生产的MasterARM(图6(a)),在关节上增加驱动电机,获得力反馈作用。美国Rutger大学研制的力反馈数据手套(图6(b))采用气体泵产生力觉反馈。

手控器是临场感遥操作机器人的力反馈人机感知接口装置,它的作用可以归结为:1) 操作者手臂运动的跟踪测量,并将对人手的测量结果作为机械手的运动控制指令;2) 对操作者手部产生和机械手与环境之间作用力成比例的力。手控器分同构式和异构式两种,异构式手控器是当今遥操作系统中手控器的主流。

图7^[6]为美国Utah大学研制的外骨架式手控器和遥操作机器人。外骨架式手控器是较早发展的一种同构式手



控器,它的各个关节是串联的。重要特点是结构上是按照人手臂结构和运动设计,整个手控器固定或联接在操作者的手臂上,它一方面测量人手臂关节的运动,另一方面将反馈力分别作用在人的肩、肘、腕、手指关节上。

美国NASA针对空间机器人遥操作的需要,于1988年研制了Salisbury/JPL力反馈手控器^[27],它的特点是6个直流伺服电机后置以平衡重力并产生6个自由度力作用,如图8(a)^[27]所示。加拿大针对空间舱外18 m长大型机械臂的遥操作,于2004年研制了三维力反馈手控器,它具有较大的运动空间,如图8(b)^[28]所示。日本针对卫星遥操作机器人研制了基于Delta并联机构的6自

由度力反馈手控器(图8(c))用于ETS-VII卫星上的机器人遥操作,结构简洁,具有较好的力反馈效果^[29]。

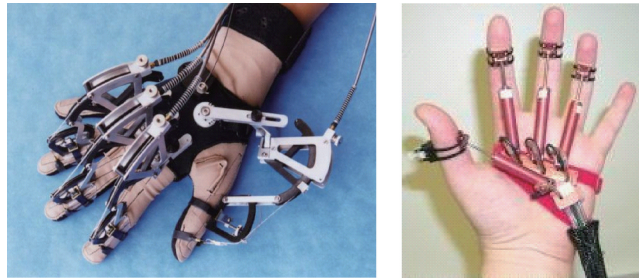
东南大学仪器科学与工程学院针对不同用途的力觉临场感遥操作机器人研制了多种力反馈手控器^[30,31]。图9为两种同构式的力反馈手控器,图9(a)为1997年研制用于空间舱内机器人遥操作的6自由度力反馈手控器;图9(b)为1999年研制的用于远程共享实验室机器人遥操作的6自由度力反馈手控器。图10为两种异构式的力反馈手控器,图10(a)为2003年针对网络遥操作机器人研制的6自由度异构式力反馈手控器HC01,它具有运动空间大,精度高的特点;图10(b)为2011年针对

觉传感器输出的机械手与物体相接触的信号进行物理重现,并刺激人体的相应部位,从而再现远地机械手与物体的接触力、接触形状以及物体的柔性、纹理、温度等物理特性。

触觉再现可分为形状改变式和表面刺激式两大类。

形状改变式触觉再现是通过位移变化模拟远地物体表面与机械手的接触状态,使操作者直接感觉到远地物体的存在及其形状。形状改变式触觉再现早期是采用气囊、气环制作,如触觉反馈手套 Teletact Glove II 就是在手指和手掌的一些关键部位上安装了30个气囊,使操作者能够大致感觉到远地物体的接触部位和形状。为了提高触觉显示器的分辨率,Tini Alloy公司采用形状记忆合金制作了阵列触觉显示器(图11),其空间分辨率为3 mm,单点输出力为0.2 N。英国Hull大学利用电流变材料研制了高密度触觉显示器,通过电极点阵施加电场使电流变体在要求的部位变硬,从而可在其表面摸出远地物体的形状,达到被动触觉显示的效果,其空间分辨率达2 mm,但这种装置需要施加2000 V或更高的工作电压。

表面刺激式触觉再现是通过对手



(a) Immersion公司的MasterARM

(b) 美国Rutger大学的力反馈数据手套

图6 力反馈数据手套

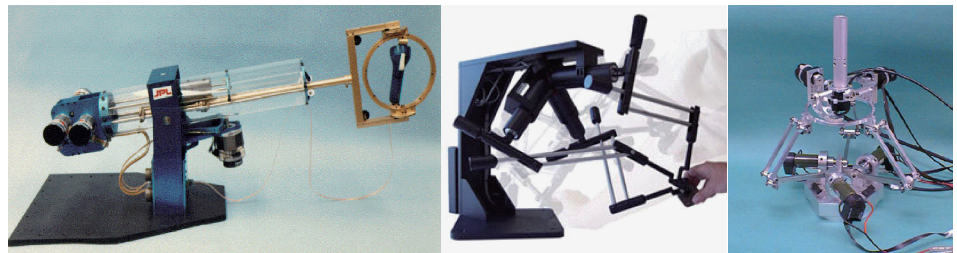
空间舱内机器人地面遥操作所研制的7自由度力反馈手控器。

3.2 触觉再现技术及装置

触觉再现是指安装在操作者手上的触觉作用设备将机器人触



图7 美国Utah大学研制的外骨架同构式力反馈手控器



(a) 美国NASA的力反馈手控器

(b) 加拿大研制的力反馈手控器

(c) 日本研制的力反馈手控器

图8 几种典型的异构式力反馈手控器

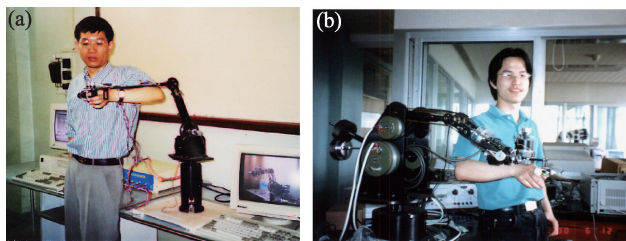


图9 东南大学研制的同构式力反馈手控器

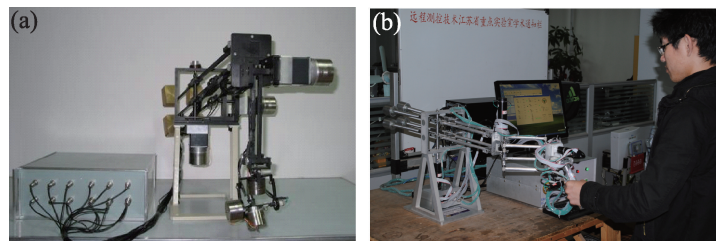


图10 东南大学研制的异构式力反馈手控器

作者皮肤表面或表皮神经施加气流冲击、振动刺激或电刺激,使操作者在相应位置产生触觉,从而实现触觉再现^[32]。振动刺激采用电磁式振动音圈、压电材料或SMA等多种驱动方式,如Immersion公司的触觉反馈数据手套Cyber Touch上安装多个振动音圈作为触觉再现器件,构成振动刺激式触觉反馈手套,通过振动使操作者感觉到机器人与目标对象的接触部位和接触状态(图12^[32]),但是振动音圈尺寸较大难以制作出高密度阵列。TeleSensory公司研制的阵列式振动触觉显示器具有100个刺激点,空间分辨率为1.9~3.8 mm,振动频率为230 Hz。电刺激触觉

显示采用表面电极刺激、神经肌肉刺激或静电刺激方式产生触觉感受。美国Louisiana技术大学和Wisconsin大学正在研制硅基底静电触觉显示器,它是在硅片上制作电极阵列,并覆盖聚酰亚胺薄膜作为电绝缘层,当电极上施加200~600 V电压时,对触摸该硅片的手指表皮产生静电吸引力,从而在相应位置感觉到接触。美国西北大学教授Colgate2007年提出了一种在手机显示屏上实现触觉反馈的TPad触觉再现系统(图13^[32]),它通过内嵌在显示屏中的压电陶瓷片产生不同强度的振动,改变操作者手指与接触面的表面摩擦力,从而让操作者获得从很光滑到很粗糙的

感觉来再现不同模式的纹理触觉。这种方法能实现较精细的纹理触觉,但提供的接触面积较小。

东南大学仪器科学与工程学院宋爱国课题组研制了多种触觉再现装置,2005年与美国西北大学合作研制了一种基于弹性梁结构控制的柔性触觉再现装置(图14(a))^[33];2006年研制了一种基于运动控制的纹理触觉再现装置(图14(b))^[34];2008年又研制了一种基于磁流变液的无源触觉再现装置,可以实现大量程触点力反馈要求下的触觉反馈(图14(c))^[35]。

由于完整的触觉再现技术涉及形状、纹理、表面柔顺性以及温度等物理



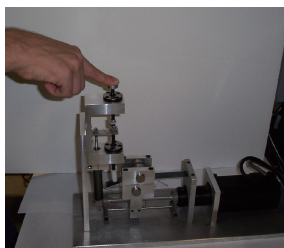
图11 Tini Alloy公司的阵列触觉显示器



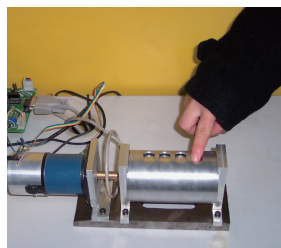
图12 Immersion公司的振动触觉手套 Cyber Touch



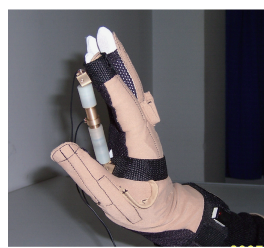
图13 美国西北大学的TPad触觉再现系统



(a) 柔性触觉再现装置



(b) 纹理触觉再现装置



(c) 无源触觉再现装置

图14 东南大学研制的多种触觉再现装置

属性的重现,其复杂性与难度远远高于立体视觉显示技术,至今为止,尚未研制出令人满意的综合触觉再现装置。

4 力觉临场感遥操作机器人的大时延控制技术

人与机器人之间的通信时延造成了力觉临场感遥操作机器人系统的不稳定和难以操作,时延问题是力觉临场感遥操作机器人控制所面临的最主要问题,目前解决的思路主要有两种:一是通过控制算法实现系统的稳定性与

可操作性;二是采用虚拟预测环境建模技术克服大时延的影响。

4.1 基于控制理论的大时延力反馈控制技术

1988年,Raju首先提出用二端口网络理论分析力反馈遥操作机器人系统,并指出导致系统不稳定的原因在于时延造成了通信环节的有源性^[36]。1989年Anderson等^[37]利用散射算子分析法提出了一种无源控制算法来解决传输线的有源性,在小时延下可保证系统的稳定性。1991年Niemeyer等^[38]提

出了波变量的概念,利用能量流理论,提出了一套相类似的无源控制算法。1993年Hannaford^[39]对存在通讯时延的遥操作机器人系统采用上述的无源控制算法进行了实验研究,结果表明,两种无源控制算法都能保证力反馈遥操作机器人在大时延下的稳定性,然而这种控制算法造成力反馈的失真,是以牺牲遥操作机器人的力觉临场感性能为代价的。1998年Niemeyer和Slotine对基于波变量的无源控制算法进行改进,提出了基于“波积分”的大时延无源控制算法^[40]。1999年,美国密执根州立大学席宁等^[41]针对大时延力反馈遥操作机器人的控制问题,提出了基于事件的控制算法,用于保证随机时延对系统稳定性的影响。2003年Chopra等^[42]通过频域优化技术,提出了阻抗匹配滤波器设计,以保证力反馈遥操作系统的无源性和透明性。2008年东南大学李会军、宋爱国提出了基于操作对象等效阻抗在线辨识与修正的自适应无源控制



算法,可保证较大时延下力觉临场感机器人的稳定性^[43],2012年又将这种基于阻抗辨识的自适应无源控制算法应用于力反馈康复训练机器人的控制^[44]。

以下为一些典型力反馈遥操作机器人系统的时延控制方法的简要介绍。

1) 基于无源性的控制方法。无源理论是从电网络理论发展而来的一种保证稳定性的理论。无源的系统是稳定的,而且多个无源的系统通过串联、并联、反馈而得到的系统仍然是无源的。无源理论从能量传递的角度判断系统的稳定性,应用范围已经从电网扩展到了控制系统中。在时延力反馈遥操作机器人双边控制系统中,从边环境、从机器人、主机器人都是无源的,操作者也可以认为是无源的。因此,如果能保证遥操作机器人系统通信环节的无源性,就可以保证整个系统的无源性,从而保证系统的稳定性^[45]。基于无源理论的方法是分析力觉临场感遥操作机器人控制性能最有力的工具。

2) 基于时间的控制方法。在常规的基于时间的遥操作机器人系统中,从控制参数的角度看,各部件使用时间作为参数是引起系统不稳定的主要原因,也就是说控制和反馈系统按照时间轴进行采样造成了系统的不稳定。因此,如果各部件不使用时间作为参数,则可消除时延的负面影响。传统的控制系统中,系统的动力学方程是通过微分方程描述的,参数为时间变量 t ,而且,运动轨迹也通常是时间的函数。基于非时间参数的控制方法使用非时间参数变量模型化系统与运动轨迹。这些非时间参数称作运动参数,通常用 s 表示,并把它称作基于时间的运动参数。基于时间的控制方法原理如图15所示^[46]。

图15中的运动参数模块模仿时钟运行,它从机器人系统的输出或状态 y 映射到因子 s ,机器人的规划或者命令被描述成 s 的函数,该参数通常取为系统的物理输出,如距离或者位置。事件参数也可取作一个虚拟值不对应任何物理量。例如,选为系统执行控制循环的次数。只要机器人的控制器是稳定的,则基于事件的控制方法就能保证时

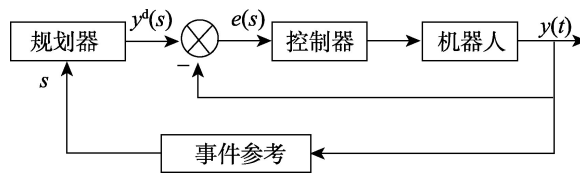


图15 时延力反馈遥操作机器人基于时间的控制方法

延力反馈遥操作机器人系统的稳定性,但是在这种方法下,控制的性能是与选取的事件参考变量相关的,由于事件参考变量的选取还没有一套通用的方法,所以基于事件的控制方法有很大的随意性和局限性。

3) 基于 H_∞ 理论的控制方法。利用 H_∞ 控制理论进行时延下力反馈遥操作机器人控制不仅可以得到期望的稳定控制,还能将时延对遥操作系统的影响降到最低,并且能够在一定程度上满足系统的性能要求,同时对系统可能存在的其他方面的扰动也具有一定的鲁棒性^[47]。

1995年Leung等^[48]将通信时延建模为系统扰动,并根据 μ 算子综合设计控制器使得遥操作机器人系统对时延具有鲁棒性,同时系统获得了较好的控制性能。1996年Yan等^[49]对力反馈双向遥操作机器人系统提出了统一的 H_∞ 控制框架,以取得稳定性和透明性之间的平衡。2008年,Razi等^[50]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_∞ 控制方法,该方法可以对主从力反馈遥操作机器人的位置和力值跟踪误差函数的权值进行调节,但对于任意时延的情况,该控制方法难以胜任。较大的时延会得到比较保守的结果,较小的时延又有可能无法保证系统的稳定性。而且, H_∞ 的设计问题需要解适当的偏微分方程或不等式,在力反馈遥操作机器人系统中求这些偏微分方程或不等式是非常困难的。

虽然针对具有时延的力反馈遥操作机器人的控制算法还在不断改进与研究中,但是,这些控制算法还不能完全满意地解决遥操作机器人系统中的时延问题,特别是大时延(7s以上)情况。因此,人们除了继续研究具有最佳

操作性能的控制算法外,还需要寻求其他途径来克服大时延对力反馈遥操作机器人系统性能的影响。

4.2 基于虚拟预测环境建模的大时延力反馈控制技术

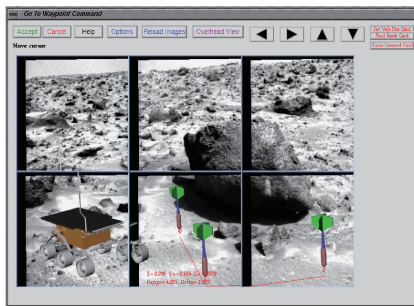
虚拟现实(virtual reality, VR)技术是解决大时延力反馈遥操作问题的重要手段。利用VR技术建立力觉临场感机器人及其环境的准确的虚拟预测仿真图形,并提供真实的力觉/触觉反馈,将可以使操作者在良好的人机界面条件下进行遥操作,有效解决大时延对力觉临场感机器人的稳定性和可操作性的影响。

美国NASA针对空间遥操作机器人的虚拟预测环境建模进行了深入研究和开发,JPL实验室1990年就设计了“仿真遥操作机器人系统”^[51],通过模拟预测远地工作现场的环境和机器人的运动提供给操作者以实时的视觉反馈。1991年JPL实验室设计了“遥操作机器人环境模拟器(GLETS)”^[52],GLETS使操作者置身于一个实时的、交互式的、模拟的、视觉可调的远地机器人工作现场的虚拟环境中。GLETS用三维有阴影的彩色图形来描绘机器人的现场环境,利用光偏振技术提供立体图像,操作者通过力反馈数据手套装置,控制机械手的动作。当远地真实环境和虚拟环境间的差别超过一定范围时,利用反馈的传感信息进行调节。1992年德国研制的空间机器人ROTEX中就包括了在时延情况下具有预测机器人状态能力的计算三维图像和立体显示算法。

虚拟现实技术用于大时延遥操作机器人的一个典型例子是火星探测机器人(图16)^[53]。1997年7月,基于虚拟现实技术控制的旅行者号火星探测器



(a) rover机器人在火星上的实际图片



(b) 地面建立的机器人 rover 的虚拟环境

图 16 基于虚拟环境建模的遥操作火星机器人系统

在火星上着陆,其图形界面上提供了大量的操作指令。利用一个简单的轨迹球作为 I/O 接口设备就能将虚拟的工作现场和虚拟的火星旅行者的模型连接在一起。操作者的规划可以通过图形编程的方法实现。如果结果令人满意,则控制代码通过深空通信网络传输给火星旅行者机器人。

日本国家宇宙开发事业集团(NASDA)于2002—2007年在ETS-VII卫星上完成基于虚拟预测环境的遥操作机器人实验任务(图17^[28]),整个系统包括力反馈操纵杆、卫星机器人及其作业环境、虚拟卫星机器人及其虚拟作业环境构成的虚拟预测环境,以及卫星通讯环节。虚拟机器人和真实机器人一样同时受到操作者的遥操作控制,虚拟环境产生预测作用力通过力反馈操纵杆实时反馈给操作者。远地反馈回来的真实图像叠加在虚拟图形上,帮助操作者理解时延的情况。

图18^[54]为东南大学建立的空间单自由度遥操作机器人的虚拟预测环



图 18 虚拟预测图形与真实图像的叠加

境。通过虚拟现实技术建立空间机械臂和操作环境的3D虚拟模型,对机械臂的动作进行预测。在虚拟预测环境中,通过模拟碰撞检测计算出虚拟的反馈力,实现接触力的预测,通过虚拟机械臂线框模型和真实机械臂图像的定位叠加,实现增强现实预测;对未知环境进行在线的模型修正,提高对真实机械臂运动与接触力预测的准确性。克服大时延的虚拟预测环境建模技术包括对机械臂及工作环境的几何学和运动学建模,以及利用远地机器人的多传感器反馈信息进行机械臂工作状态的准确计算与预估^[54]。

尽管基于虚拟预测环境的遥操作机器人控制技术是解决大时延问题的有力手段,但存在的主要问题是:由于机器人工作环境的未知性或不确定性,难以准确建立环境的预测模型,如何在线建立准确的环境预测模型是目前需要深入研究的难题。

5 东南大学的相关研究进展与典型应用

东南大学仪器科学与工程学院机器人传感与控制技术研究所成立于1984年,一直从事机器人传感和控制技术的研究工作。通过30年的长期研究,在力觉临场感遥操作机器人的传感技术、控制技术、力触觉再现技术、虚拟环境建模技术等方面都取得了重要的进展,并将力觉临场感遥操作机器人技术应用于空间探索、远程康复医疗和核化探测与应急处置领域^[55-61]。



图 17 ETS-VII 的地面设备和预测虚拟环境

5.1 远程康复医疗机器人

中国是世界上残障者最多的国家,全国残障者总数约6700万。此外,全国60岁以上的老年人口也有较大的增长,2011年人口普查显示中国60岁以上人口占13.26%,老龄化进程逐步加快。中风是目前严重危害中老年人身体健康的主要疾病之一,具有发病率高、致死率高、致残率高、复发率高、合并症及治愈率低的特点。中风后遗症主要表现为肢体痉挛、僵硬、偏瘫、植物人等。

对中风患者偏瘫部位进行康复训练是十分重要和关键的医疗手段。医学专家指出,对于因中风、脊髓损伤和各种事故引起的肢体功能残障的患者来说,及时进行康复训练,就可以有效恢复神经肌肉的功能,大大减少造成终身残疾的可能性。肢体康复训练机器人不但将为这些患者带来福音,也将具有广阔的市场前景。图19为将力觉临场感遥操作机器人应用于康复训练领域,研制的网络化远程力觉辅助康复训练机器人,可以实现一个康复治疗师同时远程控制3台不同的康复训练机器人,并监控3个肢体运动功能障碍患者的康复训练过程,机器人可提供给患者合适的力反馈作用。

5.2 小型核化探测与应急处置遥操作机器人

核辐射和生化毒剂因其威胁的隐



(a) 康复训练者与康复机器人

(b) 康复治疗师端控制界面

图19 东南大学研制的网络化远程力觉辅助康复训练机器人

蔽性、持续性和大范围杀伤性使得其始终成为各种恐怖袭击的首选手段。另外中国核电事业处于快速发展期,目前正在运营的核电站有6座,在建的有12座,筹建中的有25座。2011年3月11日,日本东部海域大地震引发海啸所造成的福岛核电站核泄漏事故,给世界各国核电安全敲响了警钟。在应对核生化恐怖袭击和各种核泄漏事故中,能否

快速准确地探明核泄漏源位置及核辐射程度或生化危险品污染情况,是制订正确处置方案的前提。研制一种适应各种复杂危险环境、高度机动灵活、远程控制距离远、现场可迅速展开的小型核化探测与应急处置遥操作机器人是解决这一问题的重要手段。

自2004年开始,本研究所与南京军区防化研究所、北京防化研究院合作

将力觉临场感遥操作机器人技术用于核化探测和应急处理领域,研制成功了小型核化探测与应急处置遥操作机器人(图20)。研制的小型核化探测遥操作机器人能够在核生化灾害现场代替人完成诸如侦查、取样等任务,提高应对核生化事故或者恐怖袭击的处理能力。小型核化探测遥操作机器人在野外无线遥控距离可达3~5 km,城市环境下无线遥控距离大于1 km。移动机器人采用履带式移动机构,可携带机械手和多种核化仪器,在遥操作控制下,进行半自主抓取、取样、探测等工作,能实现基于视觉图像等多传感器信息的自主目标跟踪、自主爬楼梯和自主路径跟踪。遥操作控制器采用三维图形动态模拟和力觉、触觉反馈等方法增强操作员临场感。



(a) 参加上海世博会安保任务

(b) 应用于秦山核电站3期的巡检任务

(c) 执行防化演练任务

(d) 应用于江苏省核应急办的核探测任务

图20 东南大学研制的小型核化探测与应急处置遥操作机器人系列

小型核化探测与应急处置遥操作机器人已形成六代产品,从第二代产品开始装备南京防化分队,其中第二代机器人担负了北京奥运会上海赛区的安保任务;第四代机器人成功完成了2010年上海世博会的安保任务,并多次参加核泄漏和危险化学品污染的应急演练;第五代机器人用于中国科学院上海应用物理研究所的核能系统的安全巡检与监测;第六代机器人已用于秦山核电站3期的安全巡检任务。

6 未来研究重点

由于力觉临场感遥操作机器人涉及学科广、技术高度集成、系统复杂性高,当前的研究水平离理想的临场感尚

有很大的距离,今后需要进一步研究的重点主要有:

1) 临场感概念的提出在于提高遥操作机器人系统中操作者的感知能力,这是操作者正确决策的前提。由于这种身临其境的力触觉感受不仅和系统的性能有关,而且和操作者的生理及心理感觉有关,因此评价力觉临场感系统的操作性能即临场感程度尚存在不少争论,而临场感理论的发展,迫切需要建立一套合理的定量评价力觉临场感系统操作性能的方法。

2) 随着深空探测的发展,如火星探测、太阳系外空间探测,遥操作机器人工作距离越来越远,通信时延不仅越来越长,而且通信中断越来越频繁。这

样大的通讯时延与频繁的信号中断将严重影响遥操作机器人系统的稳定性和操作性能。因此超大时延与信号中断对临场感遥操作机器人系统的影响是下一步急需研究的问题。

3) 力觉临场感遥操作系统是一个人在回路的人机耦合(human-machine-coupling)系统,操作者是一个重要组成部分,操作者的人为因素(生理、心理特性)会对系统的运行产生影响,遥操作系统的人机工效学研究将是今后一个重要的研究内容。

4) 由于远地从机器人大都工作在未知的环境中,难以预先建立机器人工作环境的模型,从而限制了虚拟环境预测控制的作用,因此对未知环境的虚拟

环境建模理论及在线参数辨识方法也是一个需要研究的重点。

5) 由于机械手和人手在结构、柔性上的差异,机器人的力觉、触觉等感觉力如何在人手相应部位准确再现,需要深入研究开发同人类感知相一致的力、触觉和运动觉传感器,及适合于

人的力反馈与触觉再现人机交互装置。

7 结论

临场感遥操作机器人是当前机器人学研究的前沿和热点。本文对力觉临场感遥操作机器人技术的发展现状与关键技术进行了回顾与总结,并介绍

了东南大学仪器科学与工程学院机器人传感与控制技术研究所30年来开展力觉临场感遥操作机器人技术研究的情况及典型应用。通过回顾与分析,指出了力觉临场感遥操作机器人技术今后研究的重点问题。

参考文献(References)

- [1] William T, Ziemke M C. Intelligent teleoperators next generation robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: IEEE, 1988: 113-116.
- [2] Fukuda T, Fujisawa Y, Arai H. Man-robot cooperation work type of manipulator[C]//Proceedings of 8th Annual Conference of Robotics Society of Japan. Tokyo: The Robotics Society of Japan, 1990: 555-656.
- [3] 黄惟一, 宋爱国. 力觉临场感遥操作作业系统的研究进展[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 1995, 25(4): 112-119.
- [4] Kazerooni H. Human-robot interaction via the transfer of power and information signals[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2): 450-463.
- [5] Bejczy A K, Hannaford B. Man-machine interaction in space telerobotics[J]. Proceedings of International Symposium on Teleoperation and Control. New York: Springer-Verlag, 1988: 241-252.
- [6] Sheridan T B. Teleoperation, telerobotics and telepresence: A progress report[J]. Control Engineering Practice, 1995, 3(2): 205-214.
- [7] Satava R M. Robotics, telepresence and virtual reality-A critical analysis of the future of surgery[J]. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 1992, 1(6): 357-363.
- [8] Caldwell D G, Wardle A, Kocak O. Telepresence feedback and input systems for a twin armed mobile robot[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1996, 3(3): 29-38.
- [9] Tachi S, Arai H, Maeda T. Tele-existence master slave system for remote manipulation[C]//Proceedings of 29th IEEE Conference on Decision and Control. San Francisco: IEEE Press, 1990: 85-90.
- [10] Chipalkatty R, Daepf H, Egerstedt M, et al. Human-in-the-Loop: MPC for shared control of a quadruped rescue robot[C]. 2011 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, September 25-30, 2011.
- [11] Hasser C J, Daniels M W. Tactile feedback with adaptive controller for a force-reflecting haptic display. 1. Design[C]//Proceedings of the 1996 Fifteenth Southern Biomedical Engineering Conference. New York: IEEE, 1996: 526-529.
- [12] Maneewarn T, Hannaford B. Haptic feedback of kinematic conditioning for telerobotic applications[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Canada, October 13-17, 1998.
- [13] Pretlove J. Augmenting reality for telerobotics: Unifying real and virtual worlds[J]. Industrial Robot, 1998, 25(6): 401-409.
- [14] Kalaycioglu S, Seifu S. Ground-based control of space station freedom-based robots[C]. Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1992: 2796-2798.
- [15] Tachi S, Arai H. Design and evaluation of a visual-display with a sensation of presence in tele-existence system[J]. Journal of Mechanical Engineering Laboratory, 1992, 46(2): 228-241.
- [16] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J. Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 649-663.
- [17] 宋爱国, 黄惟一. 临场感遥操作作业系统的发展[J]. 高技术通讯, 1996, 6(6): 57-61.
- [18] Tachi S. Tele-existence[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1992, 4(1): 7-12.
- [19] 宋爱国. 力觉临场感的理论与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 1996.
- [20] Omar S I, Hernandez A, McLaughlan R, et al. An approach for the teleoperator control of the Stanford/JPL Dexterous Hand[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: IEEE, 1997: 4303-4308.
- [21] Perry D M. Multi-axis force and torque sensing[J]. Sensor Review, 1997, 17(2): 117-120.
- [22] Huang Weiyi, Jiang Hongming, Zhou Hanqing. Mechanical analysis of a novel 6-degree-of-freedom wrist force sensor[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 1993, 35(3): 203-208.
- [23] 秦岗, 曹效英, 宋爱国, 等. 新型四维腕力传感器弹性体的有限元分析[J]. 传感技术学报, 2003(3): 238-241.
- [24] Song Aiguo, Wu Juan, Qin Gang, et al. A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor[J]. Measurement, 2007, 40(9): 883-891.
- [25] Song Aiguo, Han Yezhen, Hu Haihua, et al. A novel texture sensor for fabric texture measurement and classification[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(7): 1739-1747.
- [26] Song Aiguo, Song Guangming, Constantinescu Daniela, et al. Sensors for robotics[J]. Journal of Sensors, 2013, 2013: 1-3.
- [27] Sheridan Thomas B. Telerobotics[J]. Automatica, 1989, 25(4): 487-507.
- [28] 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.
- [29] Mitsushige Oda, Wakata K. Tele-manipulation of a satellite mounted robot by an on-ground astronaut[C]. 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, May 21-26, 2001.
- [30] 崔建伟, 宋爱国, 黄惟一, 等. 一种新型六自由度通用型手控器[J]. 中国机械工程, 2005, 16(4): 320-323.
- [31] 吴常斌, 宋爱国. 一种七自由度力反馈手控器测控系统设计[J]. 测控技术, 2013, 32(4): 70-73.
- [32] 陆熊, 宋爱国. 力/触觉再现设备的研究现状与应用[J]. 测控技术, 2008, 27(8): 6-10.
- [33] Song Aiguo, Morris D, Colgate J E. Haptic telemanipulation of soft environment without direct force feedback[C]. 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition, Hong Kong, June 27-30, 2005.
- [34] Chen Xu, Song Aiguo, Li Jianqing. A new design of texture haptic display system[C]. 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, Weihai, China, August 20-23, 2006.
- [35] 戴金桥, 王爱民, 宋爱国, 等. 适用于力反馈数据手套的被动力觉驱动器[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 123-127.



- [36] Raju G. Design issue in 2-port networks models of bilateral remote manipulation[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1989, 34(3): 1316-1321.
- [37] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperation with time delay[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1989, 34(3): 494-503.
- [38] Niemeyer G, Slotine J J. Stable adaptive teleoperation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(1): 152-163.
- [39] Hannaford B. Performance testing of passive communication and control in teleoperation with time delay[C]//Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, Georgia, USA, May 2-6, 1993.
- [40] Niemeyer G, Slotine J J. Towards force reflecting teleoperation over the Internet[C]// Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998: 1909-1915.
- [41] Xi Ning, Tarn T J. Action synchronization and control of Internet based telerobotic systems[C]. 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit Michigan, May 10-15, 1999.
- [42] Chopra N, Spong M W, Hirche S, et al. Bilateral teleoperation over the internet: the time varying delay problem[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, CO, USA, June 4-6, 2003.
- [43] 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.
- [44] Song Aiguo, Pan Lizheng, Xu Guozheng, et al. Adaptive motion control of arm rehabilitation robot based on impedance identification[J]. Robotica, 2015, 33: 1795-1812.
- [45] Arcara P, Melchiorri C. Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 38(1): 49-64.
- [46] Xi Ning, Tarn T J. Stability analysis of non-time referenced Internet-based telerobotic systems[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 32(2): 173-178.
- [47] Yokokohji Y, Yoshikawa T. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 605-620.
- [48] 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.
- [49] Yan J, Salcudean S E. Teleoperation controller design using H^∞ optimization with application to motion-scaling[J]. IEEE Transactions on Control System and Technology, 1996, 4(3): 244-258.
- [50] Razi K, YazdanPanah M J. Nonlinear H^∞ control of a bilateral nonlinear teleoperation system[C]. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [51] Kim W S, Bejezy A K. Graphics displays for operator aid in telemanipulation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento California: IEEE Computer Society Press, 1991: 1059-1067.
- [52] Schebor F S, Turney J L. Realistic and consistent telerobotic simulation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: IEEE, 1991.
- [53] Edwards L, Sims M, Kunz C, et al. Photo-realistic terrain modeling and visualization for mars exploration rover science operations[C]. 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Waikoloa, Hawaii, USA, October 10-12, 2005.
- [54] 刘威. 基于虚拟现实的力觉临场感遥操作研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [55] 唐鸿儒, 宋爱国, 章小兵. 基于宏行为的侦察机器人事务执行机制研究[J]. 机器人, 2007, 29(2): 97-105.
- [56] Qian K, Song A G, Bao J T, et al. Small teleoperated robot for nuclear radiation and chemical leak detection[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9: 1-9.
- [57] Guo Yan, Song Aiguo, Bao Jiatong, et al. Research on centroid position for stairs climbing stability of search and rescue robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2010, 7(4): 24-30.
- [58] 郭晏, 宋爱国, 包加桐, 等. 基于差分进化支持向量机的移动机器人可通过度预测[J]. 机器人, 2011, 33(3): 258-272.
- [59] 徐国政, 宋爱国, 李会军. 基于模糊逻辑的上肢康复机器人阻抗控制实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(6): 792-798.
- [60] Pan Lizheng, Song Aiguo, Xu Guozheng, et al. Hierarchical safety supervisory control strategy for robot-assisted rehabilitation exercise[J]. Robotica, 2013, 31(5): 757-766.
- [61] Song Aiguo, Zeng Hong, Yang Renhuang, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction[J]. Instrumentation, 2014, 1(3): 1-12.

Research on human-robot interaction telerobot with force telepresence

SONG Aiguo

School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract Human-robot interaction telerobot is currently a frontier and hot-point of robotics research. Telepresence is a core technique of the human-robot interaction. In this paper, we review the history of the telepresence telerobot technology, and illustrate the architecture of the telepresence telerobot system. There are three fundamental problems in force telepresence telerobot research: force perception, force feedback, and force control under time delay. Then we discuss its four key techniques, that is, sensing technique, force feedback and tactile display technique, control strategy under time delay, and predictive virtual environment modeling. We briefly introduce the development of telepresence telerobot research and its applications to nuclear detection and rehabilitation therapy areas at Southeast University during the past two decades. At last, we point out some future research directions of the human-robot interaction telerobot with force telepresence.

Keywords force telepresence; teleoperation; robot sensor; haptic display; time delay; control; virtual environment

基金项目:国家自然科学基金项目(61325018,61272379);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA013703)

作者简介:宋爱国,教授,研究方向为机器人感知与遥操作机器人技术,电子信箱:a.g.song@seu.edu.cn

(责任编辑 王媛媛)