文章编号:1674-7070(2013)01-0001-19

# 力觉临场感遥操作机器人(1):技术发展与现状

宋爱国

**摘要**

人机交互式机器人作为最具实用价值的特种机器人已成为当前机器人学研究的前沿和热点. 临场感(Telepresence)技术是人机交互的核心. 首先,回顾了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在核领域、空间探测领域与远程医疗领域的应用情况;其次,对力觉临场感遥操作机器人的 4 大关键技术:传感技术、力反馈与触觉再现技术、大时延控制技术和虚拟预测环境建模技术等进行了综述;还介绍了东南大学仪器科学与工程学院机器人传感与控制研究所近 20 年来开展临场感遥操作机器人技术研究,以及在核探测、康复医疗领域应用的情况. 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需要研究的几个重点问题.

**关键词**

力觉临场感;遥操作机器人;机器人传感器;力触觉再现;大时延;控制;虚拟环境

**中图分类号** TP242.3
**文献标志码** A

**收稿日期** 2012-12-12
**资助项目** 国家自然科学基金(61272379);江苏省自然科学基金重点项目(BK2010063)

**作者简介**

宋爱国,男,博士,教授,研究方向为机器人传感与控制技术. a. g. song@ seu. edu. cn

1 东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

## 1 临场感遥操作机器人技术的诞生

1946 年第一台数字电子计算机的问世为现代机器人技术的发展奠定了基础. 1947 年美国阿贡国家原子能实验室开发了世界上第一台机器人,即主从式遥控机械手,用于处理放射性物质,如图 1 所示[1]. 尽管这套主从遥控机械手没有任何的感知反馈(力觉、触觉或视觉等),工作速度很慢,而且难以控制,但是它的出现标志着现代遥操作思想的诞生.

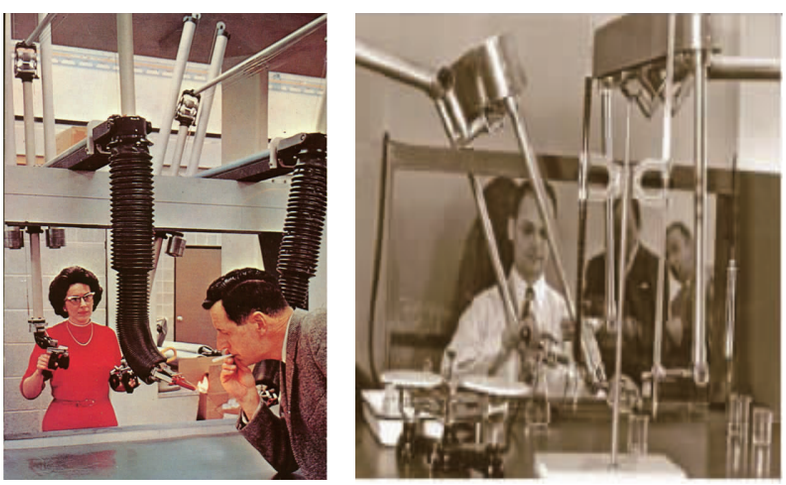


图 1 1947 年美国阿贡国家原子能实验室开发的主从式遥控机械手

Fig. 1 The master-slave manipulator developed by Argonne National Laboratory in 1947

20 世纪 60 年代,随着人工智能技术的诞生与迅速发展,机器人技术研究的重点转向智能机器人研究领域,人们期望尽快研制出能够取代人完成各种任务的全自主式智能机器人.

20 世纪 80 年代末到 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人们预期的目标,机器人领域专家对智能机器人的研究进行了深刻的反思. 反思结果表明,由于受到机构、控制、人工智能和传感技术水平的限制,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[2-5].

但是,随着原子能技术、空间技术及海洋探索技术的发展,迫切

需要大量工作在危险或有害环境下的高级机器人[6]. 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[7]. 因此,工作在人与机器人交互方式下的遥操作机器人技术在20世纪90年代中期开始受到人们的广泛关注和研究[8-9].

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,而后者的意义在于可用机器人去实现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(Telepresence)技术是人机交互遥操作的核心[10].

临场感在美国和欧洲机器人界称为"Telepresence"[11-12],在日本机器人界称为"Tele-existence"[13-14],其概念可以回溯到1965年Sutherland的思想,即把计算机显示器作为看、听、触以及人与真实世界相互作用的窗口. 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再现(远地场景再现),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"在意义上侧重于操作者在远地环境中的替身存在(人在远地存在),即由类人型机器人成为操作者在远地的替身. 虽然两者的侧重点不同,但其本质和概念是一致的,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以及两者的交互信息(包括视觉、听觉、力觉、触觉等的信息)实时地检测并反馈到本地,生成关于远地环境映射的虚拟现环境,从而以自然和真实的方式直接反馈给操作者的感觉器官,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可以看作是主从式遥控机器人(Master-Slave Telerobot)的一种发展,可称之为临场感遥操作机器人系统(Telepresence Telerobot),或临场感遥控作业系统(Telepresence Teleoperation System),是一种人在回路(Human in the Loop)的复杂人机耦合系统[15].

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、军事战场和反恐安保等领域.

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、法、英等发达国家竞相投入大量的人力、物力和财力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[16-18]等. 从20世纪90年代初开始,美国NASA针对空间遥操作机器人关键技术进行了深入研究[19],日本也制订了一项为期8年的国家高级机器人研究计划来实现临场感遥操作机器人系统[20],德国针对空间机器人的应用开展空间遥操作机器人ROTEX研究计划[21].

我国从1992年开始研究临场感遥操作机器人技术,国家863计划中自动化领域机器人技术主题以及航空航天领域空间机器人技术专题分别于1992年和1996年将临场感遥操作机器人技术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研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、北京航空航天大学、国防科技大学以及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基础理论与关键技术的研究工作. 中国空间技术研究院、上海航天局805所、哈尔滨工业大学、东南大学和清华大学等单位针对我国载人航天工程与探月工程的需要,积极开展空间遥操作机器人技术的研究.

## 2 临场感技术的分类与临场感遥操作机器人系统的组成

临场感主要可分为力觉临场感(Force Telepresence)、触觉临场感(Tactile Telepresence)、视觉临场感(Visual Telepresence)、听觉临场感(Audio Telepresence)、嗅觉临场感(Smell Telepresence)与味觉临场感(Taste Telepresence)等多种形式,在遥操作机器人技术中主要研究力觉临场感、触觉临场感、视觉临场感、听觉临场感. 一般将力觉临场感与触觉临场感统称为力觉临场感或力触觉临场感(Haptic Telepresence),将视觉临场感、听觉临场感统称为视听觉临场感.

力觉临场感作为临场感的主要形式之一,在实

际应用中总是和视觉临场感(或视觉辅助显示装置)共同构成临场感遥操作机器人系统不可缺少的两部分,因此,在讨论力觉临场感遥操作机器人系统的组成时,一般都指临场感遥操作机器人系统的组成.

理想的临场感状态下,操作者和机器人之间是一种等效的关系,即远地环境和本地工作站实现了空间和时间上的统一,机器人就是操作者的"化身",操作者就是远地现场的机器人.临场感遥操作机器人系统对操作者和环境来说应该是完全透明的,不存在任何阻碍.由于临场感这种概念要以完美的方式来实现,难度是很大的.经过10多年的研究与总结,人们对如何实现临场感遥操作机器人系统尚存在一些不同的看法,主要是:1)人类需要多少种感觉反馈才能获得远地现场的沉浸感与临场感;2)这种感觉反馈是否必须以1∶1的比例和同种方式实现.

临场感概念的提出者之一,日本著名机器人专家Tachi较早地构造了临场感遥操作机器人系统实验装置来验证这一概念[22].经过实验研究后,他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.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,包括人体的头、臂、手指和眼球的运动;

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)由远地机器人各种传感器信息重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2所示.

对于力触觉临场感遥操机器人系统而言,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、力反馈单元以及触觉再现单元,如图3所示.

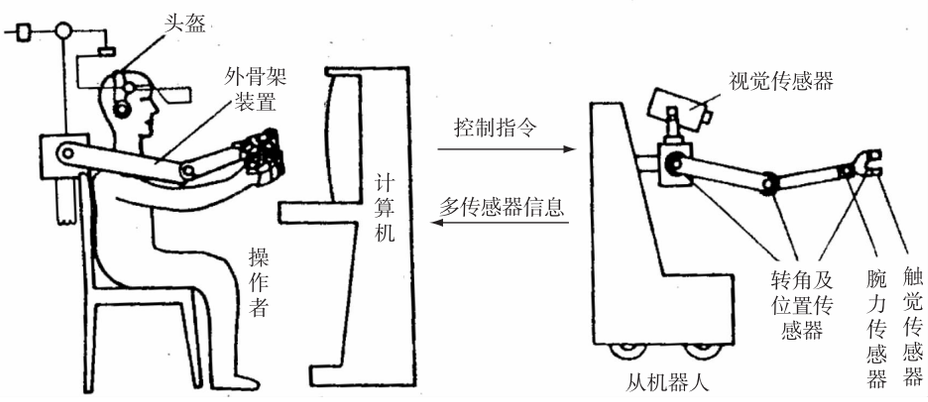



图2 临场感遥操作机器人系统的组成

Fig.2 Architecture of telepresence telerobot system

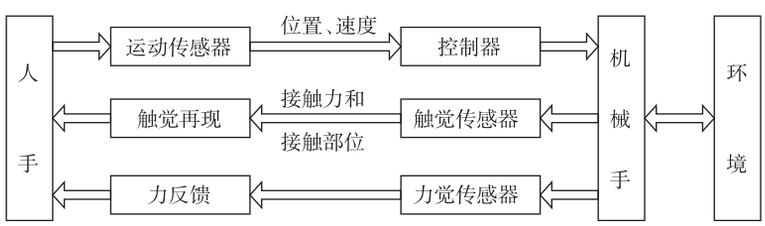



图3 力触觉临场感机器人系统的功能单元

Fig.3 Functional units of force telepresence telerobot system

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,使之具有适合人手的精巧结构[23-24].

力觉临场感遥操作机器人技术涉及到传感技术、信号处理、通信与网络技术、控制技术、机构学、计算机技术等多个学科. 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 4 大关键技术.

## 3 临场感遥操作机器人技术在主要应用领域的发展情况

### 3.1 临场感遥操作机器人技术在原子能领域的发展

遥操作机器人的研究有着极其重要的现实意义,因为很多尖端的领域都对该项技术有着迫切的需求. 遥操作机器人系统最初是由原子能应用的需要而开发出来的,所以在原子能领域有很多得到实际应用的遥操作机器人系统. 1982 年,美国中央研究实验室(Central Research Laboratory)设计并建造了被称为 M2 的工程样机,这是第一套可以实现力反馈的主从遥操作机器人系统,如图 4 所示[25]. 该力反馈主从遥操作机器人系统随后由美国橡树岭国

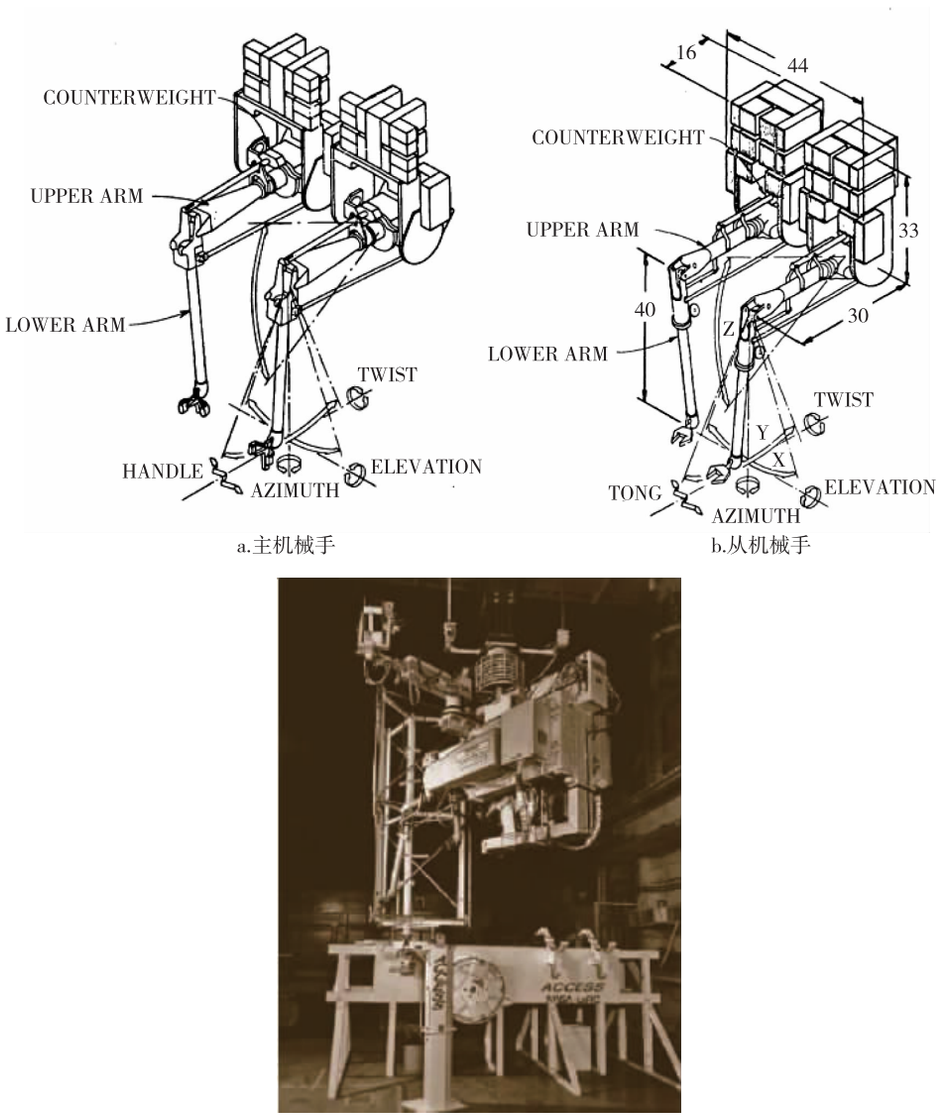



图 4 美国中央研究实验室研制的 M2 力反馈主从遥操作机器人系统

Fig. 4 M2 force feedback master-slave telerobot systems developed by Central Research Laboratory of USA

家实验室继续进行工程化开发,用于美国的原子能领域.同样也是核能应用的需要,1985 年,法国原子能委员会的 Vertut 所带领的团队开发了一套力反馈遥操作机器人系统,其中加入了计算机辅助图像管理功能,大大提高了遥操作效率.

### 3.2 临场感遥操作机器人技术在空间探索领域的发展

空间探索对机器人技术的需求也是推动临场感遥操作机器人发展的主要动力,月球、火星、小行星探测以及空间站的维护与科学实验任务需要开发大量的遥操作机器人.早在 1993 年,美国 NASA 就开始针对空间作业任务研制出了具有初步临场感效果的遥操作机器人 FTS 系统和 DTF-1 系统,并将其载入航天飞机中[26].1994 年,美国 NASA 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory)的 Bejczy[27] 针对空间遥操作机器人的地面控制研制了一种异构式的 6 自由度力反馈遥操作机器人手控器,用来实现空间机器人的遥操作.在这项研究中,异构式机器人手控器系统第一次被使用,它是使用笛卡尔空间中的变量进行控制的,图 5 为使用这种异构式力反馈手控器的空间遥操作机器人地面控制站.

1993 年,德国宇航中心 DLR 研制的空间机器人 ROTEX 首次在哥伦比亚航天飞机上进行了太空飞行实验.ROTEX 由多传感器的遥操作机器人和 6 自由度手套式人机接口以及具有预见显示能力的三维虚拟环境图像系统构成,如图 6 所示[28].

图 5 美国 NASA 基于异构式力反馈手控器的空间遥操作机器人地面控制站

Fig. 5 Ground control station of NASA space teleoperator based on different structure force reflecting hand controller

日本也在加紧研制空间站内外用的遥操作机器人系统,并于 2000 年发射了 ETS-VII 型搭载了空间机器人的卫星,并进行了初步的遥操作的实验.2002 年和 2007 年先后与德国宇航中心 DLR 合作在 ETS-VII 上完成了遥操作实验任务以及抓取漂浮卫星的实验,如图 7 所示[29-30].

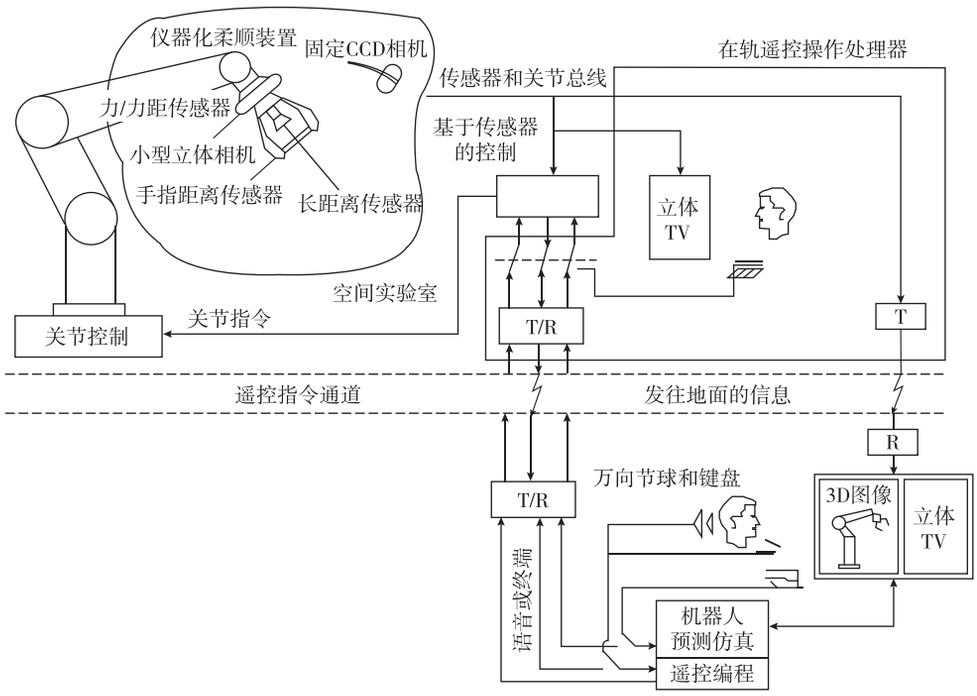



图 6 德国 DLR 研制的空间机器人 ROTEX

Fig. 6 Space robot ROTEX developed by DLR of Germany

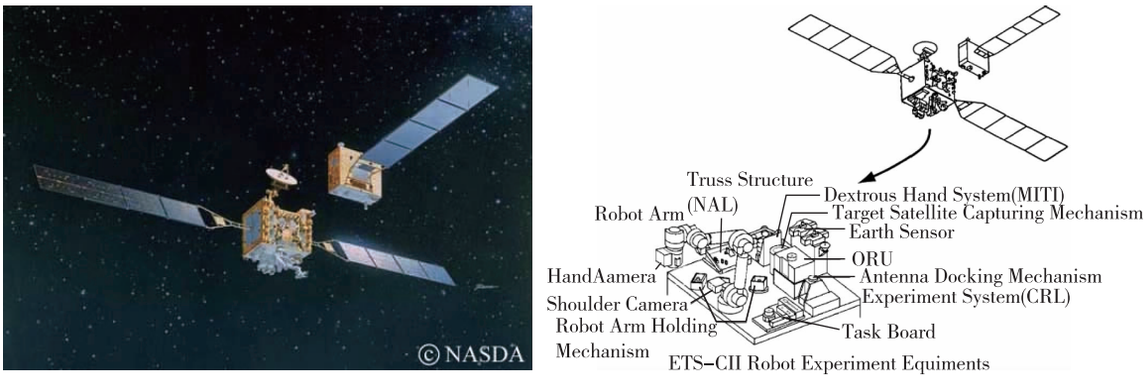



图 7　日本研制的 ETS-VII 卫星搭载遥操作机器人系统

Fig. 7　The ETS-VII satellite telerobot system developed by Japan

NASA 自 2000 年开始研制机器人宇航员(Robonaut),以减少宇航员的舱外活动,并在地面模拟零重力途径进行了大量的实验. Robonaut 可以在航天飞机不能到达的地方帮助装配和服务在轨的空间科学卫星,或在航天飞机上长时间处于载荷状态. NASA 于 2004 年开始将机器人宇航员安装在漫游者上进行遥操作的地面试验,2011 年 2 月由"发现号"航天飞机送达空间站,并在空间站上开始正式使用,如图 8 所示[31-32].

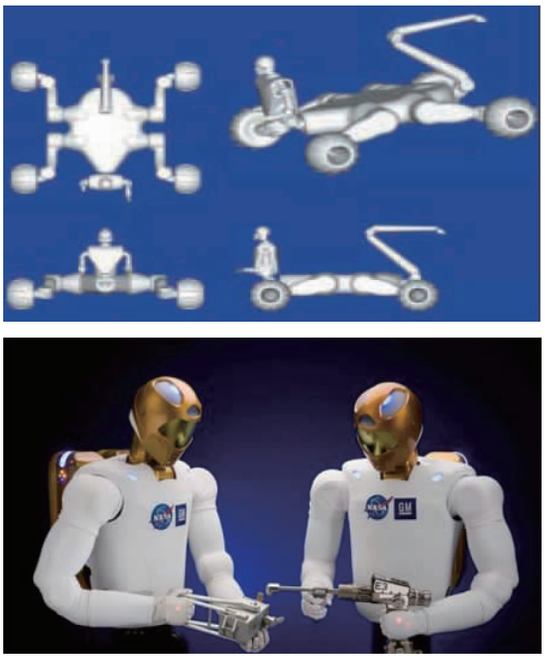


图 8　美国 NASA 研制的空间站在轨遥操作机器人宇航员

Fig. 8　NASA/DARPA robonaut systems

### 3.3　临场感遥操作机器人技术在医疗领域的发展

在医疗领域,远程手术和机器人手术成为近年来的研究和应用的热点. 世界上第一个远程手术是 2001 年在美国和法国之间完成的,一套名为 ZEUS 的系统由美国的医生操作,为远在法国的一个病人实施了腹腔镜胆囊切除手术[33]. 该手术是通过视觉反馈完成的,没有使用力反馈.

将力反馈遥操作机器人引入医疗应用的是在微创手术领域. 微创手术是在病人身体上开一个很小的切口,将很细的微创遥操作机器人系统中的从边部分插入病人体内进行手术. 与传统手术相比,降低了病人身体组织的损伤,极大地减少了病人的痛苦,而力反馈技术为操作手术的医生提供了临场感,为手术的安全性提供了保障[34]. 达芬奇系统是由美国 Intuitive Surgical 公司开发的遥操作机器人手术系统,是目前最为成功的商业化的医疗遥操作机器人系统,如图 9 所示.

图 9　达芬奇医疗遥操作机器人系统

Fig. 9　Da Vinci surgery telerobot system

## 4　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.

### 4.1 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(Exoskeletal 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来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5种商品化的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10)是外骨架装置的典型代表[35],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,它具有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作成手套形状,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,这种传感器非常柔软、细小,对弯曲产生的阻力可以忽略不计.Immersion公司的Data/Cyber Glove(图11a)具有18或22个角度传感器,分辨率为0.5°,质量仅84 g,5DT公司的Data Glove(图11b)具有14个传感器,分辨率为0.1°,质量300 g.日本Mattel公司的Power Glove(图11c)采用塑料电位计式传感器测量关节角度.

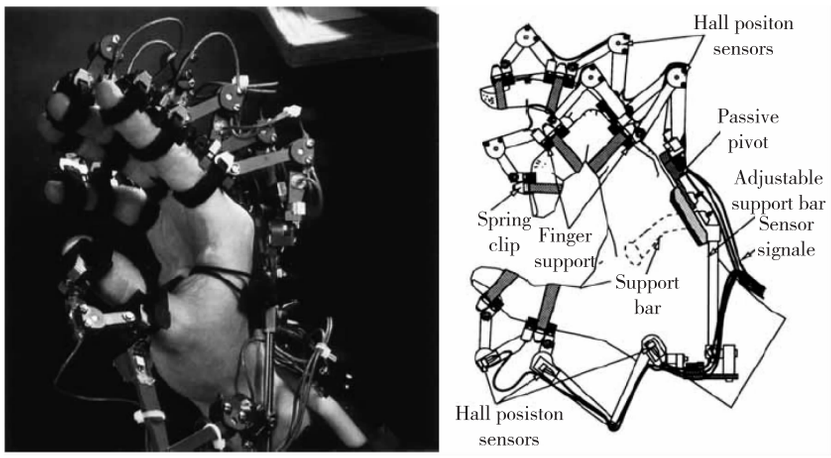
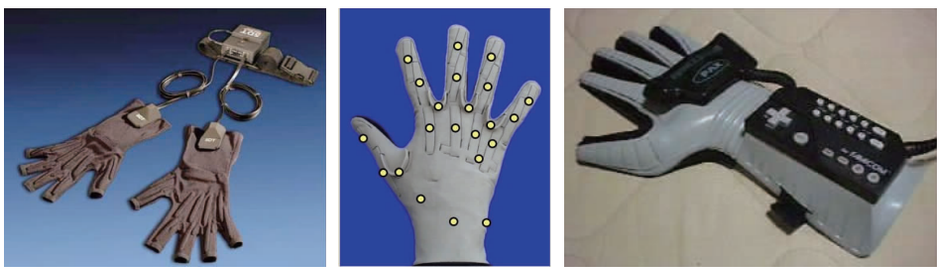



图10 EXOS公司的Dexterous Hand Master

Fig.10 The EXOS Dexterous Hand Master



a.5DT公司Data Glove b.Immersion公司Data Glove c.Mattel公司Power Glove

图11 几种常见的数据手套

Fig.11 Several commercial data gloves

### 4.2 机器人与环境交互感知的非视觉传感技术

机器人与环境交互感知的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遥操作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、温度等各种刺激.

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[36],如图 12 所示. 国内外代表性的产品为美国 JR3 公司和 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研究所和东南大学仪器科学与工程学院联合研制的 SAFMS 型机器人六维腕力传感器[37-39].

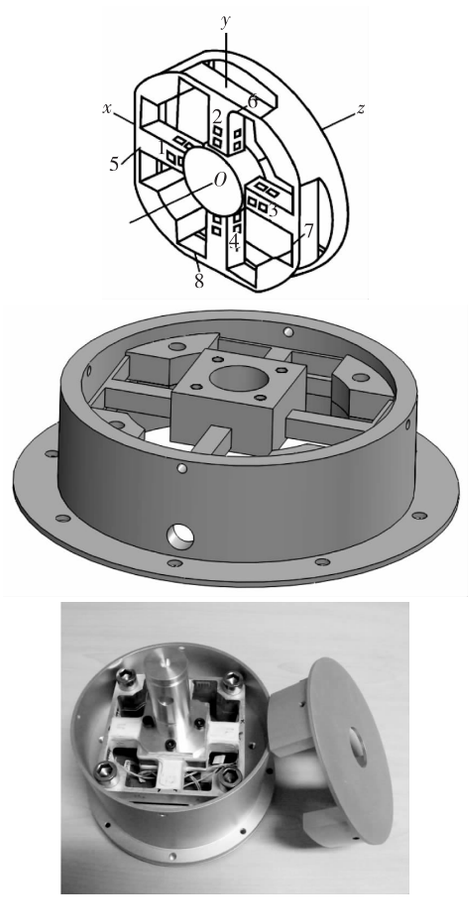



图 12 机器人六维腕力传感器的十字梁型弹性体结构
Fig. 12 The cross-beam elastic body of 6-axis wrist force/torque sensor

机器人六维腕力传感器影响人机交互精度的主要问题是惯性力的影响严重、动态频率低、维间干扰较大以及体积大.

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

2) 机器人触觉传感器

目前研究较多的是光电式、压电式以及半导体电容式阵列触觉传感器. 大多数触觉传感器仍长期停留在对法向力的检测上,三维触觉传感器虽取得一定进展,但是其一致性和维间干扰仍难以完全解决.

在力觉临场感遥操作机器人中迫切要求触觉传感器体积小、分辨率高、一致性好、维间干扰小.

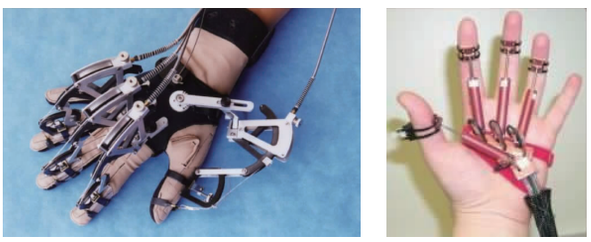
## 5 临场感遥操作机器人的力/触觉再现技术

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或虚拟物体对操作者的作用力. 触觉再现将远距离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或虚拟物体的触觉感觉.

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 13a),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 13b)采用气体泵来产生力觉反馈.



a.Immersion公司的MasterARM　　b.美国Rutger大学的力反馈数据手套

图 13 力反馈数据手套
Fig. 13 Force feedback data gloves

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) 操作者手臂运动的测量,并将对人手的测量结果作为从机械手运动指令;2)对操作者手部产生和从机械手与环境之间作用力一样大小的力. 手控器分同构式和异构式 2 种,异构式手控器是当今遥操作系统中手控器的主流.

图 14 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手控器,已经有多种形式,它的各个关节是串联的,是一种串联机构手控器. 它的重要特点是其结构上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,手控器的着眼点是测量人手臂关节的运动,同时将反馈力分别作用在人的臂、腕、手指关节上.

图 14　美国 Utah 大学研制的外骨架式手控器
Fig. 14　The UTAH/MIT exoskeleton hand controller

美国 NASA 针对空间机器人遥操作的需要,于 1988 年研制了著名的 Salisbury/JPL 手控器,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 15 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 16 所示. 日本针对卫星搭载空间机器人的遥操作研制了基于 Delta 并联机构的 6 自由度力反馈手控器用于 ETS-VII 卫星上的机器人遥操作,具有较大的工作空间、较好的力反馈且结构简洁.

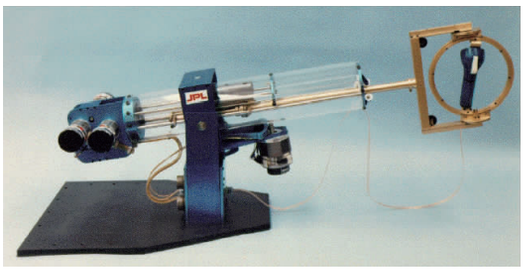


图 15　美国 NASA 的 Salisbury/JPL 力反馈手控器
Fig. 15　NASA Salisbury/JPL hand controller

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. 图 18 为 2 种同构式的 6 自由度力反馈手控器. 图 18a 为 1997 年研制用于空间舱内机器人遥操作的 6 自由度同构式力反馈手控器;图 18b 为 1999 年

图 16　加拿大研制的三维力反馈手控器
Fig. 16　3-Dimensional force reflecting hand controller developed by Canada

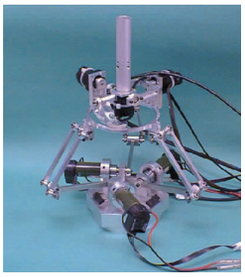


图 17　日本研制的 6 自由度力反馈手控器
Fig. 17　6-DOF force reflecting hand controller developed by Japan

研制的用于远程共享实验室机器人遥操作的 6 自由度同构式力反馈手控器. 图 19 为 2 种异构式的 6 自由度力反馈手控器. 图 19a 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 19b 为 2011 年针对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.

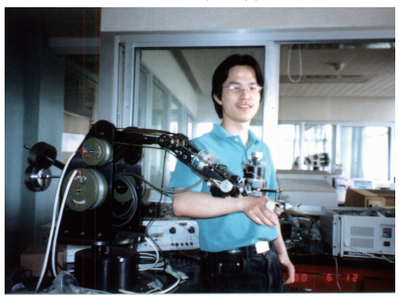
2) 触觉再现技术及装置

触觉再现是指安装在操作者手上的触觉再现设备接受远地机械手上的触觉传感器输出的机械手与物体相接触的信号,或者是虚拟环境中虚拟手与虚拟对象的接触信号,刺激人体的相应部位,从而再现远地机械手与物体或虚拟环境中的接触力和接触形状.

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,是最能体现触觉特性的方式. 形状改变式触觉再现早期是采用气囊、气环制作的,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

a.1997年研制

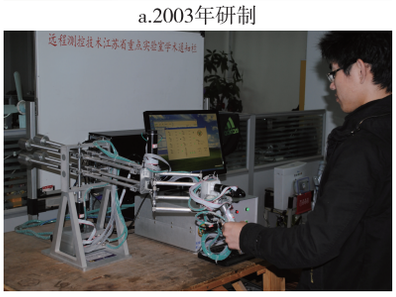


b.1999年研制

图 18　东南大学研制的同构式力反馈手控器

Fig. 18　Similar structure force-reflecting hand controllers developed by Southeast University

a.2003年研制



b.2011年研制

图 19　东南大学研制的异构式力反馈手控器

Fig. 19　Different structure force-reflecting hand controllers developed by Southeast University

够大致感觉到远地物体的接触部位和形状. Immersion 公司在数据手套上安装多个震动元件,构成振动刺激式触觉反馈手套 Cyber Touch,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,如图 20 所示. 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,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,但是这种装置需要施加 2 000 V 或更高的工作电压.

图 20　Immersion 公司的振动式触觉手套 Cyber Touch

Fig. 20　Vibration tactile glove Cyber Touch developed by Immersion Co.

图 21　Tini Alloy 公司的阵列触觉显示器

Fig. 21　Array tactile display developed by Tini Alloy Co.

表面刺激式触觉再现是通过对操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接触觉,从而实现触觉再现[40]. 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,如触觉反馈数据手套 Cyber Touch 就采用了振动音圈作为触觉显示器件,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,其空间分辨率为 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 的电压时,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.电刺激方法与人类的神经感觉系统密切相关,而人类对于自身的神经系统了解有限,且神经肌肉刺激探针需要刺人人体,使这些电刺激方法的应用受到极大限制.

东南大学宋爱国所领导的团队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[41],如图 22a 所示;2006 年研制了一种基于运动控制的纹理触觉再现装置[42],如图 22b 所示;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[43],如图 22c 所示.

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.

## 6 力觉临场感遥操作机器人的大时延控制技术

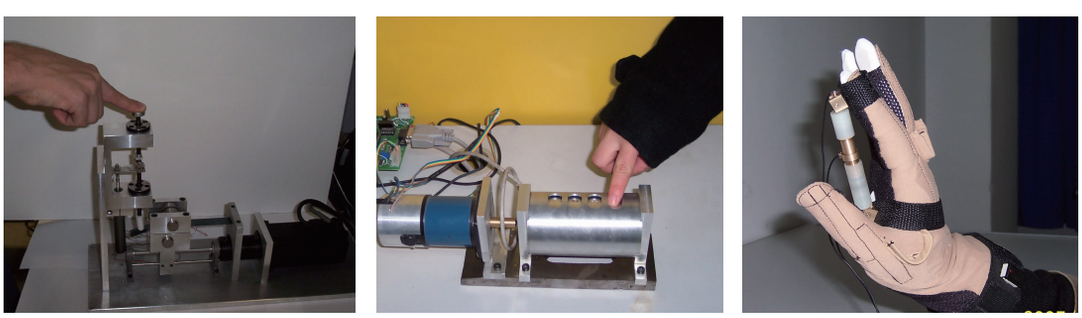
时延问题是力觉临场感遥操作机器人控制所面临的最主要问题.时延造成了力觉临场感遥操作机器人的不稳定和难以操作.

1988 年,Raju[44]首先提出用二端口网络理论来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.1989 年 Anderson 等[45]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[46]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[47]对存在通信时延的遥控作业系统采用上述的无源控制算法进行了实验研究,实验结果表明,2 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,但会造成力反馈的失真,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 等[48]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.1999 年,美国密执根州立大学席宁等[49]针对力反馈遥操作机器人的信号传输环节所引起的不确定时延问题,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[50]通过频域优化技术,提出了阻抗匹配滤波器设计,以保证遥操作系统的无源性和透明性.2008 年东南大学李会军等[51]提出了基于操作对象等效阻抗在线估计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.2012 年宋爱国等[52]又将基于操作对象等效阻抗在线估计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.

下面对一些典型的力反馈遥操作机器人系统的时延控制方法进行简要介绍.

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,其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.而且,该类方法是对时延无关的,即在任意时延条件下系统都是稳定的[53].基于无源理论的方法是目前遥操作机器人领域最有活力的发展方向,也是本文的理论基础,在后面的章节



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 22　东南大学研制的多种触觉再现装置

Fig. 22　Several haptic devices developed by Southeast University

中将会有更为详细的介绍.

2）基于事件的控制方法

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,各个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,如果各个部件不使用时间作为参数,则将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来描述的,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来模型化系统与运动轨迹. 这些非时间参数被称作运动参数,通常用 $s$ 表示,并把它称作基于事件的运动参数. 基于事件的控制和规划方法原理如图 23 所示[54].

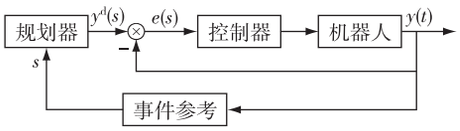



图 23　时延力反馈遥操作机器人基于事件的控制方法

Fig. 23　Event based control method for force feedback telerobot with time delay

图 23 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延力反馈遥操作机器人系统的稳定性. 基于事件的参数是一个时间的非递减函数,该方法稳定性的证明是独立于特定操作者的,并且满足时延统计特征,它适用于非结构化环境的大范围多种类型的遥操作作业系统. 美国密歇根州立大学的 Elhajj 等[55]证明了基于事件方法能够保证系统的透明性和同步性. 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 $H_\infty$ 理论的控制方法

利用 $H_\infty$ 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[56].

1995 年 Leung 等[57]将通信时延建模为系统扰动,并根据 $\mu$ 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[58]对力反馈双向遥操作机器人系统提出了统一的 $H_\infty$ 控制框架,以取得稳定性和透明性之间的平衡. 2008 年,Razi 等[59]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,但是,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,$H_\infty$ 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.

4）基于 Lyapunov-like 函数的控制方法

对于网络遥操作机器人系统来说,也可以利用 Lyapunov-Krasovski 或 Lyapunov-Razumikhin 函数进行控制器设计,借助 Lyapunov 稳定性理论,可以得到遥操作机器人系统与时延有关或与时延无关的稳定控制[60]. 利用 Razu-mikhin-type 定理,对于具有随机变化时延的系统,可以得到其稳定性代数判据. 但这类方法得到的分析结果和频域分析相比往往具有较大的保守性,而且虽然借助于这类 Lyapunov-like 函数的方法可以实现稳定性和操作性兼顾的控制效果,但一般都要求知道时延的上界,甚至时延的变化率,所得判据也只是个充分条件. 而且,该方法只能适用于时延固定的力反馈遥操作机器人系统.

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,因为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(7 s 以上)或空间工作环境变化的情况. 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.

## 7　力觉临场感遥操作机器人的虚拟预测环境建模技术

虚拟现实(Virtual Reality,VR)技术是解决大时延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 针对空间遥控作业在预测显示及虚拟工作环境方面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"[61],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 KMS 实验室设计了"遥操作机器人环境模拟器"(GLETS)"[62],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 中就包括了具有时延情况下预测机器人状态能力的计算三维图像和立体显示算法.

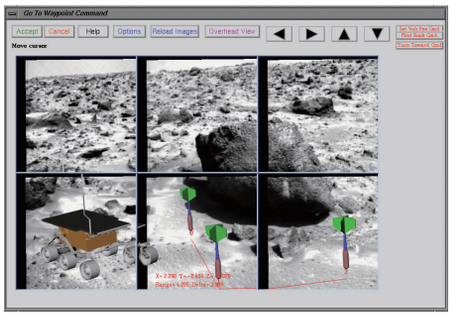
这种具有预测显示功能的虚拟环境技术,除了用于克服通信时延的影响,还可以用于训练操作者对机器人进行遥操作.

虚拟现实技术用于大时延遥操作机器人的一个典型的例子是火星探测机器人(图 24)[63]. 1997 年 7 月,基于虚拟现实技术控制的旅行者号火星探测器在火星上着陆. 它的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.

日本空间局 NASDA 于 2002—2007 年在 ETS-VII 卫星上完成的基于虚拟预测环境的遥操作机器人实验任务,如图 25 所示. 整个系统包括带力反馈的主手(操纵杆),实际卫星搭载机器人及其作业环境,虚拟卫星搭载机器人及其虚拟作业环境构成的虚拟预测环境,以及通信环节. 虚拟机器人作为虚拟环境的一部分,和真实的机器人一样运动. 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 26 为东南大学所建立的空间单自由度遥操作机器人的虚拟预测环境. 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

a.实际rover机器人在火星上的图片




b.地面建立的机器人rover的虚拟环境

图 24　基于 VR 的遥操作火星机器人系统

Fig. 24　Mars telerobot system based on VR

图 25　ETS-VII 的地面设备和预测虚拟环境

Fig. 25　Ground equipment and virtual prediction environment of ETS-VII

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,并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以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[64].

图 26　虚拟预测图形与真实图像的叠加
Fig. 26　Superposition of virtual prediction graphics and real image

尽管基于虚拟预测环境的遥操作技术是解决大时延问题的有力手段,但目前仍然存在一些难题,主要有:

1）基于图形图像叠加的增强现实,尽管能在双目视觉、透视和大小上保证和真实图像一致,但一些深度信息不能完全和真实图像完全匹配;

2）预测模型并不总是准确的,但缺乏足够有效的方法来在线修正模型.

## 8　东南大学的研究进展

东南大学仪器科学与工程学院机器人传感与控制研究所自“七五”以来一直从事机器人传感和控制技术的研究工作,先后完成了国家“863”高技术自动化领域智能机器人技术主题项目和国家“863”高技术航天领域空间机器人专题项目 23 项,完成国家自然科学基金项目 20 多项. 通过近 20 多年的长期研究,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. 在基础研究与关键技术取得进展的同时,也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理领域. 下面将简要介绍东南大学将力觉临场感遥操作机器人技术在几个领域中应用的情况[65-74].

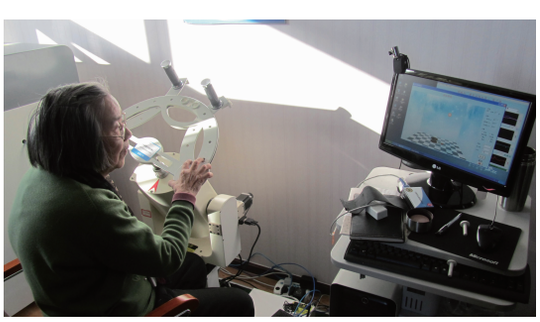
### 8.1　远程康复医疗机器人

我国是世界上残障者最多的国家,全国残障者总数约 6 700 万. 此外,全国 60 岁以上的老年人口也有较大的增长,2010 年老年人口超过 2 亿. 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 27 为东南大学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 个功能患者的康复训练过程.

### 8.2　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. 我国目前有各类核辐射源,使用单位上千家,而且大部分都位于经济发达的人口稠密地区,一旦受到袭击所引发的核放射次生灾害将会造成巨大的人员伤亡和长达几十年的持续性辐射危害. 近 10 年来,疆独、藏独等恐怖势力多次威胁要对我国进行包括核生化袭击在内的恐怖袭击,仅在 2008 年北京



a.康复训练者与健康机器人

b.康复治疗师端控制界面

图 27　东南大学研制的网络化远程力觉辅助康复训练机器人
Fig. 27　Networked telerehabilitation training robot developed by Southeast University

奥运会期间,疆独和藏独恐怖组织被挫败的恐怖袭击就有 8 起. 另一方面,我国核电事业也处于快速发展期,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 9 级大地震及其引发的海啸对日本福岛核电站造成了严重的破坏,由此而产生的核泄漏至少影响了日本近 1/4 的地区,1/5 的人口面临长期核辐射的威胁,成为继美国三里岛和苏联切尔诺贝利核泄漏事故后全球最严重的核事故,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,是核化事故应急处置的"重中之重". 由于核泄漏区域中强烈的核辐照水平,使进入其间的探测人员面临巨大的生命威胁,因此现场探测也成为核化应急处置的"难中之难". 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,但是这种有效载荷大、运行时间长、通信距离远、适应各种复杂危险环境并可上下楼的小型机器人一直是国内外机器人研究领域具有挑战性的难题.

从 2004 年开始,东南大学和南京军区防化研究所及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侦察和应急处理领域,研制成功了小型核化探测与应急处置遥操作机器人(图 28),并装备部队使用.

研制的小型核化探测遥操作机器人能够在战场或发生核生化灾害的事故现场代替士兵完成诸如侦查、取样等任务,提高战场侦察和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.

## 9 今后的发展重点

由于力觉临场感遥操作机器人涉及学科广,技术高度集成,系统复杂性强,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

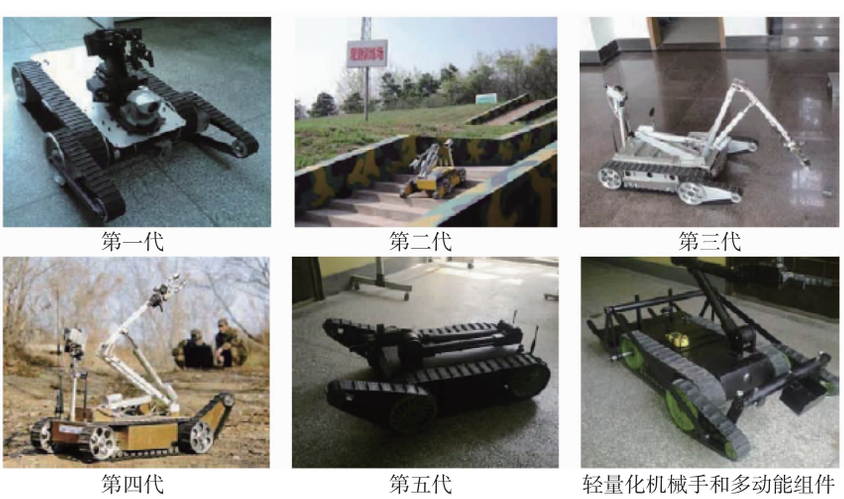



图 28 东南大学研制的小型核化探测与应急处置遥操作机器人系列

Fig. 28 A series of small nuclear detection and emergency response telerobot developed by Southeast University

大的通信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) 由于机械手和人手结构及柔韧性上的差异,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,以及适合于人的力反馈与触觉再现人机交互装置.

## 10 结束语

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研究所近 20 年来开展力觉临场感遥操作机器人技术研究及应用的情况. 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需要研究的几个重点问题.

## 参考文献
References

[1] Goertz R. Mechanical master-slave manipulator[J]. Nucleonics,1954,12(11):45-46

[2] Teoh W,Ziemke M C. Intelligent teleoperators-next generation robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems,Man,and Cybernetics,1988:113-116

[3] Fukuda T, Fujisawa Y, Arai H. Man-robot cooperation work type of manipulator[C]//Proceedings of 8th Annual Conference of Robotics Society of Japan, 1990: 555-656

[4] 张钹. 从完全自主走向交互技术:智能机器人研究的新动向[J]. 机器人情报,1992(1):1
ZHANG Bo. From full automation toward interactive technology:Intelligent robotics research and new trends[J]. Robot Information,1992(1):1

[5] 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

[6] Shioharo, Yoshikuni, Usui. Development of telerobotic manipulators for reactor dismantling work[J]. Advanced Robotics,1994,8(1):95-119

[7] Bejczy A K, Hannaford B. Man-machine interaction in space telerobotics[C]//Proceedings of International Symposium on Teleoperation and Control,1988:241-252

[8] Sheridan T B. Teleoperation, telerobotics and telepresence:A progress report[J]. Control Engineering Practice,1995,3(2):205-214

[9] 黄惟一,宋爱国. 力觉临场感遥控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
HUANG Weiyi,SONG Aiguo. The development of force telepresence teleoperation system's research[J]. Journal of Southeast University:Natural Science Edition,1995,25(4):112-119

[10] Anzaia Y. Human-robot-computer interaction:A new paradigm of research in robotics[J]. Advanced Robotics, 1993,8(4):357-369

[11] 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

[12] 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

[13] Tachi S, Arai H, Maeda T. Tele-existence master slave system for remote manipulation[C]//Proceedings of 29th IEEE Conference on Decision and Control,1990:85-90

[14] 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

[15] Chipalkatty R,Daepp H,Egerstedt M,et al. Human-in-the-Loop:MPC for shared control of a quadruped rescue robot[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011: 4556-4561

[16] Hasser C J,Daniels M W. Tactile feedback with adaptive controller for a force-reflecting haptic display. Ⅰ:Design [C]//Proceedings of the 1996 Fifteenth Southern Biomedical Engineering Conference,1996:526-529

[17] Maneewarn T,Hannaford B. Haptic feedback of kinematic conditioning for telerobotic applications[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,1998:1260-1265

[18] Pretlove J. Augmenting reality for telerobotics:Unifying real and virtual worlds[J]. Industrial Robot,1998,25 (6):401-409

[19] Kalaycioglu S,Seifu S. Ground-based control of space station freedom-based robots[C]//Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation,1992:2796-2798

[20] 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

[21] 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

[22] Tachi S. Tele-existence [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1992, 4(1):7-12

[23] 宋爱国,力觉临场感的理论与实验研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,1996
SONG Aiguo. Theoretical and experimental research on force telepresence [D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 1996

[24] 宋爱国,黄惟一. 临场感遥控作业系统的发展[J]. 高技术通讯,1996,6(6):57-61
SONG Aiguo, HUANG Weiyi. The development of telepresence teleoperation system [J]. High Technology Letters, 1996, 6(6):57-61

[25] Herndon J N, Martin H L, Satterlee P E, et al. State-of-the-art model M-2 maintenance system[C]//American Nuclear Society Topical meeting on robotics and Remote Handling in Hostile Environments, 1984

[26] Putz P, Colombina G, Depeuter W E. A robot-based equipment manipulation and transportation system for the columbus free flying laboratory[J]. Acta Astronautica, 1993, 29(3):205-211

[27] Bejczy A K. Towards advanced teleoperation in space [J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1994: 107-138

[28] 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

[29] Yoshida K. Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: Theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(5):321-335

[30] Nishida S I, Yoshikawa T. A robotic small satellite for space debris capture[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2008:1348-1353

[31] Diftler M A, Ambrose R O, Goza S M. Robonaut mobile autonomy: Initial experiments[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:1425-1430

[32] Diftler M A, Ahlstrom T D, Ambrose R O, et al. Robonaut 2-Initial activities on-board the ISS[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2012

[33] Marescaux J, Leroy J, Rubino F, et al. Transcontinental robot assisted remote telesurgery: Feasibility and potential applications[J]. Anniversary Surgery, 2002, 235(4): 487-492

[34] Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: From AESOP (R) and ZEUS (R) to da Vinci (R)[J]. Journal of Visceral Surgery, 2011, 148(5):E3-E8

[35] Omar S I, Hernandez A, McLauchlan R, et al. An approach for the teleoperator control of the Stanford/JPL Dexterous Hand[C]//Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1997:4303-4308

[36] Perry D M. Multi-axis force and torque sensing[J]. Sensor Review, 1997, 17(2):117-120

[37] Huang W Y, Jiang H M, Zhou H Q. Mechanical analysis of a novel 6-degree-of-freedom wrist force sensor[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 1993, 35(3):203-208

[38] 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,2003,16(3): 238-241
QIN Gang, CAO Xiaoying, SONG Aiguo, et al. Finite element analysis for elastic body of new 4-axis wrist force sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and actuators, 2003, 16 (3):238-241

[39] Song A G, Wu J, Qin G, et al. A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor[J]. Measurement, 2007, 40(9):883-891

[40] 胡文松. 力觉临场感时延稳定性研究及触觉再现装置的研制[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,1999
HU Wensong. Research on time delay stability of force telepresence and development on tactile reappearance equipment[D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 1999

[41] Song A G, Morris D, Colgate J E. Haptic telemanipulation of soft environment without direct force feedback[C]// Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition, 2005

[42] Chen X, Song A G, Li J Q. A new design of texture haptic display system[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, 2006: 1122-1126

[43] 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,2010,40(1): 123-127
DAI Jinqiao, WANG Aimin, SONG Aiguo, et al. Passive force actuator for force feedback dataglove[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(1):123-127

[44] Raju G. Design issue in 2-port networks models of bilateral remote manipulation[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1989, 34(3):1316-1321

[45] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperation with time delay[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1989, 34(3):494-503

[46] Niemeyer G, Slotine J J. Stable adaptive teleoperation [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16 (1):152-163

[47] 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, 1993:776-783

[48] 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

[49] Xi N, Tarn T J. Action synchronization and control of Internet based telerobotic systems [C] // Proceedings of

1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation,1999:219-214

[50] 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,2003:155-160

[51] 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

[52] Song A G,Pan L Z,Xu G Z,et al. Impedance identification and adaptive control of rehabilitation robot for upper limb passive training[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering,2012

[53] Arcara P,Melchiorri C. Control schemes for teleoperation with time delay:A comparative study[J]. Robotics and Autonomous Systems,2002,38(1):49-64

[54] Xi N,Tarn T J. Stability analysis of non-time referenced Internet-based telerobotic systems[J]. Robotics and Autonomous Systems,2000,32(2):173-178

[55] Elhajj I,Xi N,Fung W K,et al. Haptic information in Internet-based teleoperation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2001,6(3):295-304

[56] 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

[57] 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

[58] Yan J,Salcudean S E. Teleoperation controller design using $H_\infty$ optimation with application to motion-scaling [J]. IEEE Transactions on Control System and Technology,1996,4(3):244-258

[59] Razi K,YazdanPanah M J. Nonlinear $H_\infty$ control of a bilateral nonlinear teleoperation system[C]//Proceedings of the 17th IFAC World Congress,2008

[60] Gu K,Liu Y. Lyapunov-krasovskii functional for uniform stability of coupled differential-functional equations[J]. Automatica,2009,45(1):798-804

[61] Kim W. S,Bejczy A K. Graphics displays for operator aid in telemanipulation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation,1991:1059-1067

[62] Schebor F S,Turney J L. Realistic and consistent telerobotic simulation[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991:1059-1067

[63] Edwards L,Sims M,Kunz C,et al. Photo-realistic terrain modeling and visualization for Mars exploration rover science operations[C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2005:1389-1395

[64] 刘威. 基于虚拟现实的力觉临场感遥操作研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,2006
LIU Wei. Research of force reflecting teleoperation based on virtual reality[D]. Nanjing:School of Instrument Science and Engineering,Southeast University,2006

[65] 宋爱国,金世俊,黄惟一. 一种新的力反射遥控机器人系统的信号传输方法[J]. 机器人,1998,20(3):174-180
SONG Aiguo,JIN Shijun,HUANG Weiyi. A new signal transmission method for force reflecting telerobot system [J]. Robot,1998,20(3):174-180

[66] 陈辉,宋爱国,金世俊,等. 带有力觉和触觉临场感的灵巧手主从系统的设计[J]. 机器人,1998,20(6):437-441
CHEN Hui,SONG Aiguo,JIN Shijun,et al. Master and slave system design of a dexterous hand with force and tactile telepresence[J]. Robot,1998,20(6):437-441

[67] 胡文松,宋爱国,黄惟一. 基于随机共振的力觉临场感主从遥控系统[J]. 机器人,1999,21(3):210-216
HU Wensong,SONG Aiguo,HUANG Weiyi. An effective force telepresence system based on the model of stochastic resonance[J]. Robot,1999,21(3):210-216

[68] 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
TANG Hongru,SONG Aiguo,ZHANG Xiaobing. Mission execution mechanism of reconnaissance robot based on macro behavior[J]. Robot,2007,29(2):97-105

[69] 郭晏,包加桐,宋爱国,等. 基于地形预测与修正的搜救机器人可通过度[J]. 机器人,2009,31(5):445-452
GUO Yan,BAO Jiatong,SONG Aiguo,et al. Traversability for search and rescue robot based on terrain prediction and correction[J]. Robot,2009,31(5):445-452

[70] 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
GUO Yan,SONG Aiguo,BAO Jiatong,et al. Mobile robot traversability prediction based on differential evolution support vector machine [J]. Robot, 2011, 33 (3):258-272

[71] 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
XU Guozheng, SONG Aiguo, LI Huijun. Experimental study on fuzzy-logic-based impedance control for upper-limb rehabilitation robot [J]. Robot, 2010, 32 (6):792-798

[72] 潘礼正,宋爱国,徐国政,等. 上肢康复机器人实时安全控制[J]. 机器人,2012,34(2):197-210
PAN Lizheng,SONG Aiguo,XU Guozheng,et al. Real-time safety control of upper-limb rehabilitation robot[J]. Robot,2012,34(2):197-210

[73] 徐宝国,彭思,宋爱国. 基于运动想象脑电的上肢康复机器人[J]. 机器人,2011,33(3):307-313
XU Baoguo,PENG Si,SONG Aiguo. Upper-limb rehabilitation robot based on motor imagery EEG[J]. Robot, 2011,33(3):307-313

[74] 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人技术研究进展[J]. 机械制造与自动化,2012,41(1):1-5
SONG Aiguo. The development of force telepresence telerobot technique[J]. Jiangsu Machine Building & Automation,2012,41(1):1-5

[75] 李新. 力反馈遥操作机器人的双边控制方法研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,2012
LI Xin. Research on bilateral control for force feedback telerobot[D]. Nanjing:School of Instrument Science and Engineering,Southeast University,2012

[76] 李会军. 空间遥操作机器人虚拟预测环境建模技术研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,2005
LI Huijun. Research on predictive environment modeling for space tele-robot[D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering,Southeast University,2005

# Force Telepresence Telerobot(1): Review of the history and development

SONG Aiguo[1]

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

**Abstract** Human-robot interaction robot is currently the frontier and hotspot of the robotics research. While telepresence is core technique for the human-robot interaction. In this paper,we review the history of the telepresence telerobot technology,and illustrate its applications in areas of nuclear detection,space exploration,and tele-surgery. Then we analyze its four key techniques,namely sensing technique,force feedback and tactile display technique, control strategy under time delay,and modeling technique for virtual predictive environment. We briefly introduce the development of telepresence telerobot research and its applications in nuclear detection and rehabilitation therapy areas at Southeast University during the past two decades. At last,we point out the future research directions of the force telepresence telerobot.

**Key words** force telepresence;teleoperation;robot sensor;haptic display;time delay;control;virtual environment