

文章编号: 1002-0446(2003)05-0475-06

基于虚拟现实触觉感知接口技术的研究与进展*

岳 宏

(河北工业大学机器人及自动化研究所, 天津 300130)

摘 要: 基于虚拟现实触觉感知接口技术(Haptic Interface Technique)涉及的学科面很宽,包括机器人学、虚拟现实技术、仿生学、传感技术及互联网通讯技术等。触觉感知接口是基于虚拟现实机器人遥操作系统的重要组成部分。从广义角度出发,触觉感知(Haptic Sensing)应包括力/力矩觉(Force/Torque Sensing)和接触觉(Tactile or Touch Sensing)等主要感觉功能。这里将着重介绍触觉感知接口的研究意义与结构、用于触觉感知接口的特种驱动机构。最后,讨论触觉感知接口技术今后的研究与发展趋势。

关键词: 触觉感知接口;虚拟现实;遥操作;交互作用

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH AND PROGRESS OF HAPTIC INTERFACE TECHNIQUE BASED ON THE VIRTUAL REALITY

YUE Hong

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Haptic interface technique deals with a wide range of disciplines, including robotics, virtual reality, bionics, sensing technologies and internet communications etc. Haptic interface is important composition of robot teleoperation system based on the virtual reality. In a broad sense, haptic sensing must include force/torque sensing and touch or tactile sensing. This paper describes developing importance and the achievements of haptic interface as well as particular kind of actuators used in the haptic interface. Finally, the researching and developing tendency is also discussed.

Keywords: haptic interface; virtual reality; teleoperation; interaction

1 引言(Introduction)

当今,人类生存在计算机广泛应用于各种领域的时代。随着网络通讯技术和多媒体技术的迅速发展,因特网(Internet)向人类的工作、生活的各个层面不断地渗透,借助于仿真或虚拟现实 VR(Virtual Reality)作为媒体,实现用户与计算机的交互作用是一场深刻的技术变革^[1,2]。虚拟现实领域,无论在理论上,还是在技术上,甚至哲学上都涉及很多方方面面,虚拟现实已经成为一门艺术,是一种文化^[3]。虚拟现实技术将沉浸感(Immersion)、交互作用(Interaction)和想象力(Imagination)集成于一体。沉浸感可以使用户沉浸在一个虚拟环境中,产生一种亲临其境的临场感,其惟妙惟肖的逼真效果往往使人难以

对现实存在和虚拟存在之间做出区分。交互作用是用户直接参与系统运行过程中的操作,想象力则给予用户更加丰富的感受,启发思维,从理论和实践方面促进对系统的认识。因为虚拟现实技术提供出几种新的通讯形式集成的实时环境,它比其它形式的人-机交互作用更为优越。

诚然,充分发挥虚拟现实技术的全部潜能,扩展其实际应用领域,仍存在着一些有待解决的技术难题和障碍。首先涉及的是景物图象的复杂性,它影响着虚拟世界的视觉逼真度。目前,由于受到计算机数据处理功能的限制,常常迫使设计者不得不对视觉的逼真度作出一定的牺牲,从而影响仿真的逼真效果。仿真的逼真程度受到的另一个影响就是缺乏一

* 基金项目:国家自然科学基金资助(项目编号:69485007)。

收稿日期:2002-01-10

个实用的物理学仿真.从物理学仿真角度看,包括触觉(Tactile or Touch Sensing)和力觉(Force Sensing)的触觉感知(Haptic Sensing),在基于虚拟现实操作系统中是不可或缺的重要感觉.当前,虚拟环境中大多数数据信息是采用视觉传感器以及非接触型传感器(如超声测距传感器等)采集的.然而,实际工作中很多操作任务的信息要求具备敏捷的控制和接触感觉,例如遥操作系统的操作者需要具有交互作用的远处场景的感觉,即要求对物体轮廓表面及抓握力进行探测与感知;基于虚拟现实的外科手术训练中,手术刀端部对虚拟生理组织剖切力的测量,可以给受训人员提供触觉感知反馈等等.在虚拟环境中,由于缺乏触觉感知反馈(Haptic Feedback)手段,而使许许多多的信息源很难反馈和显示给异地的用户,从而难以实现更加全面的人-机交互作用.显而易见,没有基于虚拟现实的触觉感知反馈作用,就很难满足各种工程实际应用的要求.

触觉感知接口技术的研究引起许多研究者、开发商以及商品市场的极大关注.正如文献[3]指出,各种新技术的出现将会引起虚拟现实的革命性变化,如触觉学(研究接触感觉)领域内,研究人员正在探索如何将触觉感觉用于虚拟现实中.到目前为止,已有许多较为成功的仿真成果出现在各种应用领域,如远程外科手术^[4,5]与医疗专家,通过远程医疗诊断系统对偏远地区或紧急情况下的病人实施遥诊断和提出急救措施^[6,7]、虚拟环境下的军事训练^[8]以及基于 Internet 遥操作机器人系统^[9,10]与虚拟制造和技术协作^[11]等.这些不断涌现出来的研究和进展,正在世界范围内孕育着一个巨大的市场前景.

触觉感知接口技术涉及许多学科,如机器人学、仿生学、传感技术、虚拟现实技术以及网络通讯技术等.因而,它是多学科交叉、渗透和集成的一门技术.本文将介绍触觉感知接口技术的进展、触觉感知接口的结构以及用于触觉感知的特种驱动机构,并分析触觉感知接口今后的研究和发展趋势.

2 触觉感知接口的结构 (Architecture of haptic interface)

目前,关于触觉感知接口技术领域中的名词术语尚未完全统一.对于触觉感知接口(Haptic Interface)的含义与内容缺乏一致的认识.文献[12]指出,接触觉是由靠近皮肤的高带宽(50 Hz)的感受器感觉出与环境的接触,如对精细表面的几何形状、皱折、

表面温度以及滑动等的感知.力觉反馈则是由人体肌腱的低带宽感受器感觉的.尽管接触觉和力觉反馈在生理学、控制要求及功能等方面存在着一定的差异.但这些感受器能够提供出总接触力、抓握物体的几何形状和柔顺性及表面纹理状况.另外,Haptic一词源于希腊语 Haptesthai,其含义为触觉或触觉引起的.因此,笔者认为目前倾向一致的看法是,触觉感知接口是指将力觉和接触觉反馈给用户的一种感知反馈硬件,即包括力觉感知接口和接触觉感知接口.力觉感知接口可以感知力/力矩的作用,而接触觉感知则是皮肤通过接触受到外界环境的机械、热、化学或电刺激引起的一种感觉.因而接触觉感知接口可以直接获得接触表面几何形状与纹理、滑觉、痛觉和热觉等感知信息.下面分别讨论力觉感知接口和接触觉感知接口的结构.

2.1 力觉感知接口

大多数力觉感知接口可以按其安装方式和结构尺寸进行分类.根据安装方式可分为固定式和便携式两种.固定式力觉感知接口通常是以地面、天花板、座椅的扶手和墙壁作为支撑,承受整个接口装置的重量.这种力觉感知接口的优点是传动机构的重量与用户脱离而实现卸荷.它的缺点则是减少了用户运动的空间和仿真的逼真度.便携式力觉感知接口则指的是安装在用户身体(后背、手臂、胸前和手掌)上的一个驱动或感觉结构,以便能够给出更逼真的交互作用和尽可能大的工作空间.这种力觉感知接口的缺点是用户必须直接承受整个感知接口—外骨骼结构的重量,从而容易引起用户的疲劳和丧失平衡,甚至产生错误的感觉.为了防止用户在长时间仿真过程中产生疲劳,需要限制外骨骼系统的体积和重量,因此,这种便携式力觉感知接口的设计要求更高.目前现有的反馈驱动机构技术,由于在功率/重量比和功率/体积比方面都存在很大的不足,还难以满足便携式力觉感知接口的要求.所以,固定式力觉感知接口在虚拟环境中的运用更为普遍一些.眼下,便携式力觉感知接口的开发较少,仍是当前基于虚拟现实机器人遥操作系统领域急需大力开展研究的课题之一.便携式力觉感知接口可以按其机械固定的形式分成手臂外骨骼和手型主手.手臂外骨骼属于外部力反馈 EFF(External Force Feedback)系统,通常应用于伤残肢体的康复治疗中,固定在后背上的连接板或前臂上.相反地,手型主手是一种手的力反馈 HFF(Hand Force Feedback)系统,它固定在用户的腕部或手掌处,在操作任务仿真中,它是将力

作用于用户手上的力觉感知接口.在 VR 仿真中,它们的机能对 EFF 系统是一个补充,因为 HFF 系统的作用是将中等强度的力复现在手指上.当物体很重或有很大的碰撞力时,HFF 系统可以与整个反馈系统的元件一起工作,例如,将手型主手和接触觉感知系统集成在一起.这样,手臂外骨骼能够复现虚拟物体的重量,并且与手附近的其它环境接触.手型主手更适宜于灵巧操作以及虚拟环境的测定等.

目前,已开发的典型手臂外骨骼主要有 GLAD-IN-ART 手臂外骨骼,它由意大利、英国和爱尔兰等国家的学者共同研制^[13].这种手臂外骨骼具有 5 个自由度,整个装置的重量为 10 公斤.在控制上,针对重力和缆索摩擦力补偿的需要,采用的控制算法是基于 Transputer 的分布结构实现的,关节伺服回路的带宽为 1 KHz. EXOS 主手手臂与 GLAD-IN-ART 手臂外骨骼相似,但其重量较轻^[14].该接口的大部分重量作用在用户背部的连接板上,手臂结构的重量仅为 1.8 公斤.尽管如此,对于长时间仿真的用户来说,手臂的负担仍然是较为沉重的.

手型主手安装在用户的前臂或手掌上.典型的手型主手是美国 Rutgers 大学先后研制出的 Rutgers I 型和 Rutgers II 型便携式手型主手.它们被集成在一个基于分布式以太网(Ethernet)的仿真环境中.这种接口的特点是采用直接驱动方案,没有缆索和滑轮等中间传动,结构简单. Rutgers II 型应用玻璃-石墨结构的低摩擦气动驱动机构,其静摩擦力只有 0.05 N,大约为手指指端力的千分之三^[15,16].

为了满足微细机械零件的精密装配、微米级尺寸光导纤维的对接、显微外科手术以及生物工程显微操作的需要,微型和微动力觉感知接口不断地涌现出来.文[17]介绍了日本研制的六自由度串、并联混合型主手.它可实现三个自由度的平动和三个自由度的旋转运动.平动由改进的 Delta 机构完成,旋转运动则由 Delta 机构平台上的旋转机构实现.运动范围直径 75 mm 的球体空间,操作力为 10 N.芬兰坦佩勒工业大学开发了压电陶瓷驱动的三自由度微操作手,它在 X、Y、Z 三个方向的位移分别为 1.5 mm、0.6 mm 和 0.25 mm,分辨率小于 1 μm ^[18,19].南开大学研制了用于生物与医学工程中的微驱动机器人系统,实现显微镜下的转基因注射操作^[20].哈尔滨工业大学研制出六自由度并联微操作手,采用压电陶瓷驱动器实现驱动,可用于生物细胞操作^[21].

触觉感知接口的带宽是指感知接触觉和动觉刺激的频率,而控制带宽则是指人可以响应的快速性.

因此,触觉感知接口的带宽是影响整个控制系统响应特性的重要指标.关于触觉感知接口的带宽多大为宜,现有的说法仍然不一致. Rosenberg 推荐一个力反馈带宽至少应为 50 Hz^[22].然而,Howe 和 Kontarinis 指出,带宽有 8 Hz 就足够了,研究中他们使力反馈带宽增加到 32 Hz 也没有发现更好的效果^[23].由此可见,基于虚拟现实触觉感知接口技术还有许多尚需研究的问题.

2.2 接触觉感知接口

接触觉感知接口,通过接触觉传感器获取接触表面几何形状与纹理信息的反馈数据,对虚拟环境进行主动探测和灵巧操作是非常有利的.通常,它可以单独地使用或者集成在力觉反馈系统中.目前,人们在开发结构紧凑轻便、分辨率高及可靠耐用的接触觉传感器方面,作了许多有益的工作.

在表面纹理及几何形状反馈方面,接触觉数据的视觉显示(Visual display)是一种可行的方法.通过视觉显示可以实现抓握虚拟物体的交互作用,例如通过虚拟手指着色来观测抓握物体的接触位置和力的大小. G. Burdea 等人采用触觉手套诊断人手的疾病,并对其康复进行治疗^[24].这种可视接触觉显示方法的优点是简单可靠、不妨害用户、不会使用户产生麻木与疼痛等不适的感觉.缺点是缺乏直接的接触性感觉,另外,用户还必须具有足够的视野才能够观测到显示的接触觉数据.

根据上述人手的生理学特征,文献[25]提出了具有电容型接触觉传感器的机器人柔顺手指指端.它由带有条形导电橡胶(行电极)硅胶膜、填充电流变流体的聚胺脂泡沫垫及带有条形铜电极(列电极)印刷电路板组成.这种具有填充电流变流体聚胺脂泡沫垫的柔顺指端具有良好的机械阻抗及动态特性.它能在较小的接触力下产生较大的变形,从而,获取较多的接触信息量^[26].

C. Mavroidis 等人也利用电流变流体控制柔顺的触觉感知接口.这种接口系统是由备有一系列电气控制的刚性(DCS)元件的手套所组成^[27]. DCS 元件是一种装有电流变流体的微型液压缸,借助于活塞上的沟槽和在流过沟槽的电流变流体上施加电场来控制其通过流量,从而达到控制刚性的目的.

在 VR 模拟中,提供接触觉反馈的另一种方法是采用激励反馈,它可以作用于用户手指端部或某些局部空间.文献[28]介绍了遥操作系统中触觉反馈的具体实现形式,提出电刺激触觉反馈是一种较为可取的方法.这种反馈是将微型刺激电极安置于操

作者的手指上,借助于一定脉宽和频率的刺激脉冲和电流,使操作者获取接触的感知.电激励触觉反馈手套的脉冲频率和占空比对人体感受影响的研究结果表明^[29],当激励脉冲在 60 ~ 400 Hz 之间,占空比为 20 % 时正或负的单脉冲激励下,用户可以获得舒适和逼真的触觉感知.

文献[30]采用粘弹性弹簧和粘弹性阻尼并联结构,模拟虚拟传感器触元及与触元接触的物体表面的形变特性,构造了机器人虚拟触觉元件的仿真模型,为在虚拟环境中研究基于触觉信息机器人柔顺和精密操作提供了研究平台.

为了提供接触表面的几何形状信息,新型振动式触觉感知接口是采用形状记忆合金(SMM)微型针阵列驱动器实现的,它们在低频下进行振荡,获取空间离散化的信息^[31,32]. Aka matsu 等人将一个单独的微型针触觉驱动器集成在一个多模态鼠标中,用以改进图形用户的交互作用^[33].利用普通鼠标进行改装,一个由电磁铁驱动的铝针从鼠标一个按钮上的小孔伸出,铝针的运动行程只有 1 mm,频率为 80 Hz 以上.通过调整微型针的振动频率和振幅,就能够传递物体表面的平滑度信息.因此,利用多模态鼠标可以实现表面纹理反馈,进而对不同表面的粗糙度做出比较.具有足够密度的微型针阵列,能在手指端部皮肤感受器最佳带宽范围内产生振动,传递有用的几何信息是一个极具挑战性的开发任务,因为一种满足微型针阵列要求的功率—重量比的触觉感知接口仍是目前大力开发的重要研究课题.

3 触觉感知接口驱动机构的研究 (Actuator study of haptic interface)

将力觉或触觉反馈给用户需要驱动机构,它是触觉感知接口的重要组成部分.若没有驱动机构,接口的功能只能作为计算机的一个输入装置.VR 仿真的高逼真性,要求驱动机构具有很大的动态范围和很宽的带宽.功率密度(功率/重量比或功率/体积比)的要求也是触觉感知接口技术的一项重要指标,现有的传统技术不作出重大的技术改革和创新是难以达到的.触觉感知反馈的驱动机构非常靠近用户,所以,固有的安全性也成为具有厉害关系的问题.目前,针对触觉感知接口的需要,应用各种新型功能性材料,如形状记忆合金、压电晶体、电致和磁致伸缩材料以及电化学聚合物,开发和研制各种新型驱动机构已成为机器人领域的热门研究课题.诸如气动肌肉(Pneumatic Muscle Actuator)^[34]、形状记忆合

金机构、磁致伸缩驱动机构^[35]与压电晶体驱动机构^[36]、高分子聚合胶^[37]以及金属氢化物^[38]等特种驱动机构应运而生,它们在触觉感知接口技术中具有潜在的应用前景.

Caldwell 等人在核废料回收系统中,采用新近开发的气动肌肉驱动机构,利用此种机构实现回收核废料的机械手的运动^[39].在结构上,此种气动肌肉驱动机构是由橡胶制内衬套、尼龙纤维编织外壳层和端盖组成的一个双层汽缸.整个装置具有很大的功率/重量比和力/体积比.对于给定的截面面积,气动肌肉驱动机构的收缩力可以达到 300 N/cm².这种气动肌肉驱动机构的带宽不高,大约在 5 Hz 以上.从改善其响应特性的观点出发,还有待于进一步提高此种气动肌肉驱动机构的带宽.

另一种形状记忆合金肌肉驱动机构需要双向动作,可以采用两类不同的形状记忆合金管,一类记忆弯曲形状,而另一类则记忆直线形状.这样,通过控制两类形状记忆合金管的温度来实现弯曲和伸直运动.末端执行器位于四根形状记忆合金管的中间,这种形状记忆合金肌肉驱动机构实现双向动作^[40].

一种聚合物电介质的电致伸缩性能可以应用在电气控制的类肌肉驱动机构.这种电致伸缩聚合物人工肌肉 EPAM (Electrostrictive Polymer Artificial Muscle) 驱动机构可以产生 30 % 以上的应变和 1.9 MPa 的压力.此种人工肌肉所能达到的能量密度:力矩/重量比为 19 mN·m/g,而功率/重量比仅为 0.1 W/g^[41].电致伸缩聚合物,具有低弹性模量和高柔顺电极的电致伸缩聚合物应该是一种新型驱动机构优选的材料,它能提供与生物肌肉相类似的综合性能.因此,EPAM 电致伸缩聚合物驱动机构非常适合于要求性能类似于生物的机器人应用场合.

目前,为了适应虚拟现实触觉感知接口技术的需要,基于新型功能材料的人工肌肉驱动机构研究领域十分活跃.在开发拟人肌肉的操作装置中,最大的障碍就是时间响应过慢.因此,开发具有快速响应的人工肌肉驱动机构,将给基于虚拟现实的触觉感知接口技术的发展带来新的生机和应用前景.

4 研究和发展趋势 (Researching and developing tendency)

随着机器人应用领域的不断扩大,基于虚拟现实的触觉感知接口技术已经取得很大的进步.然而,现有的成果多数仍处于实验室样机阶段,在工程领域中的实际运用还是有限的.触觉感知接口技术的

研究依然处在初始阶段.对于许多本质性的问题,还缺乏统一的认识.根据触觉感知接口技术的研究现状和发展动向,提出触觉感知接口技术今后应进一步研究和急待解决的问题:

1) 正确解决力觉感知接口与用户的疲劳因素之间的矛盾,从人类工程学观点出发,设计和开发功率/重量比和功率/体积比大的驱动机构势在必行,从而达到减轻虚拟环境中用户的负担和防止疲劳的目的.在开发和研制新型驱动机构时,特别要注意采用各种新型功能性材料.

2) 触觉反馈的空间分辨率与接触区域之间的不协调性,往往直接影响触觉感知接口在各个工程领域中的有效运用.因此,研制高灵敏度和高分辨率,且结构轻巧和微型化的触觉传感器,已成为触觉感知接口技术研究领域的热点课题之一.

3) 研究触觉感知接口的控制方法,以提高触觉感知接口的带宽和缩短仿真时间,获取良好的触觉感知品质(尤其是稳定性).对于复杂的虚拟环境而言,计算负荷量必然增大,应用分布式多处理器或多工作站结构进行运算是非常必要的.在仿真处理过程中,触觉感知接口相关的仿真病态,即所谓的刚性问题以及操作系统的安全性研究也都是不容忽视的重要问题.

4) 进一步开发与研制高精度、高刚度、高分辨率及结构紧凑的集机构、检测和控制于一体的微型触觉感知接口,以适应各种遥操作系统的需要.

5) 现有的商品化触觉感知接口及其相应的配件造价十分昂贵,一般用户还很难接受.因此,研制成本低廉、功率密度高和可靠耐用的触觉感知接口是当前需要急待解决的问题.

虚拟现实技术的出现,不仅可以提供视觉上逼真的计算机三维图形及工作现场的场景,而且基于虚拟现实的触觉感知接口,还可以提供对虚拟环境物体进行操纵过程中作用力与物体几何形状及柔顺性等触觉感知信息以及相关位置的实时测量等.目前,触觉感知接口技术的研究已引起科技界、工业界和商业界的重视,在全球范围内迅速地开展起来.

参考文献 (References)

- [1] Krueger M. Artificial reality II [M]. Addison Wesley, Menlo Park, CA, 1991.
- [2] Pimentel K, Teixeira K. Virtual Reality: Through the new looking glass [M]. second edition, Windercrest McGraw-Hill, New York: 1994.
- [3] 黄心渊编著.虚拟现实技术与应用 [M].北京:科学出版社,1999.
- [4] Mitsuishi M, Lizuka Y, Watanabe H, et al. Remote operation of a microsurgical system [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 1013 - 1019.
- [5] 王田苗,刘达.医疗外科机器人的研究开发与产业化前景 [J]. 机器人, 2000, 22(7B): 897 - 901.
- [6] Peter Corr, Ian Couper et al. A simple telemedicine system using a digital camera [J]. Journal of Telemedicine and Telecare, 2000, 6: 233 - 236.
- [7] Mohamad Kassab Al-Taei, Yunhe Pan, Dong Ming Lu. An internet-based telediagnosis system for chinese medicine [J]. Journal of Telemedicine and Telecare, 2000, 6 Supplement 1.
- [8] Gembicki M, Rousseau D, et al. Application of virtual reality [A]. Proc of Virtual Systems Conference [C]. 1993. 269 - 288.
- [9] Brady K, Tarn T-J. Internet-based remote teleoperation [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 65 - 70.
- [10] 赵明国,孙立宁,蔡鹤皋.一种基于 Internet 的遥操作机器人系统 - Telerobot [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, (1): 8 - 12.
- [11] 李珊,李治邦.虚拟制造技术.计算机应用研究 [J], 2001, 18(3): 1 - 3.
- [12] Webster J G. Tactile sensors for robotics and medicine [M]. John Wiley & Sons, Inc. New York: 1988.
- [13] Bergamasco M, Allota B, Bosio L, et al. An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1994. 1449 - 1454.
- [14] Marcus B Sensing. Perception and feedback for VR [A]. VR Systems Fall 93 Conference [C]. 1993.
- [15] Burdea G, Zhuang J, Roskos E, et al. A portable dextrous master with force feedback [J]. Presence-Teleoperators and Virtual Environments, 1992, 1(1): 18 - 27.
- [16] Gomez D, Burdea G, Langrana N. Integration of the rutgers master II in a virtual reality simulation [A]. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium [C]. 1995. 198 - 202.
- [17] Tsumaki Y, Naruse H, Nenchev D N, et al. Design of a compact 6-DOF haptic interface [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 2580 - 2585.
- [18] Kallio P, Lind M, Zhou Q, et al. Position control of a 3-DOF piezohydraulic parallel micromanipulator [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 770 - 775.
- [19] Zhou Q, Kallio P, Kioivo H N. Modelling of a piezohydraulic actuator for control of a parallel micromanipulator [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1999. 2750 - 2755.
- [20] 张建勋,卢桂章.用于生物与医学工程中的微驱动机器人系统 [J]. 机器人技术与应用, 1998, 4: 18 - 20.
- [21] 孙立宁,张涛,许群,蔡鹤皋.具有力感知功能的微小操作手的研究 [J]. 机器人, 1998, 20(4): 680 - 684.
- [22] Burdea G. Force and Touch Feedback for Virtual and Reality [M]. John Wiley & Sons, INC, New York: 1996.
- [23] Howe R, Kontarinis D. Task performance with a dextrous teleoper-

- ation hand system [A]. Proc of SPIE [C]. 1992, **1833** : 199 - 207 .
- [24] Burdea G, Goratowski R, Langrana N. A tactile sensing glove for computerized hand diagnosis [J]. The Journal of Medicine and Virtual Reality, 1995, **1**(1) : 40 - 44 .
- [25] Yue Hong, Li Tiejun, Cai Hegao. Research on behaviors of electrorheological fluid-based semiactive robot fingertip [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, **11**(2) : 96 - 101 .
- [26] 岳宏, 李铁军, 蔡鹤皋. 机器人手爪的柔顺指端 [J]. 机械设计, 1998, **15**(4) : 20 - 22 .
- [27] Mavroidis C, Pfeiffer C, Celestino J, *et al.* Controlled compliance haptic interface using electrorheological fluids [A]. Proc of the 2000 SPIE Conference on Electro-Active Polymer Actuators and Devices [C]. March 5 - 9, 2000 .
- [28] 金世俊, 黄帷一. 遥作机器人系统中的触觉反馈 [J]. 传感技术学报, 1997, **4**(4) : 49 - 55 .
- [29] 张红芬, 李科杰, 申延涛. 机器人触觉临场感系统研究 [J]. 机器人, 2000, **22**(5) : 365 - 370 .
- [30] 赵春霞, 盛安东, 杨静宇, 王树国等. 虚拟触觉传感器的仿真模型研究 [J]. 机器人, 2000, **22**(4) : 260 - 263 .
- [31] Hasser C, Weisenberger J. Preliminary evaluation of a shape-memory alloy tactile feedback display [A]. Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interface [C]. 1993, DSC-29, AS ME, 73 - 80 .
- [32] Kontarinis H, Son J, Peine W, *et al.* A tactile shape sensing and display system for teleoperated manipulation [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C] 1995, **1** : 641 - 646 .
- [33] Akamatsu M, Sato S, MacKenzie S. Multimodal Mouse: A mouse-type device with tactile and force display [J]. Presence-Teleoperators and Virtual Environments, 1994, **3**(1) : 73 - 80 .
- [34] Caldwell D, Medrano-Cerda G, Goodwin M. Characteristics and adaptive control of pneumatic muscle actuators for a robotic elbow [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1994, **1** : 3558 - 3563 .
- [35] Brimhall O, Hasser C. Magnetostrictive linear device for force reflection in dexterous telemanipulation [A]. Proc of SPIE [C]. 1994, **2190** : 508 - 519 .
- [36] 蔡鹤皋, 孙立宁, 安辉. 压电/电致伸缩位移器件的应用 [J]. 高技术通讯, 1994, **4**(6) : 37 - 40 .
- [37] Shahinpoor M. Electrothermo-mechanics of resilient contractile fiber bundles as robotic actuators [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], 1994. 1502 - 1507 .
- [38] Shimizu S, Ino S, Sato M, *et al.* A new method of variable compliance for a force display system using a metal hydride actuator [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1994. 256 - 270 .
- [39] Caldwell D G, Tsagarakis N, Medrano-Cerda G A, *et al.* Development of a PMA driven manipulator rig for nuclear waste retrieval operations [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1999. 525 - 529 .
- [40] Hashimoto M, Tabata T, Yuki T. Development of the electrically heated SMA active forceps for laparoscopic surgery [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1999. 2372 - 2377 .
- [41] Kornbluh R, *et al.* Electrostrictive polymer artificial muscle actuators [A]. Proc of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1998. 2147 - 2154 .

作者简介:

岳宏 (1936-), 男, 河北工业大学机器人及自动化研究所所长, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学与机电控制及自动化技术等. 主持完成国家自然科学基金等课题多项.

(上接第 469 页)

- [39] Yamamoto Y, Yun X P. Coordinated task execution of a human and a mobile manipulator [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1996. 1006 - 1011 .
- [40] Fernandez V. Active human - mobile manipulator cooperation through intention recognition [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2001. 2688 - 2673 .
- [41] Agah A, Tanie K. Human interaction with a service robot: mobile manipulator handing over an object to a Human [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1997. 575 - 580 .
- [42] Yamamoto Y, Fukyda S. Trajectory planning of multiple mobile manipulators with collision avoidance capability [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2002. 3565 - 3570 .
- [43] Chong N Y, Yokoi K, Oh S R, *et al.* Position control of collision-tolerant passive mobile manipulator with base suspension characteristics [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1997. 584 - 599 .
- [44] Balch T, Arkin R. Communication in reactive multiagent robotic systems [J]. Autonomous Robots, 1994, **1**(1) : 27 - 52 .
- [45] Desai J, Wang C C. Motion planning for multiple mobile manipulators [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1996. 2073 - 2078 .
- [46] Sugar T, Kumar V. Decentralized control of cooperating mobile manipulators [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. 2916 - 2921 .
- [47] Sugar T, Desia J P, Kumar V. Coordination of multiple mobile manipulators [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2001. 3022 - 3027 .
- [48] Kolmanvsky I, McClamroch N H. Developments in nonholonomic control problems [J]. IEEE Control Systems, 1995, **20**(11) : 20 - 36 .
- [49] 胡跃明, 周其节, 裴海龙. 非完整控制系统的理论与应用 [J]. 控制理论与应用, 1996, **13**(1) : 1 - 10 .

作者简介:

宋佐时 (1977-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人, 智能控制.
易建强 (1963-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人, 智能控制.
赵冬斌 (1972-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人, 智能控制.