

# 面向自然人机交互的力触觉再现方法综述<sup>\*</sup>

陆熊, 陈晓丽, 孙浩浩, 赵丽萍

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

**摘要:**力触觉再现技术借助力触觉人机接口设备,提供了操作者与虚拟环境之间的力触觉交互,使得操作者能够主动地触摸、感知和操纵虚拟物体,从而有效增强了虚拟现实等系统的真实感和沉浸感,进一步拓展了虚拟现实等技术的应用领域。传统的穿戴式、力反馈操纵杆式力触觉再现设备在便携性、操作空间等方面存在局限性,随着计算机技术与消费电子的快速发展,面向自然交互的力触觉再现方法受到广泛的关注。评述了传统的穿戴式、力反馈操纵杆式力触觉再现设备后,重点阐述了非固定式和非接触式的两类面向自然交互的力触觉再现方法。在对比分析不同的力触觉再现方法之间的差异后,探讨了面向自然交互的力触觉再现方法的未来发展方向。

**关键词:**力触觉再现;自然交互;非固定式;非接触式

**中图分类号:** TP246.2 TH132 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

## Haptic rendering methods for natural human-computer interaction: A review

Lu Xiong, Chen Xiaoli, Sun Haohao, Zhao Liping

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The haptic rendering technique provides the haptic interaction between the operator and virtual environment by means of a haptic human-machine interface device, which enables the operator to touch, perceive and manipulate the virtual objects actively. The haptic rendering method enhances the realism and immersion of the virtual reality system, and further expands the application field of virtual reality technology. Traditional wearable haptic rendering devices and force feedback joystick haptic rendering devices have some limitations in portability, operating space and other aspects. As the rapid development of computer technology and consumer electronics, the haptic rendering methods for natural human-computer interaction gain wide concern. Firstly, this paper introduces the traditional haptic rendering devices, such as wearable device and force feedback joystick device. Then, the haptic rendering methods for natural human-computer interaction, including the ungrounded method and untethered method, are elaborated. After comparing and analyzing the differences of different haptic rendering methods, the future development direction of the haptic rendering methods for natural interaction is discussed.

**Keywords:** haptic rendering; natural interaction; ungrounded; untethered

## 0 引 言

在人类与客观世界交互的过程中,人类的力触觉系统提供了其他感知系统(视觉或听觉等)所不具备的双向信息和能量交互<sup>[1]</sup>,让人类能够主动探索客观世界,因而

是一种非常独特的、极其重要的、不可或缺的感知系统。

自1946年人类制造出第一台电子计算机以来,人机交互技术经历了使用键盘、使用鼠标、多媒体与鼠标共用3个阶段。但是,在现实生活中,人与人之间的交互并非仅仅通过人手操作,而是通过视觉、听觉、触觉、味觉、嗅觉等多种感觉系统来实现的。为了使人机交互能够像人

与环境交互那样自然、准确、快捷,20世纪90年代,人机交互进入到多模态的人机自然交互(human-computer nature interaction, HCNI)阶段。

1989年,美国VPL Research公司的创始人Lanier J提出了虚拟现实(virtual reality, VR)的概念。虚拟现实技术是以计算机技术为核心,结合相关科学技术,生成在视、听、触、感等方面与真实环境高度相似的数字化环境,借助必要的装备与数字化环境中的对象进行交互作用、相互影响,可以产生身临其境的感受和体验。当前,虚拟现实技术融合人机交互、人工智能、多媒体、传感器以及网络等多个信息技术分支的最新发展,使操作者在视觉、听觉、触觉等多个方面与虚拟物体进行交互,成为力触觉再现技术的典型应用领域之一。

1965年,Sutherland I<sup>[2]</sup>首次提到了力反馈设备对于虚拟现实发展极有意义;1967年,美国北卡罗来纳大学的Brooks F. P.等人<sup>[3]</sup>开始进行药物分子重构方面的研究,用力触觉来进行药物分子重构,在此过程中涉及到分子层面的力反馈问题,将力触觉再现应用到虚拟现实领域。

力触觉再现技术的引入,极大地提高了虚拟现实等系统的真实感和沉浸感,进一步拓展了虚拟现实等技术的应用领域。近年来,力触觉再现方法在医学、科学可视化、机器人操作、机械制造以及电子游戏等领域有着越来越广泛的应用<sup>[4-5]</sup>,比如力触觉医学触诊训练系统<sup>[6]</sup>、用于国际空间站的Haptics-1力触觉操作杆系统<sup>[7]</sup>、带力触觉反馈的机械虚拟原型系统<sup>[8]</sup>等等。

在虚拟现实技术与力触觉人机交互技术的发展过程中,多种力触觉再现方法被研究出来,形成了多种多样的力触觉再现设备(人机接口设备)。

本文阐述了传统的穿戴式<sup>[9]</sup>、力反馈操纵杆式力触觉再现设备的研究现状,然后重点介绍了面向自然交互的力触觉再现方法,并分类讨论了非接触式<sup>[10]</sup>、非固定式<sup>[11]</sup>两种面向自然交互的力触觉再现方法。在分析比较不同方法性能的基础上,探讨了面向自然交互的力触觉再现方法的发展方向。

## 1 基于穿戴式和力反馈操纵杆式的力触觉再现设备(方法)

力触觉再现方法使操作者能够借助接口设备实现与虚拟环境的力触觉交互,其中基于穿戴式的和力反馈操纵杆式的力触觉再现方法是最典型的代表。

### 1.1 穿戴式力触觉再现设备

穿戴式力触觉再现设备主要包括固定在操作者身体上的外骨架穿戴式设备与基于数据手套的穿戴式设备。

#### 1.1.1 外骨架穿戴式力触觉再现设备

外骨架穿戴式装置是固定在操作者肢体上的刚性串

联连杆机构<sup>[12]</sup>。这种力触觉再现装置固定在操作者身体上,通过向机械骨架上的多个关节(肩关节、肘关节和腕关节)提供力反馈,模拟出手或手臂较大的受力状态,比如模拟人手抓持物体时感受到的重量。

20世纪70年代末,出现了最早的主从式操作系统Hardiman<sup>[13]</sup>,它是被放置在从机器设备中的拟人化外骨架装置。它从操作者的手臂和腿部获得命令,被用来放大人类操作的输出功率。但是这种早期的外骨架力触觉再现装置在驱动、计算和控制方法上存在一定的局限性。

先进机器人技术与系统(advanced robotics technology and systems, ARTS)实验室设计发展出的第一个现代外骨架设备<sup>[14]</sup>,用于模拟手臂接触或碰撞环境时的感觉。该装置固定在操作者手臂上并直接通过肩膀和躯干支撑,末端放置在操作者手上,用来复现操作系统从结构的外部受力;它是一个7自由度(degree of freedom, DOF)的力触觉再现装置。与此相似,意大利的PERCRO实验室(perceptual robotics laboratory, PERCRO)研究出了基于身体式的外骨架力触觉设备,如图1(a)所示。

马里兰-乔治城-陆军(Maryland-Georgetown-Army, MGA)外骨架设备<sup>[15]</sup>,是一个为肩关节康复训练而设计6 DOF的设备,如图1(b)所示。该外骨架装置由装配在肩膀周围圆形连接机构上的3个轴交叉的可旋转关节结构、固定在躯干上的肩胛骨关节结构等组成。通过在虚拟环境中设置刷墙场景(使用虚拟刷子),控制上臂的力触觉机构驱动肘部运动,并利用安装在握力练习机构上的传感器向操作者传递交互作用力。但是,当虚拟刷子离开虚拟墙自由运动时,依然存在粘滞阻力,这与现实世界中的情况存在偏差。

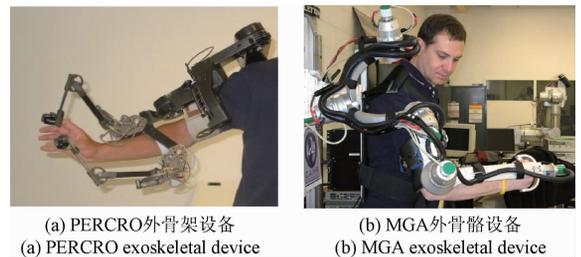


图1 外骨架式力触觉再现设备

Fig. 1 Exoskeleton based haptic rendering devices

这些固定在操作者身体上的外骨架式力触觉再现设备通常包含各种驱动机构及传感机构,并借助机械连杆机构连接,所以具有反馈作用力较大、控制精度高等优点,常应用在危险环境的遥操作、外科手术仿真训练<sup>[16-18]</sup>以及康复训练等领域<sup>[19]</sup>。但是,这种外骨架式的力触觉再现设备也存在如下的局限性。

1) 在力触觉再现过程中,为保证设备正常工作,常常需要调整机械关节的位置和操作者关节吻合。

2) 结构复杂且笨重,不仅作用力受到操作者当前姿态的影响,而且对操作者的自由运动附加了一定的阻力。

3) 由于需要固定在操作者身体上,因此对人体可能会造成一定负担甚至损伤。

4) 大量传感机构、机械控制机构的使用,使得这种力触觉再现设备造价较高。

### 1.1.2 基于数据手套的穿戴式力触觉再现设备

作为一种典型的穿戴式人机交互设备,数据手套使用柔性材料制成,并安装柔性角度传感器测量手指的关节角度<sup>[20]</sup>。目前,有不少数据手套已经商品化,如VT公司的CyberGlove,它包含22个传感器,分辨率0.5°,重量为84g。Immersion公司的CyberGrasp,如图2(a)所示,是基于CyberGlove的一种力触觉设备,它每根手指最大连续输出力可达12N,重量为450g(仅外骨骼,不含CyberGlove系统),能够使操作者在抓取物体时感受到作用力。除此之外,Rutgers大学的Master II-ND力反馈手套(见图2(b))和斯坦福大学的Wolverine手套(见图2(c))、国内东南大学基于磁流变液和CyberGlove构建的力反馈数据手套<sup>[21]</sup>(见图2(d))等,都属于基于数据手套的穿戴式力触觉再现设备。

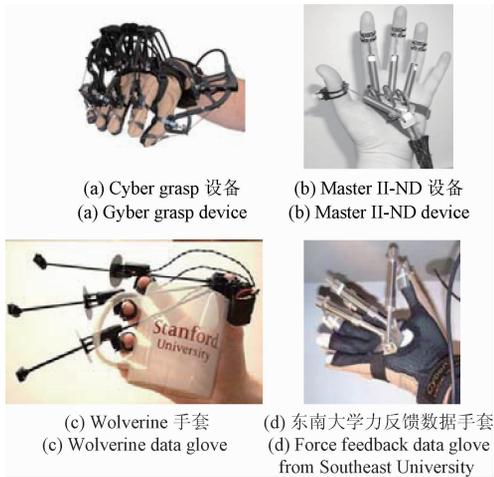


图2 基于数据手套的穿戴式力触觉再现设备

Fig.2 Wearable haptic rendering devices based on data glove

除了上述设备外,还有一些力触觉再现设备可以穿戴在人体的其他部位,像是腿部<sup>[22]</sup>、腰部(数据腰带)<sup>[23]</sup>、身体躯干部位(触觉背心)<sup>[24]</sup>等。

基于数据手套的穿戴式力触觉再现设备具有佩戴舒适,对手指运动限制小、重量轻等优点,但是精度相对于外骨架式的力触觉再现设备要低,且价格也十分昂贵,并不适用于消费电子产品。

### 1.2 力反馈操作杆式的力触觉再现设备

近年来,力反馈操纵杆式的力触觉再现设备发展迅

速,其中许多设备都已经商品化。如Force Dimension公司的Omega系列、Delta系列和Sigma系列设备(见图3(a)),Geomagic(原SensAble Technologies)公司的Touch系列和Phantom Premium系列设备(见图3(b)),法国Haption公司的VIRTUOSE 3D和6D Desktop等产品,Butterfly Haptics公司的Maglev设备,Novint公司的Falcon设备等。其中,Maglev设备<sup>[25]</sup>是6自由度磁悬浮力触觉交互系统,Novint公司的Falcon设备,属于面向游戏娱乐应用的入门级设备。



图3 力反馈操纵杆式的力触觉再现设备

Fig.3 Haptic rendering devices based on force feedback joystick

除此之外,还有一些力反馈操纵杆式的力触觉再现设备被提出,如东南大学仪器科学与工程学院研制的6DOF带力反馈的手控器(见图3(c))以及新型6DOF力触觉装置<sup>[26-27]</sup>(见图3(d))、清华大学的三维力反馈装置<sup>[28]</sup>、伊朗Sharif科技大学的VirSense设备<sup>[29]</sup>等。

这些力反馈操纵杆式的力触觉再现设备普遍具有位移检测精度高、再现刚性强、输出作用力大等多方面的优点。

1) Force Dimension公司的Omega.3设备,刷新率高达4kHz,持续输出力可达12N,刚性系数14.5N/mm,位移检测精度可控制在0.01mm;

2) Geomagic Touch设备,正交臂最大输出力可达3.3N,持续输出力可达0.88N,位移检测分辨率可达0.055mm,X轴、Y轴、Z轴刚性分别在1.26、2.31、1.02N/mm以上。

但是,这些操纵杆式的力触觉再现设备也存在如下的局限性。

1) 由于机械连杆机构存在,使得该类型的力触觉再现设备的操作空间被限制在操纵杆所能运动的空间内。

2) 它们大多数采用力矩电机和机械结构的方式产生作用力,设备自重引起的惯性量、运动时的摩擦力等等因素都会影响操作者自由运动时力触觉感知的真实性。

3) 高精度的机械结构、较高的位置检测精度、较大的输出作用力等,带来了昂贵的价格。

在力触觉再现技术的发展过程中,基于这些传统的力触觉再现设备,一系列的力触觉再现建模方法和应用系统被提出,如牙科手术仿真、血管介入手术仿真、乐器演奏等系统<sup>[30-37]</sup>以及系统优化、系统稳定性、柔性物体形变模型等<sup>[38-41]</sup>方面的研究。

## 2 面向自然交互的力触觉再现方法

为了克服传统力触觉再现设备对身体的限制,使操作者能快速、准确地感知并识别出虚拟物体,并可以根据自己的意识灵活地操纵虚拟物体,面向自然交互的力触觉再现方法被提了出来,它们可以分为非接触式和非固定式的两大类。

### 2.1 非接触式力触觉再现方法

在非接触式的力触觉再现方法中,操作者可以在不直接接触接口装置的情况下感知虚拟物体。为了使操作者直观感受到虚拟物体,基于空气压力原理、基于涡流效应、基于电磁作用力的非接触式力触觉再现方法被相继研究出来。

Suzuki Y 等人<sup>[42-43]</sup>使用空气压力原理设计了气体喷射(含  $10 \times 10$  气体喷嘴阵列)力触觉再现系统,如图 4 所示。该系统通过摄像头和投影装置检测手指位置后,激励相应位置的喷嘴喷射气体,使操作者手持的浅杯状集气器受到气体压力,由此实现非接触式的、动作不受限制的力触觉再现。但是,这种方法中的气流比较杂乱且消失很快,不能持续输出作用力,且气流接收器上的受力较小(0.7 N)。

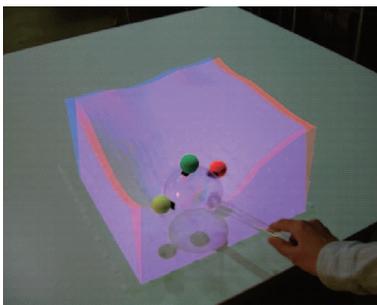


图4 气体喷射装置

Fig. 4 Air jet device

Gupta S 等人<sup>[44]</sup>基于涡流环的形式设计了 AirWave 系统,如图 5 所示。该系统使用一个  $28 \text{ cm} \times 28 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  盒状的涡流环发生器,发生器的内部包含一个直径为 25.4 cm 的扬声器,在盒子另一边开了一定深度的圆孔;通过对扬声器线圈中施加不同大小的电流,将盒子里的空气推挤到圆孔处,经过圆孔被挤出的空气会急速地旋转并以空气环的形式发散出来,形成了对用户的力触觉反馈。该系统实现了距离 2.5 m 处低于 10 cm 的空间分辨率。



图5 AirWave 装置

Fig. 5 AirWave device

Weiss M 等人<sup>[45]</sup>在 Madgets 驱动系统中提到了利用  $19 \text{ 行} \times 12 \text{ 列}$  的电磁铁阵列驱动交互桌面上包含 5 个永磁体的 Madgets 设备。紧接着又利用电磁铁阵列和粘贴在操作者手指尖上的永磁铁构建了 FingerFlux 系统<sup>[46]</sup>。FingerFlux(见图 6)系统通过驱动电磁铁阵列,可以使操作者在接触到接口设备之前感受到排斥力与吸引力,并在交互界面上方 3.5 mm 处感受到振动模式,是一种典型的非接触式力触觉再现方式。与 FingerFlux 系统相似,Karunanayaka K 等人<sup>[47]</sup>设计了力触觉鼠标定位系统 Haptic Mouse。Haptic Mouse 系统接口主要由电磁铁阵列与传感器阵列组成,要求操作者在手指上穿戴永磁铁,可以向操作者提供吸引力、排斥力以及多种振动模式的力触觉信息。Haptic Mouse 系统的最大特点是提供了一种基本工具,将基于磁场的工具与计算机连接起来;操作者无需与接口设备直接接触,只需要通过移动穿戴永磁铁的手指控制光标的移动。这种基于电磁作用力的非接触式力触觉再现方法,可以较好地再现低摩擦力条件或适应内部惯性很小的环境条件,在非接触式力触觉再现领域受到越来越多的关注。



图6 FingerFlux 系统

Fig. 6 FingerFlux system

国内武汉大学研制了一种新型的非接触式力触觉装置<sup>[48]</sup>,用于在医学仿真中增强对虚拟人体组织刚度信息的感知,如图 7 所示。该装置由间距以及角度可调的电磁铁阵列、装配有永磁铁的触觉操作笔、双目视觉追踪模块、虚拟场景显示模块和电磁铁阵列驱动等模块组成。该力触觉再现过程:1)由视觉追踪模块实时采集触觉操作笔的位置信息传递给虚拟场景再现模块;2)该模块则根据提前建立好的模型计算输出力的大小,并计算出电磁铁驱动电流的大小;3)电磁铁阵列驱动电路调整线圈电流,产生与交互过程一致的电磁场;4)操作者通过触觉操作笔感受到虚拟物体。操作者可以通过该装置,感知生物组织的刚度信息,并通过与周围组织特性的比较,确定组织异常部位。

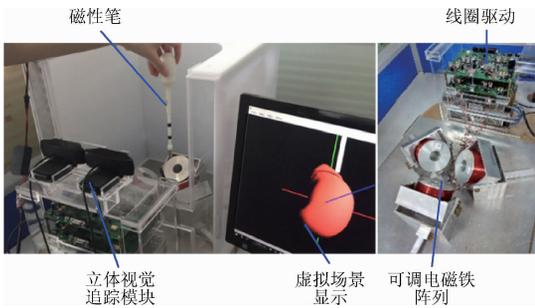


图 7 武汉大学非接触式力触觉再现装置  
Fig. 7 The untethered haptic rendering device from Wuhan University

作为力触觉再现方法评价指标,力触觉再现系统计算更新频率一般控制在 300 ~ 1 000 Hz,且越高越理想<sup>[49]</sup>。Hu J 等人<sup>[50]</sup>进一步研究了外科手术医学仿真和训练系统中的非接触式的力触觉再现方法,提出了一种全自由度的基于电磁作用力的力触觉再现系统设计方案(图 8),并验证了采样频率对力触觉再现系统有效性的影响。该系统由被磁化的力触觉接口工具(本质上是一个永磁铁)、一个碗型电磁铁容器(内部安装有电磁铁线圈阵列)以及与电磁铁容器固定在一起可以移动位置的机械结构(保证接口工具始终在电磁场中心位置)组成。该力触觉再现方法以其全自由度、高灵活性、高保真度可以真实再现外科手术训练过程中的力触觉反馈。



图 8 基于电磁力的非接触式力触觉再现系统  
Fig. 8 The untethered haptic rendering system based on electromagnetic force

## 2.2 非固定式力触觉再现方法

当前,力触觉再现设备通常固定在一个刚性结构上,限制了操作者的运动范围,影响虚拟现实系统的真实感和沉浸感。而非固定式力触觉再现设备的提出,解决了操作者运动空间受限的问题,使操作者以接近自然的方式与虚拟物体进行交互。

在自然环境中,人们用手去触摸或抓持物体的过程中通常会感受到摩擦力或剪切力。Guinan A. L. 等人<sup>[51-52]</sup>研制了一种基于摩擦力和剪切作用力原理的非固定式力触觉反馈装置,如图 9 所示。该装置包含滑动板接触器和 6 自由度空间位置检测装置,利用作用于手掌上的剪切力,向用户提供其与虚拟环境的交互。该装置通过驱动滑动板接触器在手柄表面运动,同时作用于操作者的手掌,进而向用户提供力触觉信息:1)当驱动滑动板接触器沿手柄长度方向朝一个方向运动时,向操作者反馈同一个方向的力;2)当驱动滑动板接触器向相反方向运动时,向操作者反馈力矩信息;3)滑动板接触器运动的速度和强度的不同的组合会产生不同的力和力矩,而这些不同的力和力矩信息的叠加会给操作者带来不同的感知体验,用来模拟虚拟环境中目标的受力情况。这种基于剪切作用力原理的面向自然交互的力触觉再现方法,通过增大力触觉接口设备与操作者皮肤的接触面积,控制接口装置向操作者传递的力或力矩信息,使操作人员直观感受虚拟物体,并模拟用户接触到物体时的真实体验,有助于增强虚拟现实系统的沉浸感。



图 9 基于剪切力的力触觉再现装置  
Fig. 9 Haptic rendering device based on shearing force

Winfree K. N. 等人<sup>[53]</sup>基于陀螺效应研究设计了非固定式的、手持式的力触觉再现装置 iTorqU 2.0(见图 10),通过使用双轴方向的金属飞轮,向操作者反馈力矩信息。此外,还有一些商品化的非固定式力触觉再现设备,如 Tactile Haptics 公司的 Reactive Grip(见图 11)。



图 10 iTorqU 2.0  
Fig. 10 iTorqU 2.0



图 11 Reactive Grip

Fig. 11 Reactive Grip

全分离出来,增大了操作者的运动空间,增强了设备的便携性,在遥操作、虚拟现实、消费电子等领域具有较大的发展潜力。

### 3 不同力触觉再现方法(设备)性能比较

近年来,力触觉再现技术进入快速发展阶段。不同的力触觉再现方法(设备)在性能、便携性、成本价格等方面有着显著差异。本文以典型设备为代表,分类总结了传统的穿戴式、力反馈操纵杆式力触觉再现方法(设备)以及非固定式等面向自然交互的力触觉再现方法(设备),如表1所示。

表 1 不同力触觉再现方法(设备)性能比较

Table 1 Performance comparison of different haptic rendering methods (equipment)

名称	类型	参数特点	优缺点
CyberGrasp	穿戴式	1) 每根手指连续输出最大力为 12 N 2) 角度分辨率为 0.5° 3) 操作空间为半径 1 m 的球体	优点: 输出力较大、分辨率高、精度高 缺点: 固定在操作者身体上, 影响操作者运动与感知效果、内部惯性和摩擦力不可消除、价格高
Phantom Omni	力反馈操纵杆式	1) 正交臂输出最大力为 3.3 N 2) 标称位置分辨率 0.055 mm 3) 力反馈空间为 160 mm(宽) × 120 mm(高) × 70 mm(长) 4) 自由度为 6	优点: 位置分辨率高、反馈作用力较大、精度高 缺点: 操作空间受连接杆限制、内部惯性和摩擦力不可消除、价格高
Reactive Grip	非固定式	1) 包含 3 个滑动板接触器 2) 滑动板接触器同向运动传递力, 反向运动传递力矩 3) 集成了一个 6 自由度的位置追踪装置	优点: 无机械连杆结构、接口设备完全分离出来, 操作者的运动不受设备限制、工作空间大、成本低、易于携带 缺点: 精度相对较低反馈力相对较小

传统的力触觉再现方法(设备)具有位置检测精度高,输出作用力大等优点,可应用于牙科或外科手术仿真等场景。但由于其设备价格昂贵,并且操作空间受限,不适用于消费电子产品。

面向自然交互的力触觉再现方法的提出,一方面使操作者准确、直观地与虚拟物体进行交互,增强虚拟现实系统的沉浸感,促进虚拟现实技术的发展;另一方面,弥补了传统的力触觉再现方法操作空间受限、存在内部惯性和摩擦力等方面的不足,使操作者的运动、感知过程更加自然;此外,价格相对低廉,可应用于消费电子产品的研制。

### 4 面向自然交互的力触觉再现方法展望

随着消费电子产品性能的提高,各式各样的虚拟现实头戴式显示设备(VR眼镜)被推出,如Oculus Rift、

Sony公司的Project Morpheus、Samsung公司Gear VR眼镜和微软公司的HoloLens全息眼镜等等。这种视觉再现领域技术的迅猛发展,进一步凸显了人类社会对于力触觉再现技术发展的迫切需求。在面向自然交互的力触觉再现研究中,依然有若干重要问题等待研究学者去研究和挑战。

1) 高精度的位置检测:力触觉再现方法中,位置检测的精度直接影响整个力触觉再现系统的性能,一直都是该领域的研究重点。在面向自然交互的力触觉再现方法中,由于不再有机机械连杆等机构,对操作者位置检测提出更高要求。目前适用的位置检测方法主要有:(1)采用传感器测量,比如Cyber Glove系统采用超声传感器,以声波定位方式测量人手在空间的姿态和位置;也有数据手套系统采用三维磁场传感器检测人手位置等。(2)利用机器视觉测量的方法,比如使用双目立体视觉装置、Kinect深度摄像头检测操作者手的位置等。但是,这些

位置检测方法在精度上还存在局限性。因此,如何提高力触觉再现系统的位置检测精度将成为该方向研究的重点。采用多个摄像头组、将机器视觉与电磁式方法相结合等,是值得探究的方向。

2) 真正多模态的力触觉再现系统。现实生活中,人们可以通过视觉、听觉、力触觉等多种方式自然地与环境进行多模态的信息交互。如何在同一个时间和空间范畴中将视觉、听觉、力触觉等融合起来,形成真正意义上的多模态人机交互,对于促进面向自然交互的力触觉再现技术的发展有重要意义。比如,可以将面向自然交互力触觉再现与新兴的VR眼镜相结合,实现多模态交互的时间和空间一致性。

3) 多点交互的力触觉再现系统。在力触觉再现技术发展的过程中,出现了各式各样的交互设备,其中大多数都是通过单点与虚拟环境交互,比如前述的Geomagic公司的Touch、Phantom Premium系列产品等。但是,在现实世界中,人们通常使用多点交互的方式感知和操控物体。研究从原理上能实现多点交互的力触觉再现方法,无疑具有极大的潜力。比如,在上述的FingerFlux系统中,操作者可以在手上佩戴多个永磁铁以实现多点交互。

此外,传统的穿戴式、力反馈操纵杆式的力触觉产品价格较高,并不适用于普通消费人群,间接抑制了虚拟现实类产品的普及。如何降低力触觉再现设备的制造成本,对于进一步拓展力触觉再现的应用具有重要意义。

## 5 结 论

力触觉再现技术的发展将推动虚拟现实技术的进一步发展。因此,在传统的力触觉再现方法获得应用的基础上,进一步研究新兴的、面向自然交互的力触觉再现方法具有重要的意义。相信在不久的将来,高性能、低成本、自然交互的力触觉再现方法的出现,将促使力触觉再现被更广泛地应用于人们的日常生活中。

## 参考文献

[1] SALISBURY K, CONTI F, BARBAGLI F. Haptic rendering: Introductory concepts [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(2): 24-32.

[2] SUTHERLAND I. The ultimate display [J]. Proceedings of the Ifip Congress, 1965, 10(2): 506-508.

[3] BROOKS F P, OUHYOUNG M, BATTER J J, et al. Project GROPE haptic displays for scientific visualization [C]. Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1990: 177-185.

[4] ESCOBAR CASTILLEJOS D, NOGUEZ J, NERI L, et al. A review of simulators with haptic devices for medical

training [J]. Journal of Medical Systems, 2016, 40(4): 104-125.

[5] LIN M C, OTADUY M, LIN M C, et al. Haptic rendering: Foundations, algorithms and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.

[6] ULLRICH S, KUHLEN T. Haptic palpation for medical simulation in virtual environments [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2012, 18(4): 617-625.

[7] SCHIELE A, AIPLE M, KRUEGER T, et al. Haptics-1: Preliminary results from the first stiffness JND identification experiment in space [M]. Springer: Springer International Publishing, 2016.

[8] TALABA D, ANTONYA C. Virtual prototyping of mechanical systems with tool mediated haptic feedback [J]. Engineering with Computers, 2014, 30(4): 569-582.

[9] SHULL P B, DAMIAN D D. Haptic wearables as sensory replacement, sensory augmentation and trainer-A review [J]. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation, 2015, 12(1): 59.

[10] BRINK J B, PETRUSKA A J, JOHNSON D E, et al. Factors affecting the design of untethered magnetic haptic interfaces [C]. Proceedings of the IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 2014: 107-114.

[11] TSAGARAKIS N, CALDWELL D G, MEDRANOCERDA G A. A 7 DOF pneumatic muscle actuator (pMA) powered exoskeleton [C]. Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction, 1999: 327-333.

[12] HURMUZLU Y, EPHANOV A, STOIANOVICI D. Effect of a pneumatically driven haptic interface on the perceptual capabilities of human operators [J]. Presence, 2006, 7(3): 290-307.

[13] MOSHER R S. Handyman to hardiman [M]. SAE International, 1967.

[14] BERGAMASCO M, ALLOTTA B, BOSIO L, et al. An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications [C]. Proceedings of the Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994: 1449-1454.

[15] CARIGNAN C, TANG J, RODERICK S. Development of an exoskeleton haptic interface for virtual task training [C]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009: 3697-3702.

[16] BASDOGAN C, HO C H, SRINIVASAN M A. Virtual environments for medical training: graphical and haptic

- simulation of laparoscopic common bile duct exploration [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2001, 6(3): 269-285.
- [17] CARIGNAN C R, AKIN D L. Using robots for astronaut training [J]. IEEE Control Systems, 2003, 23(2): 46-59.
- [18] FEYGIN D, KEEHNER M, TENDICK F. Haptic guidance; Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill [C]. Proceedings of the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002: 40-47.
- [19] MIHELJ M, NEF T, RIENER R. ARMin II - 7 DoF rehabilitation robot: Mechanics and kinematics [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007: 4120-4125.
- [20] 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人(1): 技术发展与现状 [J]. 南京信息工程大学学报, 2013, 5(1): 1-19.  
SONG AI G. Force telepresence telerobot(1); Review of the history and development [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2013, 5(1): 1-19.
- [21] DAI J, SONG AI G, WANG A. Novel magnetorheological fluid damper for passive force/torque feedback [J]. Journal of Southeast University: English, 2007, 23(1): 70-74.
- [22] CHEN D K Y, XU J, SHULL P B, et al. Tactile apparent movement as a modality for lower limb haptic feedback [C]. International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications. Springer International Publishing, 2016: 373-383.
- [23] 李莅圆, 吴涓, 宋爱国. 基于穿戴型振动触觉数据腰带的方位提示实验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(增刊2): 82-86.  
LI L Y, WU J, SONG AI G. Directional cueing experiments of wearable vibrotactile belt [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(Suppl. 2): 82-86.
- [24] OLSON J M. Tactile display landing safety and precision improvements for the Space Shuttle [D]. Auburn: Auburn University, 2003.
- [25] BERKELMAN P J, HOLLIS R L. Lorentz magnetic levitation for haptic interaction: Device design, performance, and integration with physical simulations [J]. International Journal of Robotics Research, 2000, 19(7): 644-667.
- [26] QIN H, SONG A, LIU Y, et al. Design and calibration of a new 6 DOF haptic device [J]. Sensors, 2015, 15(12): 31293-31313.
- [27] QIN H, SONG AI G, ZHAN G, et al. A multi-finger interface with MR actuators for haptic applications [J]. IEEE transactions on Haptics, 2017, PP(99): 1-1.
- [28] 陈德林, 张伟. 一种质点力反馈模型的理论及实现研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(30): 42-44.  
CHEN D L, ZHANG W. Theoretical study and implementation of force feedback model with a particle [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(30): 42-44.
- [29] MASHAYEKHI A, NAHVI A, YAZDANI M, et al. VirSense: A novel haptic device with fixed-base motors and a gravity compensation system [J]. Industrial Robot, 2014, 41(1): 37-49.
- [30] GRIFFIN J A, ZHU W H, NAM C S. The role of haptic feedback in robotic-assisted retinal microsurgery systems: A systematic review [J]. IEEE transactions on Haptics, 2017, 10(1): 94-105.
- [31] PACCHIEROTTI C, PRATTICCHIZZO D, KUCHENBECKER K J. Cutaneous feedback of fingertip deformation and vibration for palpation in robotic surgery [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2016, 63(2): 278-287.
- [32] TALASAZ A, TREJOS A L, PATEL R V. The role of direct and visual force feedback in suturing using a 7-DOF dual-arm teleoperated system [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2017, 10(2): 276-287.
- [33] WANG D X, ZHAO X H, SHI Y J, et al. Six degree-of-freedom haptic simulation of probing dental caries within a narrow oral cavity [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2016, 9(2): 279-291.
- [34] WANG D X, ZHAO X H, SHI Y J, et al. Six degree-of-freedom haptic simulation of a stringed musical instrument for triggering sounds [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2017, 10(2): 265-275.
- [35] XIONG L F, CHNG C B, CHUI C K, et al. Shared control of a medical robot with haptic guidance [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology & Surgery, 2017, 12(1): 137-147.
- [36] 冯安洋, 陈笋, 陈柏, 等. 血管介入手术中的柔性虚拟力触觉系统研究 [J]. 南京信息工程大学学报, 2014, 6(6): 520-524.  
FENG AN Y, CHEN S, CHEN B, et al. Research of haptic virtual force system in soft vascular interventional surgery [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2014, 6(6): 520-524.
- [37] 于宁波, 李思宜, 赵营泉, 等. 基于共享控制的人机灵巧力触觉交互系统设计与实现 [J]. 仪器仪表学

- 报, 2017, 38(3): 602-611.
- YU N B, LI S Y, ZHAO Y Q, et al. Design and implementation of a dexterous human-robot interaction system based on haptic shared control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (3): 602-611.
- [38] LU X, SONG AI G. Stable haptic rendering with detailed energy-compensating control[J]. Computer & Graphics, 2008, 32(5): 561-567.
- [39] LU X, ZHAO H, YE Y Q. Stable haptic rendering using a pipelined threading architecture [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9 (4): 98-103.
- [40] 李佳璐, 宋爱国, 吴涓, 等. 基于 SFS 技术的纹理力触觉再现方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 812-817.
- LI J L, SONG AI G, WU J, et al. Research on the method of haptic texture display based on SFS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 812-817.
- [41] 张小瑞, 孙伟, 朱利丰, 等. 手术仿真中基于导纳控制的力触觉形变模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(1): 114-119.
- ZHANG X R, SUN W, ZHU L F, et al. Haptic deformation model based on admittance control in virtual surgery simulation [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(1): 114-119.
- [42] SUZUKI Y, KOBAYASHI M. Air jet driven force feedback in virtual reality[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 2005, 25(1): 44-47.
- [43] SUZUKI Y, KOBAYASHI M, ISHIBASHI S. Design of force feedback utilizing air pressure toward untethered human interface [C]. Proceedings of the Extended Abstracts of the Conference on Human Factors in Computing Systems, 2002: 808-809.
- [44] GUPTA S, DAN M, PATEL S N, TAN D. AirWave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings [C]. Proceedings of the ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, 2013: 419-428.
- [45] WEISS M, SCHWARZ F, JAKUBOWSKI S, et al. Madgets: Actuating widgets on interactive tabletops [C]. Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2010: 293-302.
- [46] WEISS M, WACHARAMANOTHAM C, VOELKER S, et al. FingerFlux: Near-surface haptic feedback on tabletops [C]. Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2011: 615-620.
- [47] KARUNANAYAKA K, SIRIWARDANA S, EDIRISINGHE C, et al. Haptic mouse-enabling near surface haptics in pointing interfaces [C]. The Sixth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, 2013: 336-341.
- [48] TONG Q, YUAN Z, ZHENG M, et al. A novel magnetic levitation haptic device for augmentation of tissue stiffness perception [C]. Proceedings of the ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology, 2016: 143-152.
- [49] PICINBONO G, LOMBARDO J C, DELINGETTE H, et al. Improving realism of a surgery simulator: Linear anisotropic elasticity, complex interactions and force extrapolation [J]. Journal of Visualization & Computer Animation, 2000, 13(3): 147-167.
- [50] HU J, CHANG C Y, TARDELLA N, et al. Effectiveness of haptic feedback in open surgery simulation and training systems [J]. Studies in Health Technology & Informatics, 2006, 119(1): 213-218.
- [51] GUINAN A L, MONTANDON M N, DOXON A J, et al. Discrimination thresholds for communicating rotational inertia and torque using differential skin stretch feedback in virtual environments [C]. Proceedings of the Haptics Symposium, 2014: 277-282.
- [52] GUINAN A L, MONTANDON M N, DOXON A J, et al. An ungrounded tactile feedback device to portray force and torque-like interactions in virtual environments [C]. Proceedings of the Virtual Reality, 2014: 171-172.
- [53] WINFREE K N, GEWIRTZ J, MATHER T, et al. A high fidelity ungrounded torque feedback device: The iTorqU 2.0 [C]. Proceedings of the EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems World Haptics, 2009: 261-266.

## 作者简介



陆熊(通讯作者), 分别在2000年、2003年和2008年于东南大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学自动化学院副教授, 主要研究方向为力触觉人机交互。

E-mail: luxiong@nuaa.edu.cn

**Lu Xiong** (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Southeast University in 2000, 2003 and 2008, respectively. He is currently an associate professor in College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest includes haptic rendering and human computer interaction.