

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311829

柔性触觉反馈驱动器研究进展*

于猛^{1,2}, 程祥², 彭世刚², 王鹏飞², 赵良玉¹

(1. 北京理工大学宇航学院 北京 100081; 2. 中国航天科技创新研究院 北京 100088)

摘要:触觉交互界面作为用户与系统之间的重要沟通窗口,不仅能够满足用户对简单化、自然化的人机界面的需求,也是实现直接、高效完成任务的关键因素。触觉反馈驱动器作为触觉交互过程中的核心部件,能够模拟或复现多种形式的触觉信息,提高用户在操作过程中的临场感与真实感。近年来,柔性触觉反馈驱动器凭借着其轻量、柔顺、适应性强等特点,在人机交互场景中展现了广阔的应用前景与价值。首先,根据柔性触觉反馈驱动器对皮肤刺激形式的不同分为电刺激、机械刺激、热刺激3类,并进一步重点阐述了各类驱动器的最新研究进展,主要包括了各类驱动器的驱动原理、结构设计、反馈形式等。进一步地,介绍了基于柔性触觉反馈驱动器所开发的触觉反馈设备在虚拟现实、遥操作、医疗等领域的应用。最后,对当前柔性触觉反馈驱动器所面临的问题与挑战进行了总结,并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 人机界面; 触觉反馈; 柔性驱动器; 驱动原理

中图分类号: TH145 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Recent progress on soft haptic feedback actuators

Yu Meng^{1,2}, Cheng Xiang², Peng Shigang², Wang Pengfei², Zhao Liangyu¹

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing 100088, China)

Abstract: As an important communication window between the user and the system, the haptic interface not only meets the user's need for a simple and natural human-machine interface (HMI), but is also a key factor in achieving tasks in a direct and efficient way. As the core of the haptic interactive process, the haptic feedback actuators are capable of simulating or reproducing diverse forms of haptic information to improve the immersion and realism of the user during the operation process. In recent years, soft haptic feedback actuators have gradually become a research hotspot for HMI due to their light-weight, flexible, and adaptable characteristics, offering extensive potential and value in various human-machine interaction scenarios. First, according to the different stimulation forms to the skin, soft haptic feedback actuators can be divided into three categories, electrical stimulation, mechanical stimulation, and thermal stimulation. Based on this, the recent progress of various soft haptic feedback actuators is introduced and summarized, including the actuation principle, design, and output of haptic feedback actuators. Further, the applications of haptic feedback devices developed based on soft haptic feedback actuators in the fields of virtual reality, teleoperation, and medical implications are also presented. Finally, the current problems and challenges of soft haptic feedback actuators are summarized, and the future development trend is discussed.

Keywords: human-machine interface; haptic feedback; soft actuators; actuation principle

0 引言

人机界面作为用户与系统(特定设备、机器人或虚拟世界)之间的沟通窗口,是实现直接、高效完成任务的关键因素^[1-3]。在智能时代的背景下,传统依靠“手、眼”的交互方式无法为用户提供直观、具象化的感知,人机交互

逐渐从传统的图形用户界面过渡到更加直观、人性化的自然用户界面^[4-5]。用户只须以语言、手势、触摸、动作等自然的交流方式实现与系统之间的沟通,提高了用户与系统之间的交互质量和体验,满足了用户功效性和情感性需求。

在现实世界中,触觉是人类感知世界、认识世界的最重要、最广泛的途径之一^[6-7]。人类触觉感知主要依赖于

分布在皮肤各处的机械感受器获得,主要有 Merkel 盘、Meissner 小体、Pacinian 小体、Ruffini 小体。机械感受器按照感知面积的大小可以为 I 和 II 型;按照对刺激的响应速度可以分为 SA 和 RA 型。其中,Merkel 小体位于皮肤表层,对低频振动敏感(<5 Hz),能够传递静态或缓慢变化的机械压力,可以感受到物体边缘及空间特征;Ruffini 小体位于皮肤深层,可以感受到拉伸和静态作用力以及物体的运动或力的方向;Meissner 小体对轻触以及快速变化的响应比较敏感;Pacinian 小体能够对大范围的高频振动(40~400 Hz)做出反应^[8-9]。此外,人类还依靠皮肤中的温度感受器来获取热刺激和冷刺激,以避免损伤性温度对机体造成损伤^[10-11]。通过这些感受器的协同作用,人类可以从皮肤与物体之间的接触获得物体的形状、硬度、温度、纹理等物理信息,进而对物体产生具象的认知^[12-15]。

因此,在人机交互中增加触觉反馈设备对于增强用户的感知体验至关重要,是实现高效、沉浸式交互的关键因素。触觉反馈设备的历史可以追溯到 20 世纪 40 年代,Goertz^[16]设计的可提供力反馈的主从操作系统开启了该技术的先河,为后续触觉反馈设备在医疗、遥操作等领域的广泛应用奠定了基础。

进入 21 世纪以来,随着科学技术的发展,触觉反馈驱动器及设备呈现出便携化、柔性化、高集成度化的发展趋势。当前,触觉反馈驱动器按照主体材料模量的不同,可以分为刚性和柔性两大类。其中刚性触觉反馈驱动器主要依靠电机的旋转或振动产生的压力或振动变化为用户提供相应的触觉反馈。基于该类驱动器制作的触觉

反馈设备主要可以分为手持式、穿戴式及桌面式,如操作手柄、外骨骼手套^[17-18]及桌面式力反馈设备。尽管刚性触觉反馈设备在小型化、轻量化等方面取得了较大进展,但是在交互过程中异物感仍然较为明显。

与刚性触觉反馈驱动器相比,柔性触觉反馈驱动器凭借其轻量化以及良好的柔顺性和共形性等优势正逐渐成为人机交互领域的研究热点^[19-20]。近年来,一些学者基于软材料设计并制作多种形式的柔性触觉反馈驱动器及设备,如手套^[21-23]、衣物^[24-25]、贴片^[26-27]等,能够为用户复现或模拟压力^[28-29]、纹理^[30]、温度^[21,24]等多种类型的触觉反馈,并在虚拟现实(VR)、服务机器人、医疗服务、遥操作等领域展现出广阔的应用前景和价值^[31-35]。因此,发展能够复现真实触感的柔性触觉反馈驱动器已经成为提高人机交互效率的迫切需求与关键技术之一^[36-39]。

本文综述了当下具有代表性的柔性触觉反馈驱动器,并按照对皮肤刺激形式的不同进行分类,介绍了不同类型触觉反馈驱动器的驱动原理、结构设计、反馈形式及应用场景,并在此基础上分析了当前柔性触觉反馈驱动器所面临的问题与挑战,并对柔性触觉反馈驱动器未来的发展趋势做出展望。

1 驱动原理与反馈形式

如图 1 所示,在人机交互过程中,触觉反馈设备不仅能将用户动作转化为输入指令,还能将传统界面难以具现化的触觉信息传递给操作者,如振动、压力、温度和纹理等。并结合视觉信息和听觉信息实现了多感官互

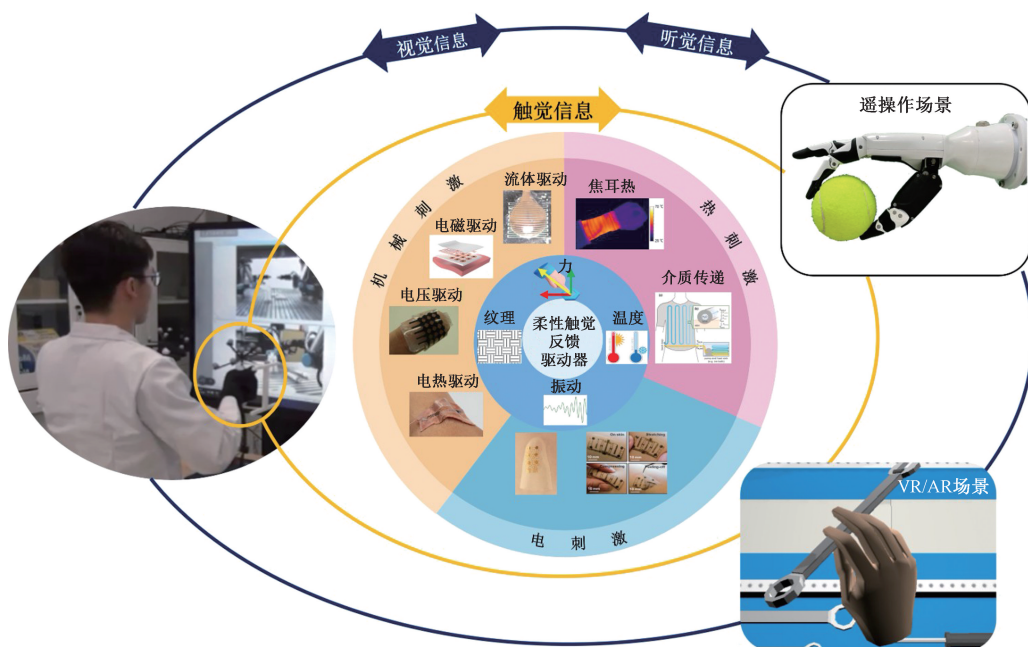


图1 触觉反馈设备在人机交互过程中的应用

Fig. 1 The implications of haptic feedback devices in human-machine interface

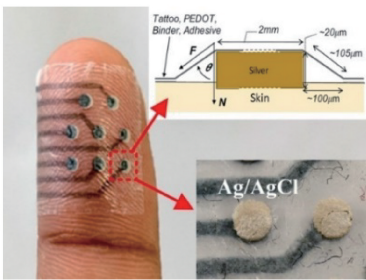
补,增强了用户操作时的真实感和沉浸体验。根据对皮肤刺激形式方式的不同,柔性触觉反馈驱动器可以分为电刺激、机械刺激及温度刺激 3 种类型。本文将对上述不同类型的柔性触觉反馈驱动器的驱动原理、常用材料、结构设计、反馈形式等方面进行介绍与总结。

1.1 电刺激

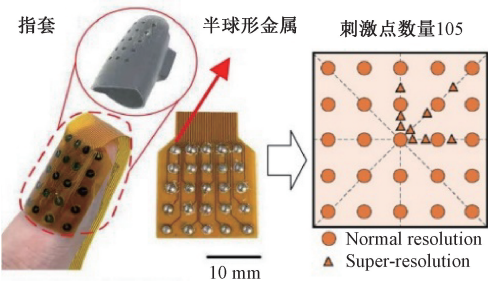
电刺激也被称为电触觉刺激,原理如图 2(a) 所示,通过对皮肤表面施加电流刺激底层神经还原触感。基于电刺激原理设计的柔性触觉反馈驱动器主要由一组或多组电极以及柔性基底组成,通过设计电极对的形状、控制输入电流波形和强度来模拟压力、振动、纹理、抚摸等形式的触感。电流大小通常小于 10 mA/cm^2 ,以避免对人体的伤害。

基于电刺激的柔性触觉反馈驱动器通常较为轻薄,能够贴附于皮肤表面。其电极通常具有一定的可拉伸性,一般使用导电凝胶^[40]或由金^[41-42]、银^[43]等材料附着于柔性材料制作而成。柔性基底一般由硅胶和 PVA 等低模量材料制作。如图 2(b) 所示,Xu 等^[41]提出了一种集成了电刺激驱动器、温度传感器和应变传感器的多功能电子皮肤,其电刺激驱动器采用同心环状电极,可随着皮肤的挤压或拉伸而变形。Withana 等^[43]采用导电银墨水制作出厚度为 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的纹身式电刺激驱动器图 2(c) 所示,可以贴附于指尖或手臂皮肤上。

尽管上述驱动器能够帮助用户在近乎无感的条件下获得触觉反馈,但是电极间的间距通常使刺激点呈现离



(c) 用于电触觉刺激的纹身式驱动器
(c) A tattoo for electro-tactile stimulation



(d) 超高分辨率可穿戴式电触觉渲染系统
(d) Super-resolution wearable electro-tactile rendering system

图 2 柔性电触觉刺激驱动器

Fig. 2 The soft electro-tactile stimulation actuators

散状态,在一定程度上减少了真实感。为了增强触觉的连续性,如图 2(d) 所示,Lin 等^[44]采用电流引导技术,通过对多个电极进行不对称控制,将指尖的刺激点从 25 个提高至 105 个,空间分辨率高达 76 点/cm^2 ,能够帮助用户获得更加精细的触觉反馈。

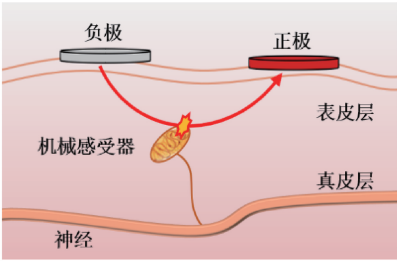
1.2 机械刺激

皮肤与目标物体的机械接触能够帮助人类获得对客观世界具象的认识与感知。机械刺激是帮助用户获得触觉感知最直观、简洁的途径。当前,按照驱动原理的不同,基于机械刺激的柔性触觉反馈驱动器主要可以分为流体驱动、电磁驱动、电压驱动和电热驱动 4 类。

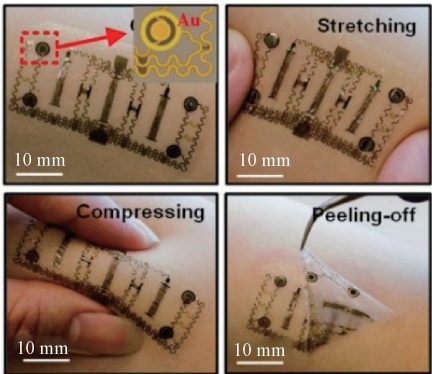
1) 流体驱动

用于触觉反馈的流体驱动器通过软材料在流体压力作用下的应变和应力输出为用户提供相应的触觉反馈,按照驱动介质的不同可以分为气体驱动和液体驱动^[45-48]。其主体通常由弹性较好、模量较低的硅胶类材料制备,内部主要包含流道以及腔室结构,通过材料或结构的非对称布置或非均匀分布实现预先设计的力或位移的输出。该类驱动器常嵌入于可穿戴设备中,如手套、衣物等,通过控制驱动器内部流体介质的压力大小及输出频率,为用户提供压力、振动等形式的触觉反馈。

气体因为质量轻、来源广、无污染等优点而被广泛应用,由气体驱动的柔性驱动器 (soft pneumatic actuator,



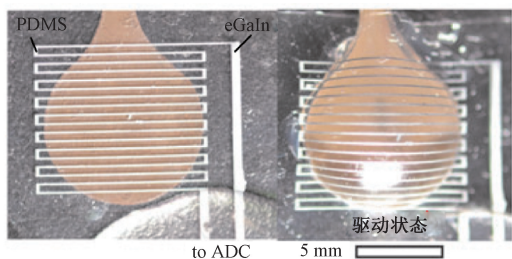
(a) 电刺激触觉反馈原理
(a) Principle of electro-tactile stimulation



(b) 具备电触觉刺激的多功能设备
(b) A multifunctional device with electro-tactile stimulation

SPA)通常制作过程简单且成本较低^[45,49]。在气体压力的作用下,SPA通常能够为用户提供明显的压力反馈($>1\text{ N}$)和振动反馈($0\sim 100\text{ Hz}$)^[28-29]。同时,为了降低由空气的可压缩性及软材料的非线性变形对输出精度的影响,Sonar等^[50]和Suh等^[51]和通过将微型传感器或柔性传感器嵌入到SPAs中实现闭环控制,提高输出精度,如图3(a)所示。此外,如图3(b)所示,Sonar等^[30]结合可塑性物体,通过控制位于用户指尖SPAs的振动实现了对物体纹理、尺寸和轮廓的反馈。然而,为实现高空间分辨率的触觉反馈,SPAs仍然需要多个阀或泵进行驱动,驱动装置难以小型化、轻量化。

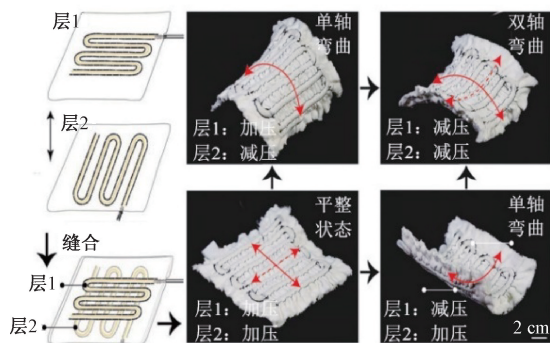
与气体相比,液体具有很好的不可压缩性,基于液体驱动的柔性触觉反馈驱动器具有能量损失少、控制精度高的优势,能够为用户提供准确且强烈的触觉感知^[15]。如图3(c)所示,Zhu等^[25]通过将空心弹性管嵌入织物之中,设计出一种基于液体驱动的织物肌肉薄片,通过对不同层空心弹性管的走向进行设计和布置可以实现弯曲、扭转、伸缩等形式的运动。该驱动器输出力可达 150 N ,可以用于手指、手腕、腿部等多个部位,能够为用户提供挤压、拉伸等形式的触觉反馈。然而,由于液体在细小通道中存在较大的阻力,该类驱动器难以获得高频率的输出和较快的响应速度,且液体的自重对驱动器的输出和穿戴的舒适性带来一定的影响。



(a) 自感知柔性气体驱动器
(a) A self-sensing SPA



(b) 使用气体驱动器实现物体形状的反馈
(b) The interactive shape generation using SPA



(c) 由液体驱动的可穿戴织物肌肉薄片
(c) Liquid driven wearable fabric muscle sheets

图3 用于触觉反馈的柔性流体驱动器

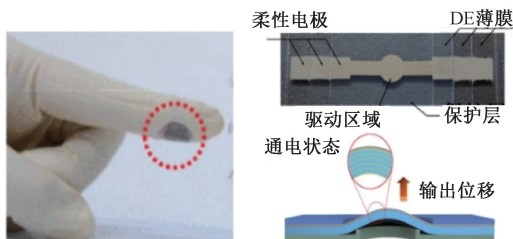
Fig.3 Soft fluidic actuators for haptic feedback

2) 电压驱动

用于触觉反馈的电压驱动器通常由电致变形材料作为驱动源。其中,介电弹性体凭借响应迅速、高能量密度等特点而广泛应用于驱动器设计(dielectrics elastomer actuator, DEA)。用于触觉反馈的DEAs通常使用PDMS、VHB、硅胶等薄膜材料作为驱动或执行部分,通过结构设计、增加约束等方法,将DE薄膜在水平面上的压缩与拉伸转换为纵向上的位移或力的输出并作用于皮肤,为用户提供力反馈和振动反馈^[52]。

DEAs具有结构简单、尺寸小、重量轻、响应频率高等优点,但是输出力及输出位移相对较小。如图4(a)所示,为了提高触觉反馈强度,一些学者通过堆叠DE薄膜的方法提高DEAs的输出力以及空间分辨率^[53-54]。然而,高达数千伏的驱动电压所带来的安全隐患在一定程度上限制了DEAs在可穿戴设备中的推广与应用。为了降低驱动电压,Ji等^[55]使用厚度 $18\text{ }\mu\text{m}$ 的DE薄膜制作出用于指尖反馈DEA,其驱动电压小于 500 V ,能够为用户提供高达 500 Hz 的振动反馈(图4(b))。Zhao等^[56]将厚度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的DE薄膜缠绕为圆柱状,将DE薄膜在电压下的变形转换为轴向位移输出,可获得高达 1 N 的力反馈。

此外,一些学者将DE薄膜在电压下的变形产生的位移和压力作为输入,实现对末端执行器的驱动,从而实



(a) 多层堆叠的HF-DEA
(a) Multi-layered DEA

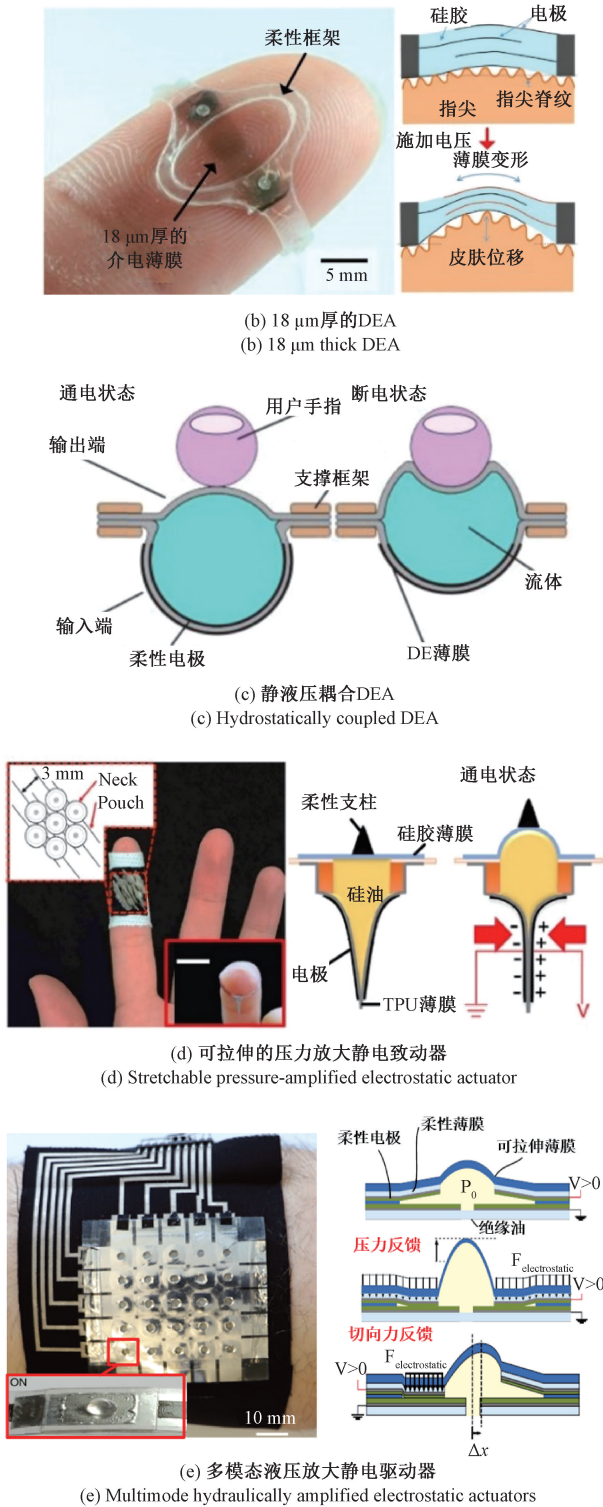


图 4 用于触觉反馈的柔性电压驱动器

Fig. 4 Soft actuator driven by voltage for haptic feedback

现对皮肤更大的作用力与位移,增强触觉感知。如图 4(c)所示,Boys 等^[57]提出一种静液压耦合 DEA,该驱动器以 DE 薄膜在驱动电压下的形变作为输入,将驱动

器封闭腔体体积变化转化为液体压力,进而传递至用户指尖帮助用户获得触觉反馈。该驱动器在 0.7~4 kV 的驱动电压下输出力变化约 0.8 N,位移约 3.5 mm。

2018 年,Acome 等^[58]提出一种液压放大自愈式静电驱动器 (hydraulically amplified self-healing electrostatic actuator, HASEL-Actuator),该驱动器主要有可变形外壳、电极和填充在薄膜内的液体电介质组成,利用帕斯卡原理使得输出位移和输出力可以得到大幅度提升。基于该驱动器,Ma 等^[59]设计了一种基于圆环状电极驱动的触觉反馈驱动器,液体电介质在驱动电压的作用下被挤压至中间区域实现对指尖的振动反馈及压力反馈,可以获得约 1.1 mm 的位移输出。如图 4(d)所示,Chen 等^[60]使用该驱动器驱动位于指尖的柔性支柱提供触觉反馈。柔性支柱间距约为 3 mm,接近于指尖皮肤对空间距离的辨别极限。此外,Leroy 等^[61]通过使用多对电极实现对液体电介质流动方向的控制,为用户指尖提供压力和切向力反馈。通过控制电极对的通电顺序,能够为用户指尖带来多种形式的触觉反馈,如从左至右、从前至后、顺时针方向的力反馈如图 4(e)所示。

尽管基于电压驱动的柔性触觉反馈驱动器已经广泛应用于触觉反馈,但该类驱动器往往依赖于电压放大器、继电器等控制元件来实现对多个驱动器的独立控制与调节,增加了设备重量、体积及成本。

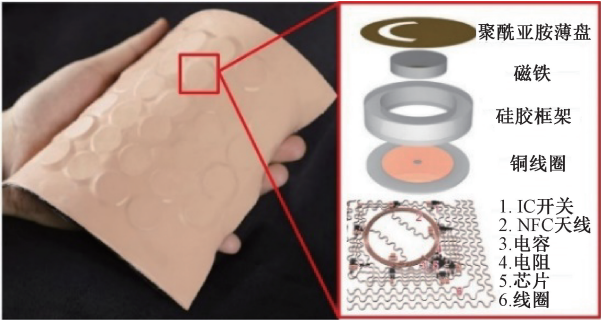
3) 电磁驱动

用于触觉反馈的电磁驱动器 (electromagnetic actuator, EMA) 一般由导电线圈、磁性材料和柔性框架组成,可以通过控制线圈中电流变化产生的洛伦兹力驱动磁体对皮肤产生机械刺激。

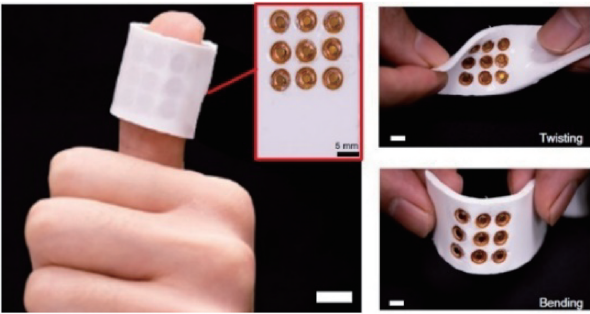
EMAs 凭借控制简单、低延时、小尺寸、低功耗等特点广泛应用于触觉界面,可以通过调节线圈中电流大小及波形实现多种形式的触觉反馈^[23,62]。如图 5(a)所示,Yu 等^[19]使用毫米级的磁铁黏附于聚酰亚胺薄膜 (Polyimide, PI) 上,设计成悬臂梁结构作为振动单元,开创性的使用 NFC 和射频技术实现了对该驱动器的无线编程及无线供电。基于该驱动器制作的贴片式触觉反馈设备可以贴附于身体不同部位,能够为用户提供高达 300 Hz 的振动反馈。Li 等^[63]将该驱动器进一步小型化,将 3×3 的阵列集成至 2 cm×2 cm 区域内,振幅可达 1.55 mm 能够为用户提供更加细腻的触觉反馈如图 5(b)所示。此外,Ozioko 等^[64]将石墨制备而成的压阻传感器黏附于永磁体上,可以通过外界压力引起的电阻变化实现对驱动器的闭环控制。该 EMA 不仅可以为用户提供触觉反馈,也可以用于压力测绘。

尽管 EMAs 具有一定的可弯曲及可拉伸特性,但磁铁、铜线圈材料本身较高的模量仍会在一定程度上限制与皮肤的共形能力。同时,为了避免由于 EMAs 中

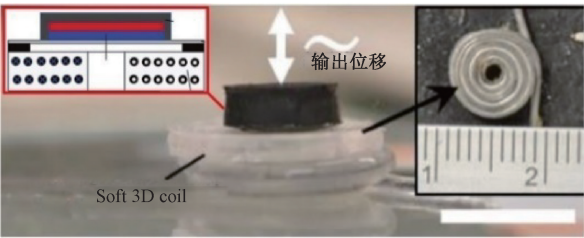
线圈与柔性材料边界产生的应力集中而引起失效,一些学者提出基于液态金属制作具备可弯曲、可拉伸特点的柔性线圈。Do 等^[65]通过滚筒涂层和模板印刷的方法,制备出由硅胶包裹的镓铟共晶合金(eGaIn)丝状导线,并将其缠绕成柱状螺旋线圈实现对永磁体的驱动如图 5(c)所示。



(a) 集成在皮肤上的无线触觉界面
(a) Skin-integrated wireless haptic interfaces



(b) 微型振动反馈驱动器
(b) Mini vibrotactile actuators



(c) 柔性线圈组成的EMA
(c) Soft EMA with 3D helical coil

图 5 用于触觉反馈的柔性电磁驱动器

Fig. 5 Soft electromagnetic actuators for haptic feedback

4) 电热驱动

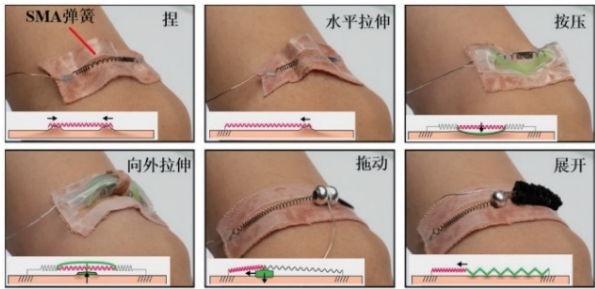
用于触觉反馈的电热驱动器(electrothermal actuator, ETA)通常使用热致变形材料作为驱动源,利用该类材料在电热作用下的形状变化实现对皮肤的刺激。

其中,形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)凭借着高力重比和良好的抗疲劳常用于 ETAs 的设计。研究人员通常将 SMA 加工成丝状并将其嵌入其他材料制作成可穿戴设备,并利用电加热使其达到相变温度,恢复为

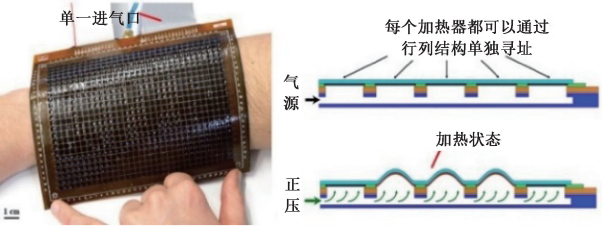
预先设计好的形状。常见的基于 SMA 制作的驱动器被设计为环状,通常应用于手腕^[66-67]或手指^[68]等部位为其提供“握”的触感。此外,还可以设计为贴片式。如图 6(a)所示,Muthukumarana 等^[27]将线状 SMA 以“之”字形均匀分布在纺织品贴片上使其能够达到均匀收缩,为用户提供剪切力反馈,通过控制加热时间和次序,可以实现捏、拉、按等多种形式的反馈。Hamdan 等^[69]依靠控制单根或多根 SMA 弹簧的收缩对驱动器末端皮肤产生不同方向的作用力,使驱动器连接处的皮肤能够获得多种形式的触感,如图 6(b)所示。



(a) 基于SMA的贴片式触觉反馈驱动器
(a) SMA based plasters for haptic feedback



(b) 基于弹簧状SMA的触觉反馈设备
(b) Haptic feedback devices with SMA springs



(c) 基于SMP的高分辨率触觉反馈设备
(c) High resolution haptic display based on SMP actuators

图 6 用于触觉反馈的柔性电热驱动器

Fig. 6 Soft electrothermal actuators for haptic feedback

此外, Besse 等^[70]基于形状记忆聚合物(shape memory polymer, SMP)提出了一种基于单一气源控制的触觉反馈驱动器,其工作原理如图 6(c)所示,可以通过控制不同行列 SMP 的温度及气体压力帮助用户获得大面积、高空间分辨率的触觉反馈。

然而,ETAs 通常存在响应时间较长、迟滞量较大以及高温烫伤等问题。为了解决这些问题,一些研究人员通过采用增加散热层的方法来提高散热效率^[27];或通过

温度传感器实现对驱动器的温度控制以避免对用户的伤害^[68];或利用神经网络实现对 SMA 变形的预测,提高控制的准确性^[71]。

1.3 温度刺激

人类对冷、热的感知对生存至关重要。温度感知不仅帮助人类避免损伤性温度对机体的损伤,也是人类认识环境及物体特性的重要途径之一。传统的人机界面通常使用颜色或数字等间接方式帮助用户了解环境或物体温度,为了提高交互过程中的沉浸感与真实感,一些学者提出了能够直接为用户皮肤提供温度反馈的触觉交互界面。

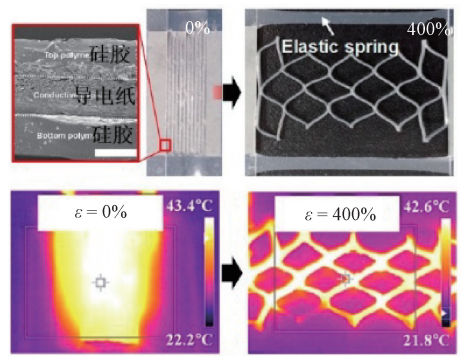
目前,常用于为用户提供温度反馈的柔性触觉反馈驱动器可以分为两类,一类为基于电流产生的热量的焦耳热驱动器(Joule heater, JH),一类则是利用介质的流动进行热传递的流体驱动器(heat transfer actuator, HTA)。

JHs 通常使用金^[72]、铜^[73]、银^[74]及液态金属^[21]等具有良好导热性、导电性的材料作为热源为用户提供热刺激。其中,金属纳米线被广泛应用于 JHs 设计且通常被包裹于柔性基底中,能够与皮肤形成较好的贴合。但较大的拉伸变形会引起该类 JHs 电阻的变化及温度的浮动^[74]。对此,一些学者通过结构设计提高 JHs 的可拉伸性及温度的稳定性。Jang 等^[75]从剪纸(Kirigami)中获得灵感,利用导电纸制作出网格状的热反馈,如图 7(a)所示。此外,Oh 等^[21]使用直写技术将 eGaIn 打印在硅胶基底上,凭借 eGaIn 在常温下的流动性制备成可拉伸的热反馈驱动器,如图 7(b)所示。该驱动器可以通过调节功率调控温度高低,为用户提供不同程度的热反馈。

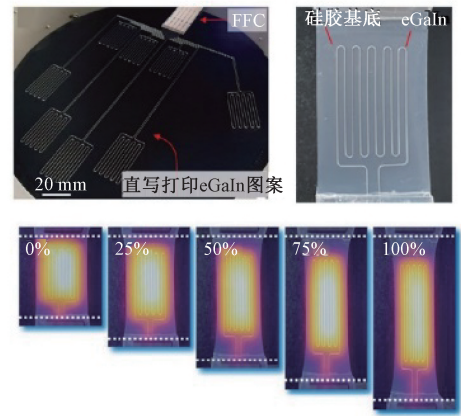
除了金属类材料,碳材料也因其高导热性被广泛应用于可穿戴设备中 JHs 的设计,如石墨烯^[76]、碳黑^[77]、碳纳米管^[78-79]等。基于碳材料的 JHs 通常具备一定的可拉伸性,可以与棉线等一起制备成大面积的可加热纺织品实现热反馈,如图 7(c)所示。

上述 JHs 凭借材料特性能够为用户提供响应迅速的热反馈,然而由于缺乏有效的散热手段不能够为用户提供在短时间内快速变化的温度反馈。且 JHs 不能为用户提供“冷”的感觉。

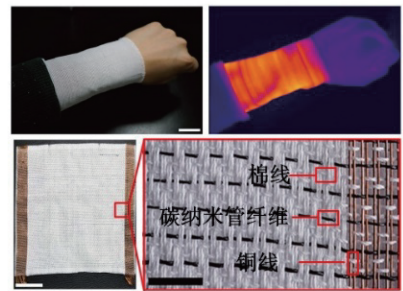
HTAs 则能够通过介质的流动将皮肤上的热量带走,能够帮助用户获得或“冷”的感觉。Goetz 等^[80]通过混合流道中来自冷-热两个水箱(15℃和45℃)的水的比例,能够为用户提供 15℃~45℃ 范围的温度反馈,如图 7(d)所示。除了利用液体进行热传递,Cai^[81]通过给混合室温空气(25℃)、冷室空气(2℃)和热室空气(68℃)为用户提供不同的温度反馈。此外,Kotagama 等^[24]设计出一款使用弹性管内水循环来调节用户体温的衣物,并通过向



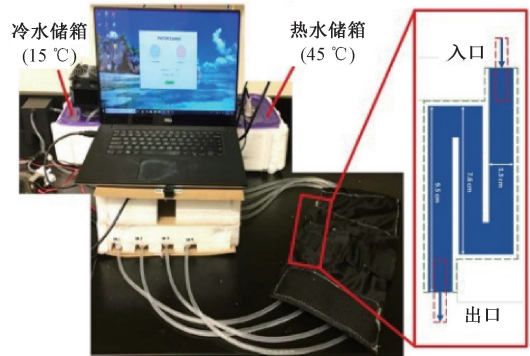
(a) 基于剪纸结构的可拉伸热反馈驱动器
(a) Stretchable heaters based on kirigami patterning



(b) 基于液态金属的热反馈驱动器
(b) A liquid metal based actuator for thermal sensation



(c) 基于碳纳米管的可拉伸热反馈驱动器
(c) Stretchable and heating carbon nanotube fiber



(d) 基于泵驱动的温度反馈装置
(d) Pump-actuated temperature feedback devices

图 7 用于温度刺激的柔性触觉反馈驱动器
Fig. 7 Soft haptic feedback actuators for thermal stimulation

硅胶材料中添加铝粉提高弹性管的热传导性能提高冷却效率。

尽管上述 HTAs 能够通过控制流体的流速或不同温度流体的比例获得较快的响应速度,拓宽了温度刺激区

间,但该类触觉反馈驱动器仍需要刚性泵及冷热流体的存储装置,极大的限制了便携性。

不同刺激形式及驱动原理的柔性触觉反馈驱动器相关参数如表 1 所示。

表 1 基于不同刺激形式及驱动原理的柔性触觉反馈驱动器相关参数

Table 1 Parameters of haptic feedback actuators based on different actuating principles

刺激形式	驱动原理	材料	尺寸参数/mm	输入	输出	文献
电刺激	-	导电凝胶	28×20; 20×15	$I<2\text{ mA}$ $T\leq 1\text{ ms}$	-	[40]
		金/PI/硅胶	$d_{\text{out}}=4$ $d_{\text{in}}=2$	$I<3\text{ mA}$ $T=0.2\text{ ms}$	-	[41]
		金/PI/硅胶	$d_{\text{out}}=2$ $d_{\text{in}}=0.8$	$<40\text{ V}$ $0\sim 120\text{ Hz}$	-	[42]
		银/PEDOT;PSS/纹身纸	$d=2$ $t<0.035$	$I<3\text{ mA}$ $T=0.2\text{ ms}$	-	[43]
机械刺激	流体驱动	硅胶	$4\leq d\leq 10$	$0\sim 20\text{ kPa}$	$F=0\sim 1.0\text{ N}$ $h\approx 4\text{ mm}$	[51]
		eGaIn/PDMS	$d=10$ $t\approx 0.5$	$0\sim 30\text{ kPa}$	$F=0\sim 1\text{ N}$ $f=0\sim 100\text{ Hz}$ $h\approx 4.5\text{ mm}$	[28]
		硅胶/PI/碳纳米管	$d=10$ $t=1.5$	$0\sim 30\text{ kPa}$	$F=0\sim 1.5\text{ N}$ $f=0\sim 20\text{ Hz}$ $h\approx 4.5\text{ mm}$	[29]
		织物/弹性管	$1\leq d\leq 30$ $30\leq L\leq 1\text{ 000}$	$0\sim 750\text{ kPa}$	$f>5\text{ Hz}$ $0\sim 50\text{ N}$	[25]
	电压驱动	硅胶/碳粉	$d=2$ $t=0.32$ 14×11	$0\sim 3.5\text{ kV}$ $0\sim 100\text{ Hz}$	$h\approx 0.47\text{ mm}$	[53]
		PDMS/银纳米线	$t\approx 0.7$	$0\sim 4\text{ kV}$	$h\approx 0.65\text{ mm}$ $0\sim 250\text{ mN}$	[54]
		PDMS/碳纳米管	$t=0.018$	$0\sim 0.45\text{ kV}$	$f=1\sim 500\text{ Hz}$	[55]
		硅胶/碳纳米管	$d=10$ $t=10$	1 kV	$F\approx 1\text{ N}$ $h\approx 0.8\text{ mm}$	[56]
		VHB/绝缘硅脂/炭黑	$d=12.5$ $t=11$	$0.7\sim 4\text{ kV}$	$F=0\sim 0.8\text{ N}$ $h=0\sim 3.5\text{ mm}$	[57]
		PDMS/绝缘油/导电胶带	$d_{\text{out}}=4$ $d_{\text{in}}=2$	$1\sim 12\text{ kV}$	$h\approx 1\text{ mm}$	[59]
		PDMS/绝缘油/铝/BOPP	$6\times 6\times 0.8$	$0\sim 1.4\text{ kV}$	$h=0\sim 0.5\text{ mm}$ $F=0\sim 300\text{ }\mu\text{N}$	[61]
	电磁驱动	永磁体/铜线圈/PDMS	$d=18$ $t=2.4$	15 mW	$f=100\sim 300\text{ Hz}$ $h=0\sim 0.3\text{ mm}$	[19]
		永磁体/铜线圈/PDMS	$d=5$ $t=1.45$	$0\sim 58\text{ mA}$	$f=50\sim 750\text{ Hz}$ $h=0\sim 1.55\text{ mm}$	[64]
		永磁体/铜线圈/硅胶	$d=10$ $t\approx 1.3$	$0\sim 48\text{ mA}$	$h\approx 0.12\text{ mm}$ $f=10\text{ Hz}/200\text{ Hz}$	[64]
	电热驱动	SMA 弹簧	$d_{\text{SMA}}=0.5$	$0\sim 35\text{ W}$	-	[67]
		SMA/硅胶管	$d_{\text{SMA}}=0.15$	5 V 850 mA	-	[68]
		SMA/织物	30×30 $d_{\text{SMA}}=0.15$	-	-	[27]
		SMA/硅胶	$15\times 40\sim 25\times 60$ $d_{\text{SMA}}=1.37/2.54$	500 mA	-	[69]
温度刺激	焦耳热	铜纳米线/PUA	-	$1\sim 7\text{ V}$	$25^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$	[73]
		银纳米线/SBS	$t\approx 0.4$	$0.5\sim 1\text{ V}$	$25^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$	[74]
		eGaIn/硅胶	28×40 $t=0.35$	$0.5\sim 2\text{ W}$	$25\sim 85^{\circ}\text{C}$	[21]
		导电纸(铝)/硅胶	$t\approx 0.6$	$0.3\sim 1.5\text{ V}$	$25^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$	[75]
		炭黑/织物/PU	40×30	$0\sim 20\text{ V}$	$28^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$	[77]
	介质传热	碳纳米管/铜线/棉线	130×100	$5\sim 9\text{ V}$	$38^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$	[79]
		硅胶-铝复合管	$d_{\text{in}}=2$	入口水温 20°C	-	[24]
		织物袋	$76\times 50\times 8$	冷水温度 15°C 热水温度 45°C	$15^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$	[80]
		PE	20×120 20×200	室温空气 25°C 热室空气 68°C 冷室空气 2°C	$2^{\circ}\text{C}\sim 68^{\circ}\text{C}$	[81]

注: d -直径; t -厚度; L -长度; T -脉冲持续时间; I -电流; h -位移; F -输出力; f -振动频率

2 应用领域

近年来,柔性触觉反馈设备在 VR、遥操作和医疗等领域得到了广泛应用。这些设备通过与视觉和听觉信息的融合,显著提升了用户在虚拟环境或远程作业场景中的真实感,同时也大幅增强了人机交互的信息传递效率。

在 VR 场景中,用户通常需要结合双手完成各种复杂任务,如医疗、工业培训等。因此,许多研究人员制作出手套式触觉反馈设备以实现虚拟与现实的交互。如图 8(a)所示,Oh 等^[21]基于 eGaIn 合金制作出一种具备手部姿态传感及温度反馈的触觉交互手套。该手套不仅可以将手部动作(抓、捏等)映射到虚拟手上,能够将虚拟物体的温度反馈给用户。Qi 等^[82]基于气驱触觉反馈模块和光纤传感器,设计出能够为用户提供变刚度力反馈及振动反馈的触觉反馈手套,用户可以触摸、按压、抓握、挤压、拉动各种虚拟物体,感受触觉的动态变化。而贴片式触觉反馈设备则可以按照用户需求实现身体不同位置的触觉反馈。Yu 等^[19]基于 EMA 提出的贴片式触觉反馈设备能够将相距甚远的用户的肢体互动传递给对方以满足用户的情感需求。Muthukumarana 等^[27]将基于 SMA 制作的触觉反馈设备固定在训练者前臂上提供用于指导相应的医疗操作及训练任务,如图 8(b)所示。

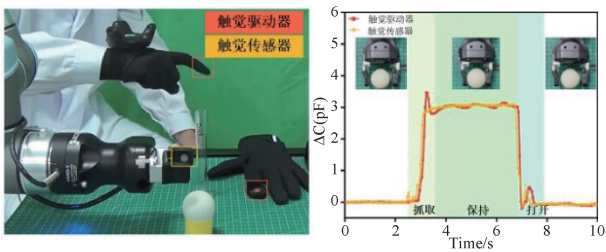
在遥操作场景中,触觉反馈设备能够实时将远端执行端与目标之间的接触信息传递给用户,这对于提升用户对作业情况认知进而提高操作精度具有重要作用,在救援、检测等领域具有广泛的应用前景。Yu 等^[29]基于



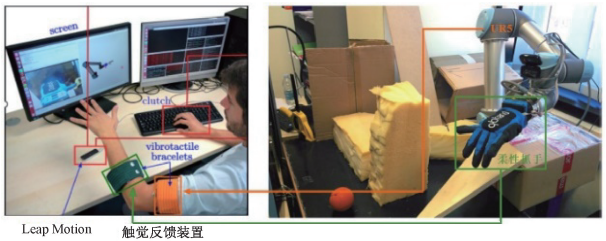
(a) 用于VR中温度反馈的触觉反馈手套
(a) A haptic feedback glove for thermal sensation in VR



(b) 用于医疗培训的触觉反馈设备
(b) A haptic feedback device for medical training in VR



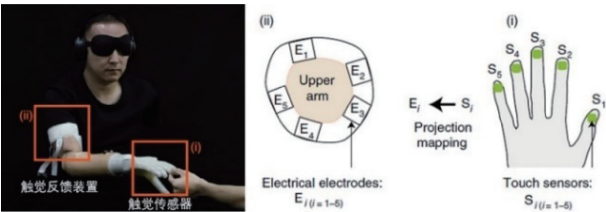
(c) 可提供指尖力反馈的触觉反馈手套
(c) A haptic feedback glove for finger force feedback



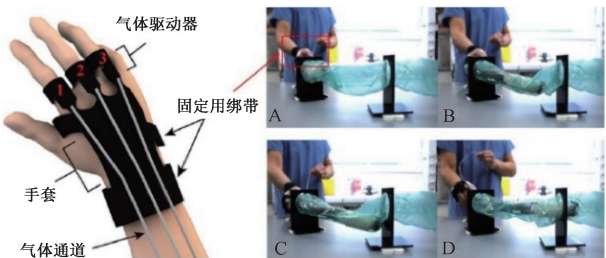
(d) 用于遥操作场景的触觉反装置
(d) Wearable vibrotactile armbands for teleoperation



(e) 帮助视障用户通过手指“看见”文字的触觉反馈设备
(e) A haptic feedback device helps visually impaired users "see" text with their fingers



(f) 用于帮助残障人士的触觉反馈设备
(f) The haptic feedback device for helping disabled people



(g) 用于结肠镜检查柔性触觉反馈手套
(g) A soft haptic feedback glove for colonoscopy procedures

图 8 柔性触觉反馈设备应用场景
Fig. 8 The implication based on soft haptic feedback devices

SPA 及柔性弯曲传感器制作出一款用于控制机械夹爪开合的触觉反馈手套,如图 8(c)所示,置于指尖的 SPA 能够

将远端机械手与目标物体的接触力传递给用户,增强了用户在遥操作过程中对执行端的感知与判断能力。Bimbo 等^[83]将两个触觉反馈驱装置佩戴在用户上臂和前臂上,分别传递机械臂和机械手的触觉信息,辅助用户远程控制机器人在复杂环境中进行抓取任务,如图 8(d)所示。

在医疗领域中,柔性触觉反馈设备凭借其轻量化和良好的柔顺性常用于提高残障人士生活质量。如图 8(e)所示,Ji 等^[55]利用 DEA 的振动反馈提示用户手指是否处于文字上方,即使在缺少视觉信息的情况下,也能帮助用户识别字母。Feng 等^[84]通将触觉反馈设备不同位置的振动信息与语音信息相结合实现盲人导航。Yu 等^[26]和 Gu 等^[85]将则通过置于用户手臂上的触觉反馈设备将假肢与物体的接触信息传递给用户,增强对假肢在捏取、抓取等动作的感知,帮助残障用户在日常生活中进行更准确的操作如图 8(f)所示。此外,柔性触觉反馈驱动器还常用于帮助医生感知机器手与手术表面的接触情况,增强医生手术时的信心和控制感^[86-87]。手术医生通过佩戴的内置触觉反馈驱动器的手套控制医疗机器人,通过这种设置,医生在使用机器精细装备进行手术能够实时获得有关手术目标处理力度的反馈。如图 8(g)所示,Gerald 等^[88]提出一种可以控制内窥镜的触觉反馈手套,能够将肠镜施加于目标上的力传递给医生。

3 发展趋势

综上所述,柔性触觉反馈驱动器已经在轻量化、多样化、集成性上已经取得显著进展,并在人机交互领域展现了巨大的应用价值与发展潜力。然而,面对人类皮肤这种近乎理想的传感器以及多种多样的应用场景和个性化需求,柔性触觉反馈驱动器在当下驱动方式、材料等因素的限制下,在反馈精度、空间分辨率、多维度等方面仍存在一定不足。若要将柔性触觉反馈驱动器及其相关技术在人机交互领域中获得进一步应用,还需要在反馈精度、空间分辨率、反馈维度等方面进一步发展。

3.1 高精度反馈

高精度的触觉反馈是提高人机交互过程中真实感以及沉浸感的必备条件。然而,当前阶段的触觉反馈距离完全还原人类触觉体验仍有较大差距。目前,对于不同类型的触觉反馈驱动器,一些学者通过如下方法提高触觉反馈驱动器的输出精度。

1) 对于电刺激触觉反馈驱动器,由于不同个体甚至同一个体不同位置对电刺激的响应是不同的,以及电极脱落、汗水腐蚀、皮肤-电极之间阻抗的变化等因素都会对电刺激产生的反馈强弱产生一定影响,使用户在相同

的输出参数下获得的体验差距较大^[89]。因此,一些学者通过提高电极稳定性,并探究感受神经、刺激参数以及皮肤-阻抗之间的关系并建立相关模型以提高电刺激触觉反馈输出的稳定性及精度^[40]。

2) 对于机械刺激触觉反馈驱动器,针对由于不同穿戴情况、气体的可压缩性及材料的非线性形变导致的输出不确定性,一些学者通过在触觉反馈驱动器中嵌入压电式、电阻式、电容式等多种形式的传感器建立闭环控制以提高触觉反馈的精度。对于基于电热驱动的触觉反馈驱动器,由于热传递的时效性引起的视觉-触觉的非同步性导致的感知偏差,一些研究人员利用神经网络对驱动器输出进行预测,提高对触感控制的准确性^[71]。

3) 对于温度刺激触觉反馈驱动器,热传导效率对于温度感知有至关重要的影响,可以通过优化材料以及结构设计提高响应速度,优化驱动器与皮肤接触区域的设计,进而实现温度的快速升降和均匀分布。

3.2 高空间分辨率

人类可以通过皮肤与物体的接触识别物体表面纹理、粗糙度等特征,获得对物体客观、具体的认知及判断。因此,发展具备高空间分辨率的触觉反馈驱动器对于还原更细腻、更真实的触感非常重要,能够提高人机交互过程中信息传递的准确性。

目前,实现高空间分辨率的触觉反馈驱动器主要依赖于电极的微型化及紧凑布置,如 DEAs 以及基于 HASEL-Actuator 设计的触觉反馈驱动器。但上述两类触觉反馈驱动器输出力普遍较小、反馈感不够明显。为了提高输出力,DEAs 通常使用增大驱动电压或堆叠 DE 薄膜的方法^[54]提高输出,但这会使电路制造过程复杂化。而基于 HASEL-Actuator 的触觉反馈驱动器则是通过改变电介质提高耐受电压^[59]进而提高输出。因此,发展能够在低电压下具备更强响应的材料或更耐高压击穿的材料是解决上述问题重要思路之一^[90-93]。此外,随着对神经-触觉机理研究的深入,电刺激触觉反馈驱动器具备为用户提供更真实、细腻触觉反馈的潜力。

另外,制造工艺的进步使得 SPAs 能够在指尖位置布置多个驱动单元实现较高的空间分辨率。且随着一些小型化、轻量化的柔性气阀或气源的提出^[48,94-95],有望能够降低 SPA 驱动装置的轻量化与便携化。

3.3 多维度触觉反馈

人类皮肤能够通过综合多维度信息进一步获得对现实世界及目标具体的认知,做出相应的判断与操作。柔性触觉反馈驱动器仍无法实现全面、多维度的触觉反馈,即能够将力、振动、温度、湿度、软硬等信息传递给用户。

现阶段,柔性触觉反馈驱动器通常使用混合驱动的方式实现多维度信息触觉反馈。Wang 等^[96]提出基于气体-电压混合驱动的触觉反馈驱动器,该驱动器能够在气压驱动下获得明显的力反馈,同时能够在电压驱动下获得较高频率的振动反馈。Zhu 等^[97]电阻加热器置于 SPA 下方,通过气体-电流驱动方式实现力反馈和温度反馈。此外,还可以通过多种触觉反馈驱动器结合的方式实现多维度触觉信息反馈。Purnendu 等^[98]利用绳驱方式通过对用户手指的限位帮助用户识别目标的软硬,通过气体驱动位于指尖的 SPA 帮助用户获得力反馈。然而,伴随着触觉反馈形式的增加,驱动装置的便携性也受到一定的影响。

当前,柔性触觉反馈驱动器的多维度触觉反馈多集中于力-振动、力-温度、力-软硬等反馈形式,对于其他更多维度的触觉反馈仍需进一步探索。如何实现单一触觉反馈驱动器输出多维度信息,或将多种驱动器集成实现多维度触觉反馈是该领域所面临的重要挑战与难题。

4 结 论

随着“以人为本”的人机交互理念不断发展,触觉反馈驱动器在人机交互中的重要性逐渐凸显。面对传统刚性触觉反馈设备结构复杂、成本高昂及交互性有限等问题,柔性触觉反馈驱动器则以低成本、良好柔顺性及反馈多样性在人机领域展示了巨大的应用潜力。当前,基于电刺激、机械刺激、温度刺激原理的柔性触觉反馈驱动器能够实现力反馈、振动反馈、温度反馈等多种形式的触觉反馈。并通过与视觉、听觉等信息的结合,实现了多通道感知互补,为用户与系统之间提供了自然且高效的人机交互方式,并广泛应用于 VR、遥操作、医疗等领域。在智能材料、人工智能、先进制造等技术的支持下,柔性触觉反馈驱动器正在朝着高精度输出、高空间分辨率、多维度信息反馈方向发展。虽然当前面临诸多技术挑战,但有理由相信,凭借研究人员的持续努力和创新,这些技术难题将被逐步克服,进一步推动柔性触觉反馈驱动器在更多领域的应用。

参考文献

- [1] ZHU M, SUN Z, ZHANG Z, et al. Haptic-feedback smart glove as a creative human-machine interface (HMI) for virtual/augmented reality applications [J]. Science Advances, 2020, 6(19): 1-15.
- [2] 宋爱国, 田磊, 倪得晶, 等. 多模态力触觉交互技术及应用 [J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(9): 1183-1197.
- [3] WANG J, LIN M F, PARK S, et al. Deformable conductors for human-machine interface [J]. Materials Today, 2018, 21(5): 508-526.
- [4] 范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考 [J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(4): 361-375.
- [5] 陶雪琼. 人机交互发展历史与趋势研究 [J]. 科技传播, 2019, 11(22): 137-139.
- [6] TAO X Q. Research on the development history and trend of human-computer interaction [J]. Public Communication of Science & Technology, 2019, 11(22): 137-139.
- [7] CULBERTSON H, SCHORR S B, OKAMURA A M. Haptics: The present and future of artificial touch sensation [J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2018, 1(1): 385-409.
- [8] YAO K, ZHOU J, HUANG Q, et al. Encoding of tactile information in hand via skin-integrated wireless haptic interface [J]. Nature Machine Intelligence, Nature Research, 2022, 4(10): 893-903.
- [9] DARGAHI J, NAJARIAN S. Human tactile perception as a standard for artificial tactile sensing: A review [J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2004, 1(1): 23.
- [10] JOHANSSON R S, FLANAGAN J R. Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2009, 10(5): 345-359.
- [11] ZHANG X. Molecular sensors and modulators of thermoreception [J]. Channels, 2015, 9(2): 73-81.
- [12] DARIAN-SMITH IAN, JOHNSON K O. Thermal sensibility and thermoreceptors [J]. Journal of Investigative Dermatology, 1977, 69(1): 146-153.
- [13] BAI H, LI S, SHEPHERD R F. Elastomeric haptic devices for virtual and augmented reality [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 1-24.
- [14] 赵璐, 刘越, 冯卓萃. 触觉再现技术研究进展 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(11): 1979.

- ZHAO L, LIU Y, MA ZH H. Research progress of tactile representation technology [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(11): 1979.
- [14] 何聪, 邵知宇, 曹志勇, 等. 振动触觉纹理再现技术研究综述[J]. 测控技术, 2020, 39(5): 21-27.
- HE C, SHAO ZH Y, CAO ZH Y, et al. Research summarization of vibrotactile rendering technology for texture[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(5): 21-27.
- [15] 吴一川, 孟欢欢, 黄启洋, 等. 面向触觉力反馈的可穿戴柔性执行器研究现状[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 244-252.
- WU Y CH, MENG H H, HUANG Q Y, et al. Research status of wearable and flexible actuators for haptic force feedback[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 244-252.
- [16] GOERTZ R C. Master-slave manipulator[Z]. Argonne National Laboratory, 1949.
- [17] ZHENG Y, WANG D, WANG Z, et al. Design of a lightweight force-feedback glove with a large workspace[J]. Engineering, Chinese Academy of Engineering, 2018, 4(6): 869-880.
- [18] SIM D, BAEK Y, CHO M, et al. Low-latency haptic open glove for immersive virtual reality interaction[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3682.
- [19] YU X, XIE Z, YU Y, et al. Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality[J]. Nature, 2019, 575(7783): 473-479.
- [20] JUNG Y H, KIM J, ROGERS J A. Skin-Integrated Vibrohaptic Interfaces for Virtual and Augmented Reality[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 2170291.
- [21] OH J, KIM S, LEE S, et al. A liquid metal based multimodal sensor and haptic feedback device for thermal and tactile sensation generation in virtual reality[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 1-10.
- [22] SONG K, KIM S H, JIN S, et al. Pneumatic actuator and flexible piezoelectric sensor for soft virtual reality glove system[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 8988.
- [23] 李兆基, 王海鹏, 阮伟华, 等. 辅助虚拟现实数据手套及电刺激力触觉增强反馈电路系统设计[J]. 电子科技, 2021, 34(3): 28-35, 42.
- LI ZH J, WANG H P, YUAN W H, et al. Circuit and system design for assisting virtual reality with data glove and electric stimulation tactile enhancement feedback[J]. Electronic Science and Technology, 2021, 34(3): 28-35, 42.
- [24] KOTAGAMA P, PHADNIS A, MANNING K C, et al. Rational design of soft, thermally conductive composite liquid-cooled tubes for enhanced personal, robotics, and wearable electronics cooling[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(7): 1800690.
- [25] ZHU M, DO T N, HAWKES E, et al. Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics[J]. Soft Robotics, 2020, 7(2): 179-197.
- [26] YU X, XIE Z, YU Y, et al. Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality[J]. Nature, Springer US, 2019, 575(7783): 473-479.
- [27] MUTHUKUMARANA S, ELVITIGALA D S, FORERO CORTES J P, et al. Touch me gently: Recreating the perception of touch using a shape-memory alloy Matrix[C]. Conference on Human Factors in Computing Systems-Proceedings, 2020: 1-12.
- [28] SONAR H A, GERRATT A P, LACOUR S P, et al. Closed-loop haptic feedback control using a self-sensing soft pneumatic actuator skin[J]. Soft Robotics, 2020, 7(1): 22-29.
- [29] YU M, CHENG X, PENG S G, et al. A self-sensing soft pneumatic actuator with closed-Loop control for haptic feedback wearable devices[J]. Materials and Design, 2022, 223(6): 111149.
- [30] SONAR H A, HUANG J L, PAIK J. Soft touch using soft pneumatic actuator: Skin as a wearable haptic feedback device[J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 3(3): 2000168.
- [31] 倪得晶, 宋爱国, 李会军. 基于虚拟现实的机器人遥操作关键技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 38(10): 2351-2363.
- NI D J, SONG AI G, LI H J. Survey on robot teleoperation based on virtual reality[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 38(10): 2351-2363.
- [32] 张风军, 戴国忠, 彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(12): 1711-1736.
- ZHANG F J, DAI G ZH, PENG X L. A survey on human-computer interaction in virtual reality [J].

- Scientia Sinica Informationis, 2016, 46 (12): 1711-1736.
- [33] 彭世刚, 王鹏飞, 程祥, 等. 交互式感知遥操作在轨服务的展望[J]. 航天控制, 2022, 40(1): 3-10.
PENG SH G, WANG P F, CHENG X, et al. Prospect of interactive sensing teleoperation on orbit service [J]. Aerospace Control, 2022, 40(1): 3-10.
- [34] BASDOGAN C, GIRAUD F, LEVESQUE V, et al. A review of surface haptics: Enabling tactile effects on touch surfaces [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2020, 13(3): 450-470.
- [35] 胡雅雯, 姜力, 杨斌. 智能上肢假肢感觉反馈研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 1-10.
HU Y W, JIANG L, YANG B. Research progress of sensory feedback for intelligent upper-limb prosthesis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 1-10.
- [36] KIM H, KWON Y, LIM H, et al. Recent advances in wearable sensors and integrated functional devices for virtual and augmented reality applications[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 2005692.
- [37] KWON S Y, PARK G, JIN H, et al. On-skin and telehaptic application of mechanically decoupled taxel array on dynamically moving and soft surfaces [J]. NPJ Flexible Electronics, Nature Research, 2022, 6(1): 98.
- [38] XU K, LU Y, TAKEI K. Flexible hybrid sensor systems with feedback functions [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 31(39): 2007436.
- [39] YANG T, KIM J R, JIN H, et al. Recent advances and opportunities of active materials for haptic technologies in virtual and augmented reality[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(39): 2008831.
- [40] AKHTAR A, SOMBECK J, BOYCE B, et al. Controlling sensation intensity for electrotactile stimulation in human-machine interfaces [J]. Science Robotics, 2018, 3(17): 9770.
- [41] XU B, AKHTAR A, LIU Y, et al. An epidermal stimulation and sensing platform for sensorimotor prosthetic control, management of lower back exertion, and electrical muscle activation [J]. Advanced Materials, 2016, 28(22): 4462-4471.
- [42] YING M, BONIFAS A P, LU N, et al. Silicon nanomembranes for fingertip electronics [J]. Nanotechnology, 2012, 23(34): 1-7.
- [43] WITHANA A, GROEGER D, STEIMLE J. Tacttoo: A thin and feel-through tattoo for on-skin tactile output[C]. Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2018: 365-378.
- [44] LIN W, ZHANG D, LEE W W, et al. Super-resolution wearable electrotactile rendering system [J]. Science Advances, 2022, 8(36): 8738.
- [45] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
WANG T M, HAO Y F, YANG X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (13): 1-13.
- [46] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [47] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
LI T F, LI G R, LIANG Y M, et al. Review of materials and structure in soft robotics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48 (4): 756-766.
- [48] 管清华, 孙健, 刘彦菊, 等. 气动软体机器人发展现状与趋势[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(7): 897-934.
GUAN Q H, SUN J, LIU Y J, et al. Status of and trends in soft pneumatic robotics [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2020, 50(7): 897-934.
- [49] 王永青, 邓建辉, 李特, 等. 软体机器人3D打印制造技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 186.
WANG Y Q, DENG J H, LI T, et al. Review of research on 3D printing manufacturing technology of soft robots [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 186.
- [50] SONAR H A, PAIK J. Soft pneumatic actuator skin with piezoelectric sensors for vibrotactile feedback [J]. Frontiers Robotics AI, 2016, 2(JAN): 1-11.
- [51] SUH C, MARGARIT J C, SONG Y S, et al. Soft pneumatic actuator skin with embedded sensors [C]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 2783-2788.
- [52] ANKIT, HO T Y K, NIRMAL A, et al. Soft actuator

- materials for electrically driven haptic interfaces [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(2): 2100061.
- [53] KOO I M, JUNG K, KOO J C, et al. Development of soft-actuator-based wearable tactile display [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(3): 549-558.
- [54] MUN S, YUN S, NAM S, et al. Electro-active polymer based soft tactile interface for wearable devices [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2018, 11(1): 15-21.
- [55] JI X, LIU X, CACUCCILOLO V, et al. Untethered feel-through haptics using 18 μm thick dielectric elastomer actuators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(39): 1-10.
- [56] ZHAO H, HUSSAIN A M, ISRAR A, et al. A wearable soft haptic communicator based on dielectric elastomer actuators[J]. *Soft Robotics*, 2020, 7(4): 451-461.
- [57] BOYS H, FREDIANI G, GHILARDI M, et al. Soft wearable non-vibratory tactile displays [C]. 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), 2018: 270-275.
- [58] ACOME E, MITCHELL S K, MORRISSEY T G, et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance [J]. *Science*, 2018, 359(6371): 61-65.
- [59] MA J, CHENG X, WANG P, et al. A haptic feedback actuator suitable for the soft wearable device[J]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, 10(24): 1-13.
- [60] YAO S S, CHEN S, CHEN Y, et al. Skin-integrated stretchable actuators toward skin-compatible haptic feedback and closed-loop human-machine interactions[J]. *NPJ Flexible Electronics, Nature Research*, 2022, DOI:10.21203/rs.3.rs-2097086/v1.
- [61] LEROY E, HINCHET R, SHEA H. Multimode hydraulically amplified electrostatic actuators for wearable haptics[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(36): 1-9.
- [62] MAO G, DRACK M, KARAMI-MOSAMMAM M, et al. Soft electromagnetic actuators [J]. *Science Advances*, 2020, 6(26): 0251.
- [63] LI D, HE J, SONG Z, et al. Miniaturization of mechanical actuators in skin-integrated electronics for haptic interfaces [J]. *Microsystems and Nanoengineering*, 2021, 7(1): 85.
- [64] OZIOKO O, KARIPOTH P, ESCOBEDO P, et al. SensAct: The soft and squishy tactile sensor with integrated flexible actuator [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(3): 1900145.
- [65] DO T N, PHAN H, NGUYEN T Q, et al. Miniature Soft electromagnetic actuators for robotic applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(18): 1-11.
- [66] SUHONEN K, VÄÄNÄNEN-VAINIO-MATTILA K, MAKELA K. User experiences and expectations of vibrotactile, thermal and squeeze feedback in interpersonal communication [C]. *British Computer Society: Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*, 2012.
- [67] GUPTA A, IRUDAYARAJ A A R, BALAKRISHNAN R. HapticClench: Investigating squeeze sensations using memory alloys [J]. *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2017: 109-117.
- [68] CHERNYSHOV G, TAG B, CAREMEL C, et al. Shape memory alloy wire actuators for soft, wearable haptic devices [C]. *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 2018: 112-119.
- [69] HAMDAN N A, WAGNER A, VOELKER S, et al. Springlets: Expressive, flexible and silent on-skin tactile interfaces [C]. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019: 1-14.
- [70] BESSE N, ROSSET S, ZARATE J J, et al. Flexible active skin: Large reconfigurable arrays of individually addressed shape memory polymer actuators [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, DOI:10.1002/admt.201700102.
- [71] MA N, SONG G, LEE H J. Position control of shape memory alloy actuators with internal electrical resistance feedback using neural networks [J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(4): 777-783.
- [72] WEBB R C, BONIFAS A P, BEHNAZ A, et al. Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin [J]. *Nature Materials*, 2013, 12(10): 938-944.
- [73] KIM D, BANG J, LEE W, et al. Highly stretchable and oxidation-resistive Cu nanowire heater for replication of the feeling of heat in a virtual world [J]. *Journal of Materials Chemistry A, Royal Society of Chemistry*, 2020, 8(17): 8281-8291.
- [74] CHOI S, PARK J, HYUN W, et al. Stretchable heater using ligand-exchanged silver nanowire nanocomposite for wearable articular thermotherapy [J]. *ACS Nano*, 2015,

- 9(6): 6626-6633.
- [75] JANG N S, KIM K H, HA S H, et al. Simple approach to high-performance stretchable heaters based on Kirigami patterning of conductive paper for wearable thermotherapy applications[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(23): 19612-19621.
- [76] LIN S Y, ZHANG T Y, LU Q, et al. High-performance graphene-based flexible heater for wearable applications[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(43): 27001-27006.
- [77] PAHALAGEDARA L R, SIRIWARDANE I W, TISSERA N D, et al. Carbon black functionalized stretchable conductive fabrics for wearable heating applications [J]. *RSC Advances*, Royal Society of Chemistry, 2017, 7(31): 19174-19180.
- [78] LUO X, WENG W, LIANG Y, et al. Multifunctional fabrics of carbon nanotube fibers[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(15): 8790-8797.
- [79] LIU P, LI Y, XU Y, et al. Stretchable and energy-efficient heating carbon nanotube fiber by designing a hierarchically helical structure [J]. *Small*, 2018, 14(4): 1-6.
- [80] GOETZ D T, OWUSU-ANTWI D K, CULBERTSON H. PATCH: Pump-actuated thermal compression haptics[C]. 2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS). IEEE, 2020: 643-649.
- [81] CAI S. ThermAirGlove?: A pneumatic glove for thermal perception and material identification in virtual reality[J]. 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2020: 248-257.
- [82] QI J, GAO F, SUN G, et al. HaptGlove—Untethered pneumatic glove for multimode haptic feedback in reality-Virtuality continuum [J]. *Advanced Science*, 2023, DOI:10.1002/advs.202301044.
- [83] BIMBO J, PACCHIEROTTI C, AGGRAVI M, et al. Teleoperation in cluttered environments using wearable haptic feedback [C]. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 3401-3408.
- [84] FENG K, LEI M, WANG X, et al. A flexible bidirectional interface with integrated multimodal sensing and haptic feedback for closed-Loop human-Machine interaction[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, DOI:10.1002/aisy.202300291.
- [85] GU G, ZHANG N, XU H, et al. A soft neuroprosthetic hand providing simultaneous myoelectric control and tactile feedback [J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2021, DOI:10.1038/s41551-021-00767-0.
- [86] KURTZ A D. Tactile feel apparatus for use with robotic operations[P]. US,650643. 2008-07-10.
- [87] TALHAN A, JEON S. Pneumatic actuation in haptic-enabled medical simulators: A review[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 3184-3200.
- [88] GERALD A, BATLIWALA R, YE J, et al. A soft robotic haptic feedback glove for colonoscopy procedures[C]. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 583-590.
- [89] YANG T H, KIM J R, JIN H, et al. Recent advances and opportunities of active materials for haptic technologies in virtual and augmented reality [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, DOI:10.1002/adfm.202008831.
- [90] JI X, LIU X, CACUCCILO V, et al. An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators [J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37):6451.
- [91] JI X, EL HAITAMI A, SORBA F, et al. Stretchable composite monolayer electrodes for low voltage dielectric elastomer actuators [J]. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2018, 261: 135-143.
- [92] GUO Y, LIU L, LIU Y, et al. Review of dielectric elastomer actuators and their applications in soft robots[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, DOI:10.1002/aisy.202000282.
- [93] GUPTA U, QIN L, WANG Y, et al. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, DOI:10.1088/1361-665X/ab3a77.
- [94] TIAN Y, LIU J, WU W, et al. Peano-Hydraulically amplified self-Healing electrostatic actuators based on a novel bilayer polymer shell for enhanced strain, load, and rotary motion [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(5): 2100239.
- [95] DITEESAWAT R S, HELPS T, TAGHAVI M, et al. Electro-pneumatic pumps for soft robotics [J]. *Science Robotics*, 2021, 6(51): 1-12.
- [96] WANG H, CHENG X, HUANG P, et al. A Soft electro-hydraulic pneumatic actuator with self-sensing capability

toward multi-modal haptic feedback [J]. Actuators, 2022, 11(3): 74.

- [97] ZHU M, SUN Z, LEE C. Soft modular glove with multimodal sensing and augmented haptic feedback enabled by materials' multifunctionalities [J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 14097-14110.
- [98] PURNENDU, HARTCHER-O' BRIEN J, MEHTA V, et al. Fingertip wearable high-resolution electrohydraulic interface for multimodal haptics [C]. 2023 IEEE World Haptics Conference (WHC). IEEE, 2023: 299-305.

作者简介



于猛, 2017 年于青岛科技大学获得学士学位, 2020 年于北京化工大学获得硕士学位, 现为北京理工大学博士研究生, 主要研究方向为触觉反馈、触觉感知。

E-mail: 3120205042@bit.edu.cn

Yu Meng received his B. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2017, and M. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interests include haptic feedback and tactile sensing.



程祥, 2012 年于北京化工大学获得学士学位, 2017 年于北京化工大学获得博士学位, 现为中国航天科技创新研究院高级工程师, 主要研究方向为人机交互操控、太空制造等。

E-mail: cxzqjxcx@163.com

Cheng Xiang received his B. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2012, and Ph. D. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2017. He is currently a senior engineer at China Academy of Aerospace Science and Innovation. His main research interests include human machine interaction and space manufacturing.



彭世刚, 2017 年于山东农业大学获得学士学位, 2020 年于北京理工大学获得硕士学位, 2023 年于中国空间技术研究院获得博士学位, 现为中国航天科技创新研究院助理研究员, 主要研究方向为机器人遥操作、在轨装配。

E-mail: luyueyangguang@163.com

Peng Shigang received his B. Sc. degree from Shandong Agricultural University in 2017, M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2020, and Ph. D. degree from China Academy of Space Technology in 2023. He is currently a research associate at China Academy of Aerospace Science and Innovation. His main research interests include teleoperation and in-orbit assembly.



王鹏飞, 2008 年于西安交通大学获得学士学位, 2014 年于西安交通大学获得博士学位, 现为中国航天科技创新研究院研究员, 主要研究方向为智能材料与结构、3D/4D 打印等。

E-mail: hvhe@163.com

Wang Pengfei received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2008, and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2014. He is currently a researcher at China Academy of Aerospace Science and Innovation. His main research interests include smart materials and structures and 3D/4D printing.



赵良玉 (通信作者), 2003 年于北京理工大学获得学士学位, 2008 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为飞行器总体设计、导航制导与控制、系统集成与仿真。

E-mail: zhaoly@bit.edu.cn

Zhao Liangyu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2003, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2008. He is currently a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include civil aircraft design, navigation guidance and control, system integration and simulation.