

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107717

面向触觉力反馈的可穿戴柔性执行器研究现状^{*}

吴一川¹, 孟欢欢¹, 黄启洋², 彭 倍¹

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731; 2. 中国工业互联网研究院, 广州 510520)

摘 要:随着最新一代电子产业在可穿戴性、轻便性、舒适性等方面的需求,近年来基于柔性电子材料的执行器设计制造技术已成为商业消费电子和科研领域关注的热点。柔性执行器由柔性材料加工制作,与刚性执行器相比具有更优的轻薄性、柔韧性和适形性,在可穿戴设备的触觉力反馈中可对皮肤产生多种深浅、节拍和加速度可控的多点作用力,协同产生捏、按、拉等触觉行为,并且整体装置轻巧便捷。分类综述针对触觉力反馈的柔性执行器技术,从主体材料和驱动原理两方面对柔性执行器的工作机制和优缺点进行总结,分析了柔性执行器在虚拟现实、教育培训、医疗辅助等领域的应用情况和潜在价值。对用于实现触觉力反馈的柔性执行器的问题和研究难点进行了总结,并得出设计出安全、舒适、美观、安静等性能优良的柔性执行器是促进未来人机交互的研究突破点。

关键词: 触觉; 力反馈; 柔性执行器; 可穿戴设备

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

Research status of wearable and flexible actuators for haptic force feedback

Wu Yichuan¹, Meng Huanhuan¹, Huang Qiyang², Peng Bei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. China Academy of Industrial Internet, Guangzhou 510520, China)

Abstract: The development of the latest generation of electronic industry has requirements of wearable, portability, comfort, etc. In recent years, the design and fabrication based on flexible actuators have become the state of the art in the field of commercial consumer electronics and scientific research. Compared with rigid actuators, flexible actuators are more portable, flexible, and easier to be conformal to human skin. With these characteristics, flexible actuators show the great potentials in human-machine interfaces, such as creating a variety of haptic feedbacks which mimic the sense of real touch (knead, press, and pull). In addition, the whole devices can be made with portable and cost-effective process. The research and development of flexible actuators used for haptic force feedback are analyzed from the functional materials and their correspondingly working principle in this review. Different working mechanisms are discussed based on their advantages and disadvantages of flexible actuators. In addition, the paper concludes the potential applications of flexible actuators in augmented reality, virtual reality, education, and medical assistance, etc. The existing difficulties of flexible actuators used to achieve haptic force feedback are also summarized. Flexible actuators with safe, comfortable, portable, beautiful, and quiet characteristics are key features to be merged with future human-machine interfaces.

Keywords: haptic; force feedback; flexible actuator; wearable device

0 引 言

人类对于事物的认知依赖于五感,即形、声、闻、味、触,其中触觉感知是我们认识世界最重要和最广泛的途径之一,通过触觉交互,人可感受到形状、纹理、压力、振

动、温度变化等^[1],从而对事物产生具象的认知。因此,具备复现或模拟触觉力交互功能的执行器逐渐发展成了当前可穿戴消费电子的关键功能单元,这种交互功能通常称为触觉力反馈。人体触觉感受的最小极限是1 mN^[2],其力的感知是基于四通道理论,即触觉力通过人体真皮层的4种机械感受器传递到神经系统:默克尔

收稿日期:2021-04-06 Received Date: 2021-04-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年基金(52005083)、四川省科技厅国际合作项目(2021YFH0067,2019YFH0017)资助

(Merkel)小体对低频敏感($<5\text{ Hz}$),传递静态或缓慢变化的机械压力;鲁菲尼(Ruffini)小体位于皮肤深层,感受皮肤的拉伸和静态作用力,覆盖面积广;迈斯纳(Meissner)小体对轻触以及快速纹理变化的响应比较敏感;帕西尼氏(Pacinian)小体对高频($40\sim 400\text{ Hz}$)的振动敏感,覆盖面积较广^[1,3-6]。4种机械小体受力范围和响应频率的特点对实现触觉力反馈的执行器设计提出了具体要求。

人体皮肤的机械特性是非线性,随人种、性别、年龄差异而不同,对触觉力反馈的研究直到现在仍存在着很大的挑战^[4]。已有的产生触觉力反馈的装置可根据主体功能材料的杨氏模量分为刚性和柔性两大类。刚性执行器主要通过电机旋转或流体充盈产生变化的压力或振动来刺激贴合皮肤部位的机械感受器,使人感受近似自然的触觉力反馈效果。刚性执行器结构设计简单,研究制作容易,在输出力度方面具有较大优势。对刚性装置产生触觉力反馈的研究前期发展迅速,如有携带式装置笔结构^[7]、穿戴式手套结构^[8-9]、穿戴式背心结构^[10-12]和针对手指触觉的结构^[13-15]。尽管刚性执行器正在往小型化和轻型化方向发展,但始终难以与肢体和皮肤做到舒适性贴合,针对不同身体部位的适应性较差,触感体验也还远达不到商业化便携式可穿戴设备的需求。随着新型柔性材料的研发和工艺的进步,柔性执行器更适合在肢体和皮肤上高度地贴合、适形以及灵活使用。随着未来轻便化可穿戴消费电子技术的进步,用户对便携式柔性器件的需求日趋增长,基于柔性材料驱动的执行器在可穿戴领域中展现出了巨大的发展前景,是未来人机交互中不可或缺的功能器件。

柔性执行器一般主要由杨氏模量在几百兆帕以下的材料组成,可将某种输入能转换成机械能作用于人体皮肤以便复现或模拟触觉感知的交互。基于柔性材料驱动功能的执行器有多种优势,通常可以结合如电磁效应、静电效应、压电效应、流体驱动等方式产生关键部件的振动或位移,并且因其轻薄柔软的特性可以使其贴合于包括平整、弯曲、扭转的肢体部位,产生作用力用以模拟自然触觉的效果。触觉力反馈在融入便携式可穿戴设备后可以涉及很多应用领域,包括环境注释、在线教育、远程触摸、游戏娱乐、残障帮扶等^[3,16],为人机交互提供除传统的语音、视觉、手势^[17]等交互模式外更直观明显的信息传递模式。柔性执行器的研究目前处于初步阶段,因而面临着许多困难和挑战。例如,可穿戴柔性执行器的施用对象是人体皮肤,所以执行器操作安全是重中之重,如何在安全电流、电压、温度等的限制下提供可靠的、可控的人体触觉力反馈体验,至今仍是一个难题;可穿戴的执行器常因内部结构复杂、线路繁乱而导致寿命不长,尽管大多装置都在实验阶段进行了测试,但在消费电子的实

用阶段,装置寿命的延长是一个可供长期研究的方向;随着新材料的不断涌现,除了追求可穿戴设备的柔性,其延展性也亟待提高,以满足类似于人体皮肤拉伸等大幅度动态工作的需求;随着性能的不断优化,作为一个轻便化可穿戴电子设备,视觉外观的美化对于成果的推广也至关重要。本文将依据执行器的柔性材料和驱动原理两个方面对多种柔性执行器的研究现状展开分类讨论,综述不同执行器面向人体触觉力反馈应用的优缺点,并对用于实现触觉力反馈的柔性执行器未来的发展趋势做出展望。

1 柔性材料

随着材料科学的发展,新兴的柔性材料凭借在杨氏模量、弹性、柔韧性、导电性、透明度等方面的不同特性,被作为基底和工作组件应用于各种便携式可穿戴装置,例如可通过自身收缩拉动与皮肤粘附的柔性硅胶,进而对皮肤产生拉伸触感^[18]。根据用于实现触觉力反馈的装置多数使用的材料可将其大致分为形状记忆合金和有机聚合物材料两类。

1.1 形状记忆合金

形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)是形状记忆性能最具代表性的材料之一,由镍钛等金属合金制成,在可穿戴装置中通常设计成微米厚度的薄片或小直径的金属丝、弹簧等,如图1(a)所示。当对其通电并达到一定相变温度时,SMA会产生平滑有力而无声的收缩运动^[14]。作为执行器,SMA具有很高的致密性、柔软性、柔韧性,同时又具备很高的输出作用力,其驱动控制电路相对简单,但也存在响应时间长、迟滞量大、能耗较高的问题^[19-21]。

SMA收缩而非振动的力输出工作模式形成了无声驱动的特点,可将其放置于用户的头部和颈部附近,而无需担心产生噪声影响体验。Spring Lets^[22]的SMA弹簧被嵌入符合人体工程学的贴纸中,通过不对称地拉伸附着点的皮肤产生定向拉伸,其驱动速度和位移由电流流动的状态和持续时间控制。如图1(b)所示,多个SMA执行器的协同组合可以模拟或近似复现捏、按、拉等多种触觉行为。如图1(c)和(d)所示,Haptic Clench提出的单个SMA弹簧可以应用于特定部位^[23],在手腕或手指上作挤压反馈的装置,采用特定生产的Flexinol弹簧来提供更大的收缩力和更小的恢复力,通过Arduino控制PWM脉冲输出用于功率控制。

1.2 有机聚合物材料

电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)是最典型的基于有机聚合物材料的柔性执行器,EAP凭借其优越的柔韧性和高驱动效率近年来备受关注,根据作用机理

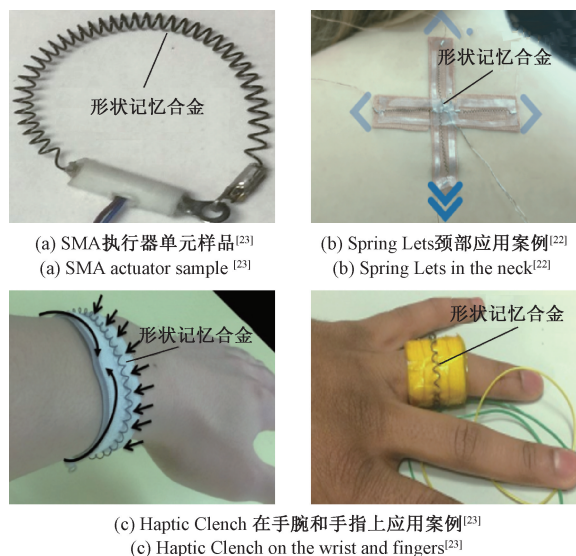


图1 基于形状记忆合金的几种执行器

Fig. 1 Several actuators based on shape memory alloys

可分为电子型和离子型。电子型 EAP 包括介电弹性体 (dielectric elastomer, DEs)、聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 等,由电场力来驱动电子的电活性,需要较高的激励电场;离子型 EAP 包括离子交换聚合金属材料 (ion-exchange polymer metal composite, IPMC)、碳纳米管 (carbon nanotubes, CNT) 等,由离子的扩散或迁移来驱动离子的电活性,施加较低的电场即可驱动。EAP 制作执行器的关键是使用合适的薄电极能够与弹性体一起变形,而不会产生相反的应力或失去导电性^[24]。

DEs 主要优点是柔性好、驱动应变大、重量轻、灵活性高、易于加工。如图 2(a) 所示,预拉伸弹性体构成的立体鞍形在电极上施加上千伏特高电压后可使鞍形执行器产生膨胀变形^[25]。类似地使用 DEs 可设计为可穿戴触觉力反馈的轻薄型柔性执行器^[26],如图 2(b) 所示,采用多层介电弹性体执行器 (dielectric elastomer actuators, DEAs) 叠加而成,在降低了电压需求的同时也增大变形幅度,执行器的电极由表面喷涂碳粉溶液制成,通过压纹图案来控制弹性体的形变形成凹面和凸面,但是低带宽是阻碍这类柔性执行器发展的一个关键问题。

另一种使用超高分子量聚乙烯纤维制成的轻型扭曲和卷曲聚合物 (TCP) 执行器^[18],借助硅胶材料的柔韧性和附着力通过自身收缩拉动与皮肤粘附的硅胶如图 2(c) 所示,进而对皮肤产生拉伸触感。同样为电子型聚合物的 PVC 对于驱动电压则要求较低,但传统 PVC 凝胶执行器输出力的可控裕度较小,不足以模拟多形式的触感^[25]。利用电活性增塑聚氯乙烯 (ePVC) 制作的具有三明治结构的柔性可弯曲振动触觉力反馈执行器,厚度均仅为 0.5 mm^[27] 如图 2(d) 所示。同一团队随后在相同

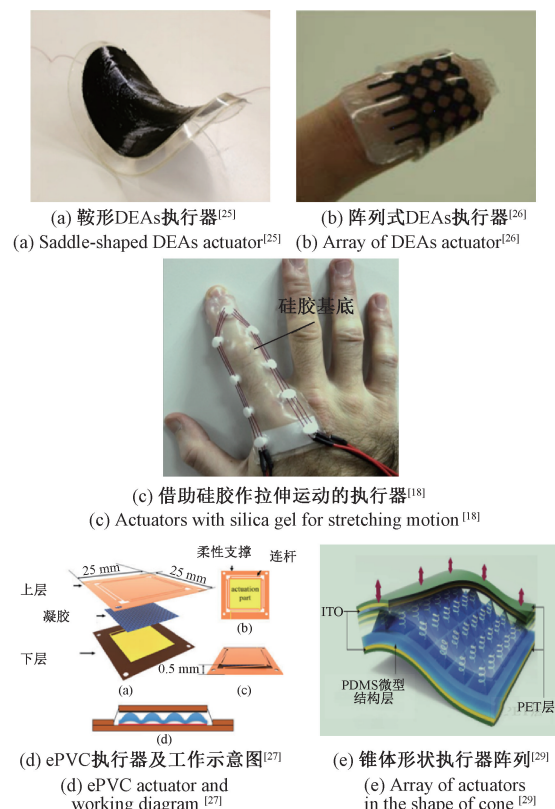


图2 几种电子型电活性聚合物执行器

Fig. 2 Several electronic electroactive polymer actuators

执行器结构的基础上又制作出一种二氧化硅增塑聚氯乙烯复合凝胶,通过改变二氧化硅纳米颗粒 (nano-silicon dioxide, SDN) 和 PVC 的配比,获得一种 ePVC-SDN 凝胶^[28],与纯 ePVC 凝胶相比,具有 SDN 的增塑 PVC 凝胶可以更有效地利用电能进行驱动,触觉力性能可以大大提高。针对大的外部载荷,如图 2(e) 所示的整体锥体形状的执行器阵列^[29]可凭借锥形结构变形时产生的弹性反力抵抗静电力,使装置的稳定性得以保持,选用硅橡胶替代增塑剂可使 PVC 执行器在更大的温度范围上保持机械性能的稳定^[30]。

离子型聚合物执行器依赖离子膜内的水分子和离子的转移产生弯曲运动,在较低的驱动电压下可产生较大的位移变形。例如 IPMC 执行器由溶剂膨胀的离子交换聚合物薄膜层压在两种薄的柔性金属之间组成,当施加偏置电压时,IPMC 向施加电压的正极方向弯曲^[31-34]。此类型的柔性执行器驱动电压较低,但响应缓慢,寿命有限。当使用水作为溶剂向 IPMC 施加直流电压时,IPMC 的松弛效应会使得 IPMC 执行器带来严重的不稳定性,现已研究出调整水含量和使用离子液体作为溶剂这两种方法来克服其松弛问题^[35-36],提高离子型电活性聚合物的寿命和响应速度仍是目前研究的重点,因为其对水分的需求限制了作为独立执行器的发展空间。

除了作为执行部件,柔性材料还常见于电极材料中。执行器整体的柔性不仅需要基底的柔软,电极材料也需具备同样的柔韧性和延展性作为配合。CNT和石墨烯都具有高导电性、高透明度和弹性大的特点,是柔性执行器常用的电极材料。CNT分散不均匀以及表面活性剂的加入增加了其导电膜的阻力,使得制备非常困难,而石墨烯电极易制备,并具有相似的高导电性所以石墨烯电极更常用于介电弹性体驱动器的制作。如两个石墨烯电极之间应用DEAP,施加电压时装置可产生凹凸变化^[37],整体厚度仅为100 μm ,试验得到其可呈现1 050 μm 的位移,最终的执行器拉伸率可达到25%^[4]。采用压印法将导电硅脂涂作柔性电极与聚氯乙烯凝胶制作的PPGA^[38],可保证形变过程中电极与执行器的实时接触,与典型的DEA结构相比,工作电压和响应时间均降低了一个数量级。

2 驱动原理

对皮肤触感的刺激方法通常可分为三大类:热刺激、电刺激和机械刺激。热刺激由于其空间分辨率低,状态转换时间较短,在人机交互中提供的信息不够丰富^[22,39-40],常作为对振动触觉反馈的辅助和增强。电刺激是利用附着在皮肤上的电极产生的电流传递到神经,使机械感受器直接产生压力和振动的感觉信号^[41]。电刺激可保留近似于裸露皮肤的自然触觉敏锐度,这是许多触觉力反馈装置无法做到的,然而电刺激的直接性也使其产生的触觉力反馈缺少一定的自然感和真实感;机械刺激则是利用机械结构接触皮肤产生物理刺激对皮肤产生直接的触觉力,这也是目前在便携式可穿戴领域中最具应用前景的人体触觉力反馈的模拟或复现方式,执行器产生机械振动的工作原理主要有以下几种。

2.1 电磁驱动

电磁驱动一般的实现方式是给线圈通交流电产生变化的磁场,使中心的永磁材料进行往复运动,从而产生机械振动。电磁执行器通常适用于低到中范围的驱动频率,可在低电压条件下产生高位移^[3]。振动作用力的调节可通过电流大小的调控完成,但多电磁执行器阵列易在工作时产生互相串扰。Pece等^[42]提出了一种将多个电磁驱动器单元嵌入3D打印的软柔性基板的方案,如图3(a)所示MagTics制造双稳态电磁闭锁结构,每个执行器单元由一个横向屏蔽磁铁推动销柱上下运动,执行器集成到表带上,可佩戴在身体许多部位上,但其寿命短、功耗高的问题有待解决。如图3(b)所示,Yu等^[43]将磁体缩小至毫米级的机械振动模拟执行器可以在更大程度上贴合不同位置的皮肤,采用NFC和射频技术对微型执行器的大型阵列进行无线编程操作是这一装置开创性的设计。Ozioko等^[44]设计的SensAct,将执行器与传感

器集成在一起,石墨制作的压阻传感器与线圈顶部的永磁铁贴合,除感应和驱动外还可实现无源自控,外界压力影响传感器的电阻值,从而改变线圈的输入电流,使执行器产生膨胀收缩运动。

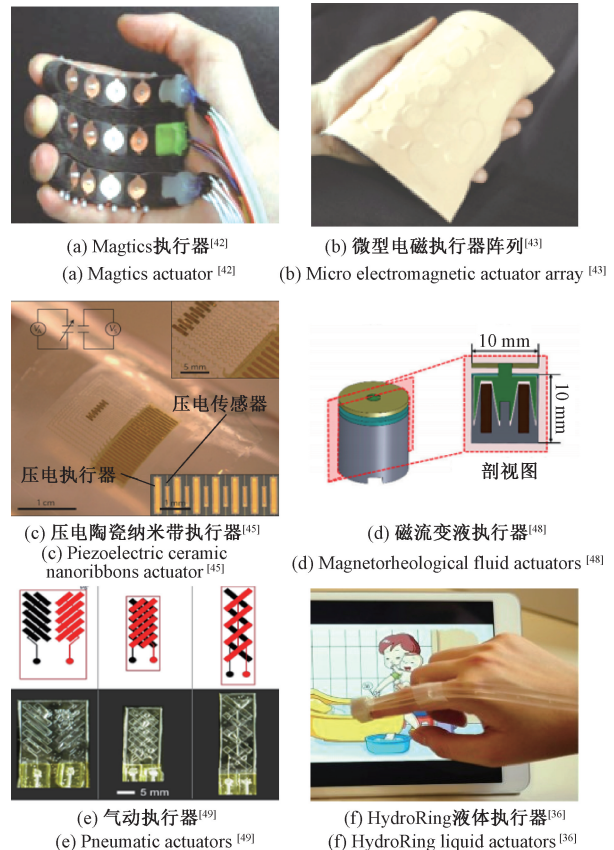


图3 产生机械刺激的几种执行器

Fig. 3 Several actuators for generating mechanical stimuli

2.2 压电驱动

利用压电材料的逆压电效应可用于高频率的接触面驱动,并能在低位移下产生较大的作用力输出,但这通常伴随较高的电压(几百伏特)输入作为驱动^[3]。不同压电材料的特性也不尽相同,尽管压电陶瓷属于刚性材料,但如图3(c)所示的装置由结构相近的7个执行器和6个传感器组成,金属电极覆盖于陶瓷制成的纳米带的上下表面,用PI封装后可进行振动的输出和力反馈测量^[45]。相比于磁致伸缩材料,新兴的聚合物材料聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)一类的压电聚合物薄膜具有频响范围宽、机械强度高特点,近年也被广泛研制作为可贴合皮肤的执行器和传感器。

2.3 磁流变驱动

流变液由固体颗粒分布在液体载体中制成,在外加电场或磁场作用下粘度会发生变化,通常有挤压、流动、剪切3种工作模式,是制作无源触觉反馈执行器常用的

一种智能材料^[46]。利用该性质制作的磁流变执行器处于外加磁场中,磁流变液(magnetocheological fluid, MRF)中的铁磁粒子沿磁通线排列,使磁流变液的刚度发生极大改变。Yong 等^[47]提出安装在鞋底的触觉反馈活塞,外界压力使活动活塞向下移动,磁流变液顺活塞孔向上流动,控制外加磁场来改变上层磁流变液的刚度,从而对脚底产生阻力来作为触觉力。其后该团队又设计了微型的磁流变触觉旋钮^[48]如图 3(d)所示,磁流变液可在轭架和柱塞之间的倾斜间隙中流动,改变线圈电流输入控制 MRF 以流动和剪切两种运动模式提供驱动。利用磁流变液制作的执行器在触觉反馈中作抵抗运动而非主动运动,故输出力的方向和大小难以控制。

2.4 流体驱动

气动系统利用正压或负压传递能量,通过腔内流体的运动输出应力和应变。气动执行器可分为弯曲运动和直线运动两种,气体作为主体可使执行器部分相比于其他驱动体积小,重量轻,但是气体驱动泵的体积通常难以做的很小。如图 3(e)所示,两个软光刻制作气囊驱动器通过背靠背键合,可引起两个相反弯曲方向的组合从而产生扭转变形^[49]。在气动系统中添加振动电机作为输出执行器,通过调节气囊气压改变粘附的执行器与皮肤间的接触力^[50],装置体积和施力点布局仍受到传统刚性振动执行器的局限。由于气体的可压缩性,驱动端的移动速度可以很快,但系统对输入信号的反应存在滞后问题。液压系统相对于气动系统可适用的输入频率高,能量损失少,驱动端的控制精度高。如图 3(f)所示, Han 等^[36]在一根薄而柔韧的乳胶管内通入液体,液体流过指尖的套环对指尖提供压力、振动和温度传递,可用于混合现实触觉技术。为使装置更好贴合皮肤管体直径需要更小,分布更密集,然而流动液体所受的毛细管力是研究设计的一大阻碍。

2.5 静电驱动

静电驱动多用于平面触觉,静电力在物体上引起的振动传递到触摸者的皮肤上即产生了触觉,DEA 工作时利用静电吸引使弹性体发生形变,将静电能转化为机械能。DEA 的驱动电压通常需要上千伏特,因此难以做到便携式高度集成。波浪形弹性体^[30]由于上下电极层的不同极性产生的静电吸引而压缩,电场消失则静电吸引消失,弹性体的回复力使执行器恢复初始状态。

2.6 混合驱动

机械刺激通过皮肤与柔性执行器之间的振动,可以模拟或复现自然的触觉表现,但由于可穿戴式机械装置的局限性使得振动输出力大小、执行器形变程度受限,难以复现皮肤触觉的原始感受。如今,将热刺激、电刺激与机械刺激融合形成混合驱动也是触觉反馈的研究热点之

一^[51],多层次的协同刺激在一定程度上可有助于使用者丰富触感体验。除了利用多种执行器协同工作,采用控制输入信号渲染可以在一定程度上提高执行器的作业能力,利用电活性聚合物执行器阵列进行拍打振动来同时刺激两种机械感受器,在无需相位控制的情况下通过波的振幅叠加实现振动幅度的最大化^[52],提高原执行器的可提供的振动力阈值,增强触感。

3 应用前景

新材料的创造发展推动了柔性执行器的研发,使得执行器门类更多样、性能更优化,相应取得的研究成果可应用的领域从医疗科技到游戏娱乐适用范围有了更大的扩展。

在虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented reality, AR)系统中应用柔性执行器,触觉的反馈可明显提高 VR 交互的准确性^[53],为使用者在视觉、听觉两个维度之外,开辟出新的体验空间——触觉感知和反馈。虚拟现实对触觉的需求已经有许多设备被设计应用,但目前此类装置大都是游戏手柄、手套、头盔等较大体积和重量的非便携式设备^[54]。如图 4(a)所示, Fang 等^[55]通过弹簧束带将使用者的手和肩膀连接起来,内置的齿轮产生阻力为使用者产生触觉感知,可以进行对虚拟木棍、琴键、塑像的触摸和抓握。小型的装置如 DextrES^[56]触觉手套通过调节内置柔性弹性金属条之间的静电吸引力产生电控摩擦力,为虚拟运动产生触觉反馈。利用电刺激就可凭借轻巧的装置产生足够的力度让使用者得到真实的感受,如通过肌肉电刺激(图 4(b))对使用者的肩膀、手臂和手腕肌肉的 8 块肌肉产生反作用力,让使用者面对大型、重型虚拟对象时有更真实的力度感受^[57]。Shi 等^[58]设计的电触觉系统如图 4(c)所示,执行界面阵列的球形电极对皮肤产生非接触静电放电,降低皮肤损伤风险的同时可实时再现虚拟的空间图案。便携式可穿戴柔性触觉反馈执行器的轻便化、柔性化在集成到可穿戴设备上后,可以增强舒适性,更容易让使用者达到人体感知维度提升的沉浸式体验。

区别于其他实践科学,医学领域存在对实践安全的高度需求。“望闻问切”意味着除了对数据信息处理的精准把控外,操作者自身对真实场景的感知对整个作业的完成也会起到很大作用。针对需要精密仪器操作的医疗手术,采用机器人替代人手,手套内置多个气囊对手部产生力反馈^[59],在利用机器精细装备的同时,实时向医生反馈手术目标的处理力度以及机器手与手术表面的接触情况。例如,模拟手术在外科手术训练中占有重要的地位,外科教育可通过穿戴式的触觉反馈装置让学习者在不进行实物处理的前提下,获得接近真实的触感实践

体验,可节约教学资源也可降低学习者因经验不足而造成手术意外的风险。触觉再现的功能用在课堂教育中如虚拟仿真教学^[60],使用双目相机与触觉力反馈装置并用,使学生在三维沉浸式体验中忽略时间与空间的阻隔,对一些珍稀不常见的事物进行近距离的接触感受,让教学活动丰富多彩。

触觉感知通道的增加让残障人士在生活中得到便捷,Ozioko等^[61]将电磁执行器和电容式传感器集成在一个设备上(如图4(d)所示),听觉、视觉存在障碍的人可将信息通过电容感测层发送,信息会以振动的形式被接受反馈给发送对象,控制振动的频率与时间就可以实现莫尔斯电码的设计,方便了聋盲人群的远距离交流。



图4 触觉力反馈执行器在几个领域的应用

Fig. 4 Application of tactile force feedback actuator in several fields

4 结 论

原有触觉力反馈装置因其刚性特点,在应用到人体皮肤表面时往往被局限在手指、手腕、背部等特定部位,由于大多此类型装置都存在体型笨重的问题,因此在控制装置尺寸的前提下产生的触觉力是有限的,使用者很难体验出接近真实的触觉力反馈。柔性执行器凭借自身的便携性、柔韧性、轻薄性,对比刚性装置可对人体皮肤实现更大程度的贴合,改善穿戴的舒适体验,对原有皮肤感受功能的影响降低,使得外加触觉与人体原有触觉可进行叠加作用。触觉力的反馈从刚性装置提供的单一性和局部作用发展到柔性设备实现的多层次性和大面积,是未来可穿戴设备的发展趋势。

柔性执行器对触觉的模拟或复现仅能做到将皮肤接触到的触觉信息反馈给人体,这对于整体环境的感知是不够的,两者需要做到双向融合的人机交互。在虚拟现实系统中,将部分实体与虚拟信息融合或可使虚拟现实系统提高真实感,在虚拟场景中布置一些有形物体可以有效地提供全局和分布式的形状感觉,但它们无法准确模拟丰富多样的触觉感觉。而单一的可穿戴触觉装置可以让使用者感知不同的触觉信息,但它们无法提供对象的动觉刺激,无法模拟物体的整体动态。将有形物体的触觉能力与可穿戴触觉技术相结合,当用户与有形物体交互时,可穿戴界面就会提供可变的振动、压力或皮肤拉伸刺激,以此让虚拟场景中的物体感觉更真实^[62]。

尽管柔性触觉执行器种类多样,但在执行器设计阶段研究人员大多侧重其功能特性,对于外观的设计优化并不过多关注。柔性执行器除了提供触觉反馈和动觉反馈外,作为一种面向人体提供穿戴功能的装置,其美观性也是未来研究的一大发展趋势。例如 chou 等研发的可拉伸变色的电子皮肤^[63]通过压力水平来控制颜色,流体驱动中融入具有观赏性的微流体界面^[64]也可作为柔性装置的多样性发展提供一个新的方向,通过视觉效果对触觉的复现进行侧面展示,可在力感知的基础上使复现的效果更为直观鲜明,富有特色。

部分柔性执行器受到驱动原理的限制,结构上不免会存在缝隙。缝隙的存在使得灰尘、液体容易对装置产生污染,从而削减设备寿命,所以执行器整体的密封设计以及各个执行器间的干扰处理可成为研究过程中的一个着眼点。许多装置因振动作业而产生的噪声也限制了执行器可应用的部位,如何将柔性执行器做到安全、安静、舒适,这些问题都是未来研究中有待探索和解决的。

参考文献

- [1] ELODIE B, GILLES B, PASCAL F, et al. "Can I touch this?": Survey of virtual reality interactions via haptic solutions[C]. IHM '20'21, 2021: 1-16.
- [2] EDIN B B, ESSICK G K, OLSSON K A, et al. Receptor encoding of moving tactile stimuli in humans. I. Temporal pattern of discharge of individual low-threshold mechanoreceptors[J]. The Journal of Neuroscience: the Official Journal of the Society for Neuroscience, 1995, 15(1 Pt 2): 830-847.
- [3] 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.
- [4] BISWAS S, VISELL Y. Emerging material technologies for haptics[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(4): 42-72.

- [5] GESHEIDER G A, VERRILLO R T, CHECKOSKY C M. Four channels mediate the mechanical aspects of touch[J]. *Acoustical Soc Amer*, 1988, 84 (5): 1680-1694.
- [6] JOHANSSON R S, VALLBO Å B. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand[J]. *Trends in Neurosciences*, 1983, 6: 27-32.
- [7] KYUNG K, LEE J, PARK J, et al. wUbi-Pen: Sensory feedback stylus interacting with graphical user interface [J]. *Teleoperators and Virtual Environments*, 2012, 21(2): 142-155.
- [8] BOUZIT M, BURDEA G, POPESCU G, et al. The rutgers master II-new design force-feedback glove [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002, 7(2): 256-263.
- [9] SZIEBIG G, SOLVANG B, KISS C, et al. Vibro-tactile feedback for VR systems [C]. *Conference on Human System Interactions*, 2009: 406-410.
- [10] TSETSERUKOU D. HaptiHug: A novel haptic display for communication of hug over a distance[C]. *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations, International Conference, EuroHaptics 2010*, 2010: 340-347.
- [11] NOVICH S D, EAGLEMAN D M. Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput[J]. *Experimental Brain Research*, 2015, 233(10): 2777-2788.
- [12] GONZALO G V, FERRE M, BREOSA J, et al. Design and development of a multimodal vest for virtual immersion and guidance[C]. *International Conference on Human Haptic Sensing & Touch Enabled Computer Applications*, 2016: 251-262.
- [13] KRON A, SCHMIDT G. Multi-fingered tactile feedback from virtual and remote environments [C]. *11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2003: 16-23.
- [14] CHINELLO F, MALVEZZI M, PACCHIEROTTI C, et al. A three DoFs wearable tactile display for exploration and manipulation of virtual objects[C]. *IEEE Haptics Symposium 2012*, 2012: 71-76.
- [15] 莫依婷, 宋爱国, 秦欢欢. 指端可穿戴式力触觉交互装置设计与评估[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(5): 161-168.
- MO Y T, SONG A I G, QIN H H. Design and evaluation of a wearable fingertip haptic interaction device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(5): 161-168.
- [16] 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]. *Science China (Information Sciences)*, 2016, 46 (12): 1711-1736.
- [17] 颜延, 邹浩, 周林, 等. 可穿戴技术的发展[J]. *中国生物医学工程学报*, 2015, 34(6): 644-653.
- YAN Y, ZOU H, ZHOU L, et al. The development of wearable technologies[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 34(6): 644-653.
- [18] CHOSSAT J B, CHEN D KY, PARK Y L, et al. Soft wearable skin-stretch device for haptic feedback using twisted and coiled polymer actuators [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, 12(4): 521-532.
- [19] CHOI S, KUCHENBECKER K J. Vibrotactile display: Perception, technology, and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(9): 2093-2104.
- [20] SOOTHER D K, DAUDPOTO J, CHOWDHRY B S. Challenges for practical applications of shape memory alloy actuators[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(7): 3001-3012.
- [21] MOHD JANI J, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities [J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 1078-1113.
- [22] HAMDAN N A H, WAGNER A, VOELKER S, et al. Springlets: Expressive, flexible and silent on-skin tactile interfaces[C]. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019: 488-501.
- [23] GUPTA A, IRUDAYARAJ A A R, BALAKRISHNAN R. HapticClench: Investigating squeeze sensations using memory alloys[C]. *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2017: 109-117.
- [24] OHALIORAN A, OMALLEY F, MCHUGH P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges [J]. *Journal of Applied Physics*. 2008, 104(7): 1101-1110.
- [25] LIANG W, CAO J, REN Q, et al. Control of dielectric elastomer soft actuators using antagonistic pairs [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 24(6): 2862-2872.
- [26] KOO I M, JONG K, KOO J C, et al. Development of soft-actuator-based wearable tactile display [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(3): 549-558.
- [27] PARK W H, BAE J W, SHIN E J, et al. Development of a flexible and bendable vibrotactile actuator based on

- wave-shaped poly (vinyl chloride)/acetyl tributyl citrate gels for wearable electronic devices[J]. *Smart Material Structures*, 2016, 25(11): 5020-5029.
- [28] PARK W H, SHIN E J, YUN S, et al. An enhanced soft vibrotactile actuator based on ePVC gel with silicon dioxide nanoparticles[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2018, 11(1): 22-29.
- [29] PYO D, RYU S, KYUNG K U, et al. High-pressure durable flexible tactile actuator based on microstructured dielectric elastomer[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(6): 1902-1905.
- [30] DO Y S, CHOI D S, SHIMOGA G, et al. Wavy silicone rubber based flexible vibrotactile actuator[C]. 2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2019), 2019: 1382-1384.
- [31] ONG Y Y. Muscle-like actuator based on ionic polymer metal composite (IPMC) [D]. Malaysia: Universiti Tunku Abdul Rahman, 2016.
- [32] CHEN D, PEI Q B. Electronic muscles and skins: A review of soft sensors and actuators [J]. *American Chemical Society*, 2017, 117(17): 11239-11268.
- [33] BAHRAMZADEH Y, SHAHINPOOR M. A review of ionic polymeric soft actuators and sensors [J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1):38-52.
- [34] KANETO K. Research trends of soft actuators based on electroactive polymers and conducting polymers [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 704: 1-9.
- [35] HAO M, WANG Y, ZHU Z, et al. A compact review of IPMC as soft actuator and sensor: Current trends, challenges, and potential solutions from our recent work[J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2019, 6: 1-7.
- [36] HAN T, ANDERSON F, IRANI P P, et al. HydroRing: Supporting mixed reality haptics using liquid flow[C]. The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. Berlin, 2018: 913-925.
- [37] KIM U, KANG J, LEE C, et al. A transparent and stretchable graphene-based actuator for tactile display[J]. *Nanotechnology*, 2013, 24 (14): 5501-5507.
- [38] LI Y, LI Y, HASHIMOTO M. Low-voltage planar PVC gel actuator with high performances [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 482-489.
- [39] IDE H, AKIMURA H, OBATA S. Effect of skin temperature on vibrotactile sensitivity [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1985, 23 (4): 306-310.
- [40] WILSON G, BREWSTER S A, HALVEY M, et al. Thermal icons: Evaluating structured thermal feedback for mobile interaction [C]. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI ' 12)*, Association for Computing Machinery, 2012: 309-312.
- [41] WITHANA A, GROEGER D, STEIMLE J. Tacttoo: A thin and feel-through tattoo for on-skin tactile output[C]. The 31st Annual ACM Symposium, 2018: 365-378.
- [42] PECE F, ZARATE J J, VECHEV V, et al. MagTics: flexible and thin form factor magnetic actuators for dynamic and wearable haptic feedback [C]. The 30th Annual ACM Symposium, 2017: 143-154.
- [43] YU X, XIE Z Q, YU Y, et al. Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality [J]. *Nature*, 2019, 575(7738): 473-479.
- [44] OZIOKO O, KARIPOTH P, DAHIYA R, et al. SensAct: The soft and squishy tactile sensor with integrated flexible actuator [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021:1900145-1900156.
- [45] CANAN D, YAN S, PADLINE J, et al. Conformal piezoelectric systems for clinical and experimental characterization of soft tissue biomechanics [J]. *Nature Materials*, 2015, 14(7): 728-736.
- [46] 戴金桥, 王爱民, 宋爱国, 等. 基于有/无源混合执行器的力觉交互装置[J]. *沈阳工业大学学报*, 2011, 33 (6): 686-690.
- DAI J Q, WANG AI M, SONG AI G, et al. Force-sensing interaction device based on passive/passive hybrid actuators [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2011, 33(6): 686-690.
- [47] YONG H H, BYEON S, KIM S Y, et al. Investigation of a haptic actuator made with magneto-rheological fluids for haptic shoes applications[J]. *Actuators*, 2020, 10(1): 5-16.
- [48] HEO YH, CHOI D S, YUN I H, et al. A tiny haptic knob based on magnetorheological fluids [J]. *Applied Sciences*. 2020, 10(15), 5118-5128.
- [49] GORISSEN B, CHISHIRO T, SHIMOMURA S, et al. Flexible pneumatic twisting actuators[C]. *Transducers & Eurosensors Xxvii: the International Conference on Solid-state Sensors*, 2013: 1687-1690.
- [50] 严余超, 宋爱国, 曹青青. 一种新型手臂力触觉反馈装置的设计与实现 [J]. *测控技术*, 2020, 39 (5): 36-40.
- YAN Y CH, SONG AI G, CAO Q Q. Design and implementation of a novel device for arm force/tactile feedback[J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(5): 36-40.

- [51] MIZUHARA R, TAKAHASHI A, KAJIMOTO H. Combination of mechanical and electrical stimulation for an intense and realistic tactile sensation [C]. The 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, 2019: 1-5.
- [52] CHOI D S, KIM S Y. Transparent film-type vibrotactile actuator array and its haptic rendering using beat phenomenon [J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3490-3500.
- [53] BENKO H, HOLZ C, SINCLAIR M, et al. NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers [C]. The 29th Annual Symposium, 2016: 717-728.
- [54] 崔洋, 包钢, 王祖温. 虚拟现实技术中力/触觉反馈的研究现状 [J]. *机床与液压*, 2008, 36(7): 1-3.
CUI Y, BAO G, WANG Z W. Research progress of haptic feedback in virtual reality [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(7): 1-3.
- [55] FANG C, ZHANG Y, DWORMAN M, et al. Wireality: Enabling complex tangible geometries in virtual reality with worn multi-string haptics [C]. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2020: 1-10.
- [56] HINCHET R, SHEA H, HILLIGES O, et al. DextrES: Wearable haptic feedback for grasping in VR via a thin form-factor electrostatic brake [C]. The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2018: 901-912.
- [57] LOPES P, YOU S, CHENG L P, et al. Providing haptics to walls & heavy objects in virtual reality by means of electrical muscle stimulation [C]. CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2017: 1-12.
- [58] SHI Y, WANG F, TIAN J, et al. Self-powered electro-tactile system for virtual tactile experiences [J]. *Science Advances*, 2021, 7(6): 2943-2953.
- [59] KURTZ A D. Tactile feel apparatus for use with robotic operations: US, 650643 [P]. 2008-07-10.
- [60] 钟正, 陈丽, 史会芳. 基于触觉反馈的沉浸式虚拟仿真实验设计 [J]. *实验科学与技术*, 2019, 17(6): 73-76.
ZHONG ZH, CHEN L, SHI H F. Design of immersive virtual simulation experiment based on haptic feedback [J]. *Experiment Science and Technology*, 2019, 17(6): 73-76.
- [61] OZIOKO O, NAVARAJ W, HERSH M, et al. Tacsac: A wearable haptic device with capacitive touch-sensing capability for tactile display [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4780-4784.
- [62] SALAZAR S V, PACCHIEROTTI C, TINGUY X D, et al. Altering the stiffness, friction, and shape perception of tangible objects in virtual reality using wearable haptics [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2020, 13(1): 167-174.
- [63] CHOU H H, NGUYEN A, CHORTOS A, et al. A chameleon-inspired stretchable electronic skin with interactive colour changing controlled by tactile sensing [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8011-8020.
- [64] WANG Y, LUO S, GONG H, et al. SKIN+: Fabricating soft fluidic user interfaces for enhancing on-skin experiences and interactions [C]. Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference, 2018: 1-6.

作者简介



吴一川, 2013 年于中国农业大学获得学士学位, 2019 年于清华大学获得博士学位, 现为电子科技大学副教授, 主要研究方向为微型机器人、柔性执行器与传感器。

E-mail: yichuanwu@uestc.edu.cn

Wu Yichuan received his B.Sc. degree from China Agricultural University in 2013, and received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2019. He is currently an associate professor at University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include small-scale robots, flexible actuators and sensors.