

【特别策划】

## 多通道人机交互中感觉刺激的模拟方法研究综述

孙凌云<sup>1,2</sup>, 王可幸<sup>1,2</sup>, 陈培<sup>1,2</sup>, 周子洪<sup>1,2</sup>, 杨昌源<sup>3</sup>, 杨光<sup>3</sup>

(1.浙江大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310013; 2.阿里巴巴-浙江大学前沿技术  
联合研究中心, 杭州 310027; 3.阿里巴巴集团, 杭州 311121)

**摘要:** **目的** 对多通道人机交互中感觉刺激模拟方法的研究现状进行梳理, 总结现有研究中的相关技术原理与方法, 为后续的相关研究和实践提供参考。**方法** 利用文献调研和典型案例分析方法, 梳理了触觉、嗅觉及味觉三种单通道感觉刺激模拟的相关技术; 概述了多通道感觉刺激融合的认知学理论, 并以视听触融合、视听嗅融合为例, 总结了多通道感觉刺激融合的具体实现方法; 介绍了多通道感觉刺激融合在医疗康复、虚拟购物、智能教育等典型场景中的应用。**结论** 多通道人机交互中感觉刺激的模拟方法研究有望支持低负荷、高效率的新型人机交互方式, 甚至带来超越真实的交互体验, 具备广泛的应用潜力。

**关键词:** 多通道人机交互; 感觉刺激模拟; 感觉刺激融合

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0081-14

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.008

### Review of Sensory Feedback Simulation Methods in Multi-modal Human-computer Interaction

SUN Ling-yun<sup>1,2</sup>, WANG Ke-xing<sup>1,2</sup>, CHEN Pei<sup>1,2</sup>, ZHOU Zi-hong<sup>1,2</sup>,  
YANG Chang-yuan<sup>3</sup>, YANG Guang<sup>3</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China;  
2. Alibaba-Zhejiang University Joint Institute of Frontier Technologies, Hangzhou 310027, China;  
3. Alibaba Group, Hangzhou 311121, China)

**ABSTRACT:** The work aims to sort out the research status of sensory feedback simulation methods in multi-modal human-computer interaction and summarize the principles and implementation methods of related techniques in existing research, so as to provide references for the subsequent research and practice. Firstly, the techniques used to simulate haptic, olfactory, and gustatory feedback were summarized respectively by reviewing literature and studying typical cases. Then, the cognitive theories about multi-modal sensory integration were outlined and the specific implementation methods were introduced by taking visual-aural-haptic and visual-aural-olfactory feedback integration as examples. Finally, the application of multi-modal sensory feedback in typical scenarios such as medical rehabilitation, virtual shopping, and intelligent education was expounded. The research of sensory feedback simulation methods in multi-modal human-computer interaction is expected to support a new type of human-computer interaction with low load and high efficiency. It can even deliver an interactive experience that goes beyond reality, representing a wide range of application potential.

**KEY WORDS:** multi-modal human-computer interaction; sensory feedback simulation; multi-modal sensory integration

人机交互界面是人与机器之间的沟通接口。随着智能时代的发展, 传统图形用户界面已经无法满足用

户需求, 自然交互界面逐渐兴起。多通道人机交互是实现自然交互的重要途径<sup>[1]</sup>, 指机器通过多个输入通

收稿日期: 2023-02-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3303300); 国家自然科学基金(62207024, 62107035)

作者简介: 孙凌云(1981—), 男, 教授, 主要研究方向为智能设计、交互设计等。

通信作者: 陈培(1996—), 女, 博士后, 主要研究方向为设计智能、人机协作等。

道采集用户数据,并通过多个输出通道向用户反馈信息。如何让机器有效地感知环境变化、识别用户意图并提供适宜的反馈,是多通道人机交互的研究重点<sup>[2]</sup>。

多年来,视觉和听觉占据着多通道人机交互领域的主导地位。随着虚拟现实等技术的发展,视听反馈由二维进入三维时代,其全方位的包围式视听效果提升了用户的沉浸式体验。然而,只提供视、听通道感觉反馈导致用户整体感知被分割,损害了用户的感受一致性。人类通过多种感官捕捉周围环境的信息,从而形成对环境的整体感知,嗅觉、味觉、触觉同样是人类感觉中不可缺少的部分。例如:一个人行走在乡间小路上时,能感受到青草和花香的气息、拂面而过的凉风、脚底石板路的触感和阳光带来的暖意。多种感觉融合的体验才是人类生活的自然状态。

多通道交互中的感觉刺激模拟指机器通过刺激人体产生触觉、嗅觉、味觉等感觉,实现特定的信息传达。近年来,机器模拟不同感觉刺激的能力不断提升<sup>[3]</sup>,有望提升人机交流的体验。然而,感觉刺激模拟相关技术在硬件设备的便携性、模拟精度等方面仍旧存在诸多局限。现有研究一方面致力于提升感觉反馈硬件相关技术;另一方面在认知科学理论指导下研究多种感觉刺激融合的机理,探索面向不同应用场景的多通道交互设计方法。

本文围绕多通道人机交互中的感觉刺激模拟方法进行综述。首先,分别介绍触觉、嗅觉、味觉三种感觉刺激模拟的相关研究,总结了现有研究的原理与分类;随后,总结了多种感觉融合相关的认知学理论及关键技术,并以视听触融合、视听嗅融合为例具体介绍了多感觉融合的研究方法。此外,介绍了感觉刺激模拟技术在虚拟购物、智能教育以及医疗康复等领域的应用。最后,总结感觉刺激模拟研究的挑战及展望。

## 1 单通道感觉刺激模拟方法

人类具有视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉五大感觉通道。在多通道人机交互领域,对视觉和听觉刺激的输出技术已经较为成熟。例如,4K 显示、全息影像、空间音效等技术已经广泛应用到人们日常生活中。相较而言,嗅觉、触觉和味觉刺激模拟技术的成熟应用较少,存在感觉刺激模拟粒度粗糙、适用场景局限等问题。本节主要介绍触觉、嗅觉和味觉模拟的相关技术及挑战。

### 1.1 触觉刺激模拟

相比于以接受信息为主的视听通道,触觉是一种主动感觉<sup>[4]</sup>,它不仅是人类感知的渠道,也能通过其反馈的及时性提高用户操作的效率。广义上的触觉主要可分为以下两个类别:第一类是皮肤触觉(Cutaneous Haptics),指人体通过皮肤所感知到的信息,例如振动、压力和温感等;第二类是动觉和本体觉(Kinesthetic

Haptics),是对身体部位的位置、运动的感知<sup>[4]</sup>。

触觉反馈设备旨在生成实时、精确的触觉刺激以作用于人体皮肤或肌肉。广泛的研究采用不同的物理方法实现了不同的触觉体验,包括使用超声波、流体致动器、形状记忆合金、压电材料、电机、静电摩擦、经皮神经电刺激、肌肉电刺激、磁场等方法或直接使用真实物品实现触觉刺激模拟。表1总结了以上触觉反馈方法的原理、特点,并提供了部分应用案例(见图1)。

在设计融合触觉通道的人机交互界面时,应充分利用触觉在环境语义上的感知能力和及时反馈的特性。人类在无意识的过程中会持续接收来自环境的信息反馈<sup>[4]</sup>,对这一特性的运用可提升虚拟场景中的用户感知效果。例如,从皮肤触觉的角度,可以利用人体对材料属性(如纹理、温度)的敏感性,对用户注意力之外的物品(如虚拟办公场景中的地面、墙面、座椅、纸张、植物等)加以细粒度的触觉设计,营造无意识下多样的环境反馈。从动觉的角度,也可通过改变物理空间中物品的位置、形态等,使用户对身体位置及运动的感知与虚拟视觉保持一致。同时,触觉反馈的及时性能够提高用户对交互操作的感知效率,实现比视听通道更加快速、认知负荷更低的信息传达模式。一方面,这一特性可作为提醒方法,以贴身设备为媒介,服务于需要快速反应的、有隐私性需求的场景,例如无声闹铃、运动训练等。另一方面,这一特性可辅助用户的主动输入,使输入模式更多样化、速度更快、操作更准确。例如,通过改变触控式控制器的形状及其表面凸起的位置,活用指尖对材质的触觉敏感性,使滑动操作的有形触觉反馈提升用户在设置参数时对程度的把握<sup>[35]</sup>;或是借由手部与其他事物(如耳机<sup>[36]</sup>、拉链<sup>[37]</sup>,或是人类自身的脸部<sup>[38-39]</sup>、指尖<sup>[40-41]</sup>)之间的触觉感知,完成基于手势及动作的输入等。

触觉还具备丰富的情感效应和社交属性。Morrison 等<sup>[42]</sup>将皮肤称之为“社交器官”,即人们在不同的社交语境下可以通过肢体接触表达安慰、爱慕、愤怒等多种情绪<sup>[43]</sup>。触觉不仅可以传达情感(情感认知)<sup>[43]</sup>,还可以引发情感(情感唤起)<sup>[44]</sup>。触觉的情感效应可在人机交互中起到两个方向的作用。一方面,用户可以作为触觉的接收者,受到来自机器的触觉刺激,从而引发情感效应。例如,Zhang 等<sup>[45]</sup>设计的隔空握手装置,可运用于线上交流系统,运用迈达斯触摸效应(Midas Touch)<sup>[46]</sup>来提升双方的印象;Yohanan 等<sup>[47]</sup>开发的触觉生物(Haptic Creature)是一个模仿小宠物的布偶型机器人,能够识别用户的抚摸模式,并给出对应的触觉反馈(如柔软耳朵的摆动、胸腔呼吸时产生的缓慢膨胀等)。另一方面,机器可通过传感器捕捉用户传递的触觉信息来识别用户的情绪。例如,Gao 等<sup>[48]</sup>通过识别游戏中用户的笔画特征来分辨用户的兴奋、放松、沮丧等情绪;Lv 等<sup>[49]</sup>通过触摸板上的压力传感器成功实现了六大类感情识别。

表 1 触觉反馈方法的原理、特点及应用案例  
Tab.1 Principles, characteristics and application cases of haptic feedback methods

| 触觉反馈方法                  | 原理                                                                                     | 特点                                           | 应用举例                                                                                                                     |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 超声波 <sup>[5]</sup>      | 依靠空气传递机械振动构建超声波阵列, 产生悬空 (Mid-air) 触觉。                                                  | 非接触式触觉, 只能作用于人体的无毛区域。                        | 手部触觉反馈系统 <sup>[6-9]</sup> 、嘴部触觉反馈系统 <sup>[10-11]</sup> 。                                                                 |
| 流体致动器 <sup>[12]</sup>   | 使用封装的气态或液态流体介质提供机械力或位移。                                                                | 可提供大范围的力反馈。致动器本身体积小, 但其配备的流体动力源可能具备相当的体积和质量。 | 触觉反馈袖套 <sup>[13]</sup> 、全身触觉反馈系统 <sup>[14]</sup> 、可穿戴重力模拟装置 <sup>[15]</sup> 。                                            |
| 形状记忆合金 <sup>[16]</sup>  | 利用形状记忆合金 (能够在升温后消除其在低温下所发生的变形的材料) 设计出不同的机械结构, 并通过控制温度变化, 来实现力反馈。                       | 体积小、无噪声, 可集成于柔性材料。                           | 辅助患者手腕运动的设备 <sup>[17]</sup> 、皮肤表面的触觉反馈系统 <sup>[18]</sup> 。                                                               |
| 压电材料 <sup>[19]</sup>    | 基于逆压电效应将电信号转变为对象的高频机械运动, 以产生振动形式的触觉反馈。                                                 | 响应快、精度高, 可集成于柔性材料。                           | 智能手机中的振动反馈、指尖触觉反馈 <sup>[20]</sup> 。                                                                                      |
| 电机 <sup>[21]</sup>      | 通过转子将电压信号转化为转速、转矩等, 从而驱动对象, 产生触觉反馈。                                                    | 成本低, 可产生振动、拉力等触觉反馈。                          | 外骨骼机器人 <sup>[21]</sup> 、掌心压力反馈 <sup>[22]</sup> 、辅助视障人群的拉力导航装置 <sup>[23]</sup> 。                                          |
| 静电摩擦 <sup>[24]</sup>    | 通过改变电压信号的频率来改变人体手指与触摸屏之间静电摩擦力的大小。                                                      | 可改变屏幕表面与手指间的摩擦力。                             | 摩擦力可变的触摸屏 TanvasTouch <sup>[25]</sup> 。                                                                                  |
| 经皮神经电刺激 <sup>[26]</sup> | 经皮神经电刺激 (Transcutaneous Electro Neural Stimulation, TENS) 使用非侵入式的方法在皮肤表面施加电刺激, 从而产生触觉。 | 穿戴时需与皮肤紧密贴合。                                 | 全身触觉反馈系统 Teslasuittes <sup>[27]</sup> 。                                                                                  |
| 肌肉电刺激 <sup>[28]</sup>   | 肌肉电刺激 (Electrical Muscle Stimulation, EMS) 在皮肤表面施加电刺激, 且作用于关键肌肉群, 引起肌肉收缩, 产生触觉反馈。      | 可引发肌肉收缩, 穿戴时需要与皮肤紧密贴合。                       | 用于教学的手指动作引导手套 <sup>[28]</sup> 。                                                                                          |
| 磁场                      | 通过磁性介质的相互作用 <sup>[29]</sup> 或电磁相互作用 <sup>[30]</sup> , 实现触觉反馈。                          | 可产生非接触式的、多方向的、精确的力反馈。                        | 基于电磁的触觉引导系统 <sup>[31]</sup> 、非接触式触觉反馈 <sup>[30-32]</sup> 、基于磁性橡胶板的触觉纹理渲染 <sup>[33]</sup> 、基于磁流体的触觉反馈屏幕 <sup>[34]</sup> 。 |



图 1 触觉刺激模拟方法  
Fig.1 Haptic sensory feedback simulation methods

在实际应用中, 应充分考虑触觉反馈硬件自身的特性与应用场景之间的配合。一方面, 根据硬件技术本身的优势及局限性来定位合适的场景, 使其应用价值最大化。例如, 将喷气反馈运用于球拍击球的场景<sup>[50]</sup>, 考虑到喷气反作用力与击球感受相似, 将设备在体积和重量上的局限性巧妙地转化为球拍击球时的打击手感。另一方面, 根据场景的定制化需求, 尝试为特定的感觉开发专用硬件设备, 实现诸如绳索连接<sup>[51]</sup>、毛发抚摸<sup>[52]</sup>、弹性振荡<sup>[53]</sup>等触觉反馈效果。

## 1.2 嗅觉刺激模拟

嗅觉被称为人类的“隐藏感觉”，但却具备最强的记忆检索能力，且与人的情感强关联<sup>[54]</sup>。狭义上的嗅觉是鼻内化学感觉，与之相关联的硬件技术从原理上可分为化学物质刺激及电刺激两类。前者通过某种化学物质产生气味分子，并引导其进入用户鼻腔，从而实现嗅觉体验<sup>[55-58]</sup>；后者通过电脉冲信号刺激鼻腔内部的气味受体，或是刺激用户大脑中与气味感知相关的区域，以此来实现嗅觉体验<sup>[59-60]</sup>。化学物质刺激方法相关研究主要解决设备在使用方式及气味扩散方式两方面的问题，已有部分研究成果成功商业化。电刺激方法的研究起步较晚，其作用机理尚不明确，但它能够实现广义上的嗅觉（例如气味源位置与方向感知、鼻腔内肌肉感觉体验等），且具备使用小体积设备实现多气味体验的潜力。

化学物质刺激方法主要通过预先调制有限的气味模块，在气味引导装置作用下为用户提供嗅觉体验。目前，相关研究主要集中于嗅觉反馈设备的设计与开发，包括桌面式设备与穿戴式设备两种。桌面式嗅觉反馈设备通常使用气流发生装置促进气味液体的蒸发，并将带有气味分子的气流传递到用户鼻腔<sup>[55]</sup>（见图 2a）。例如，Yanagida 等<sup>[61]</sup>利用面部跟踪技术识别用户鼻腔所在的空间位置，基于该位置信息调节气流轨迹，从而确保气味能够准确地扩散至用户鼻腔处。一般而言，桌面式嗅觉刺激模拟系统能够覆盖的空间范围比较有限，且便携性较差，用户必须靠近设备所在位置才能获得明显的嗅觉反馈。为了提升嗅觉刺激模拟系统的便携性，部分研究将嗅觉刺激模拟系统与头戴式显示器相结合，在虚拟现实场景中提供嗅觉反馈<sup>[62-63]</sup>。例如，Ranasinghe 等<sup>[56]</sup>将提供气味的液

体和一个小型风扇集成在头戴式显示器的外壳中，提供四种不同的嗅觉反馈（见图 2c）。此外，还有一些研究采用鼻环、唇环<sup>[57]</sup>（见图 2b）等饰品类可穿戴形式。整体而言，化学物质刺激相关研究从不同的角度提出了关于设备佩戴方式、气味扩散方式、气味浓度及方向调整等多个方面的方法和技术，但都未能解决三大局限性问题：一是气味种类的数量和气味的持续时长与设备的体积、重量变化成正比；二是设备无法回收已经输出的气味，且难以精准控制气味消失的时间；三是所有气味均是预先调制获得的，不存在类似“三原色”调色的方式来实现所有气味，无法实现真正的“数字化”。

实现嗅觉的电刺激方法可分为两种，一种方法直接刺激人类中枢大脑系统（例如使用 tDCS 方法<sup>[64]</sup>），另一种方法通过刺激人的周围神经（例如感觉器官<sup>[60]</sup>）来实现嗅觉模拟（见图 2d）。与化学刺激方法不同，电刺激不仅能引起鼻内化学感觉，还能够通过刺激相关脑区，起到唤起肌肉反应、增强大脑功能的效果<sup>[65]</sup>。例如，Brooks 等<sup>[59]</sup>通过电刺激方法成功实现了立体嗅觉，增强了使用者对气味的定位能力（见图 2e）。实现电刺激方法的硬件设备体积通常较小，也具备实现多种气味模拟的潜力，但目前研究仍旧难以通过控制不同的电刺激参数实现灵活的、细粒度的嗅觉模拟。

Obrist 等<sup>[66]</sup>总结了嗅觉通道在人机交互领域的应用效果，相关结论为嗅觉刺激在多通道交互系统中的设计方法提供了理论参考。其一，嗅觉会与某段记忆或特定的场景产生关联性，可用于增强用户的记忆能力<sup>[67]</sup>，或运用联觉的方法来渲染特定场景。例如，通过关联花香与春季场景，加强用户对春天的整体感知<sup>[56]</sup>。其二，嗅觉具备情感效应，使用不同的气味可

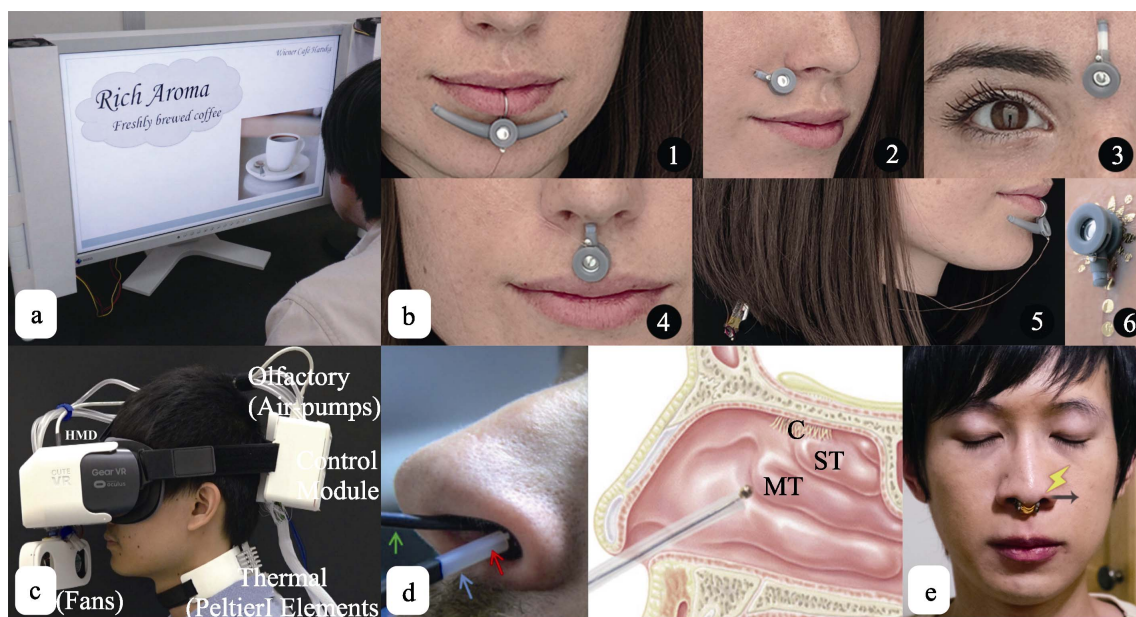


图 2 嗅觉刺激模拟方法

Fig.2 Olfactory sensory feedback simulation methods

唤醒用户不同的情感体验。例如,薄荷气味可以正向激发学习者的情绪,提升用户的学习表现<sup>[68]</sup>;温和的气味能够辅助自闭症儿童的康复治疗<sup>[69]</sup>或是缓解路怒症患者的激烈情绪<sup>[70]</sup>。其三,嗅觉提供了信息输入的渠道,可用于气味源的识别、检测或定位。例如,通过烟味源的定位方法,以提示人们潜在的危险<sup>[63]</sup>。

### 1.3 味觉刺激模拟

在感觉刺激模拟相关研究中,实现味觉刺激模拟的技术最少。由于人体的味觉感受器位于口腔内部,大部分方法表现出一定的侵入性,导致味觉模拟在多通道交互系统中的应用也受到了限制。味觉刺激模拟研究可分为两类:基于化学物质刺激的方法和基于电/热刺激的方法。前者要求用户品尝某种可食用物质从而感受其味道<sup>[71-73]</sup>;后者则采用电刺激或热刺激的方法实现味觉模拟。

基于化学物质刺激的味觉模拟方法与人类进食产生味觉的原理相同,即采用一定的引导方式使可食用物质进入用户的口腔中来产生味道。这类方法采用的可食用物质通常包括日常食品或模拟日常食品味道的物质。根据物质进入用户口腔的方式,将味觉反馈设备分为接触式和非接触式两种。目前,接触式味觉反馈设备的物质输送方式较多,例如:通过在顶端开口的塑料棒棒糖中输送具备不同味道的液体来模拟不同的糖味<sup>[72]</sup>(见图 3a)、通过直接给出多种不同

味道的糖豆让用户自行取食<sup>[73]</sup>(见图 3b)。非接触式味觉反馈设备是指无须用户直接接触设备或食物即可将食物送入用户口腔的设备。图 3c 展示了基于声悬浮技术的食物空中悬浮方法,实现了小质量物质无接触直接进入用户口腔的效果<sup>[71]</sup>。这是目前少数不具备侵入性的味觉刺激方法。

电/热刺激方法通过对舌头施加电刺激或热刺激来触发味觉感受。对于热刺激方法,通过加热或冷却舌头上的局部区域可以引起味觉<sup>[74]</sup>,例如加热舌头前缘可以唤起甜味,使之降温则能够唤起酸味或甜味。对于电刺激方法,不同的电刺激参数(如频率、振幅等)<sup>[75-76]</sup>能够给用户带来不同的味觉体验。例如,Ranasinghe 等<sup>[77]</sup>设计了一种味觉刺激装置(见图 3d),该装置由一个头部为金属球的塑料棒及一个金属片组成双电极,分别放置于用户舌头的上下方以产生电刺激,通过刺激舌头的不同区域来唤起酸、咸、苦、甜四种不同的味觉体验。电/热刺激方法在模拟味觉体验方面拥有设备体积小、味觉数量多等优势。尽管该方法目前并不能准确模拟出复杂的味觉体验,但已经能够有效诱导基础味觉(甜、酸、咸、苦、鲜等<sup>[78]</sup>)。

总体而言,使用化学物质刺激方法实现味觉体验往往会面临体积与味觉数量互相制约的两难状况,相比之下,电/热刺激方法尽管无法诱导复杂味觉,但具备体积小优势。因此,未来可考虑将两类方法相结合,有望在控制体积的前提下实现更多种类的味觉体验。

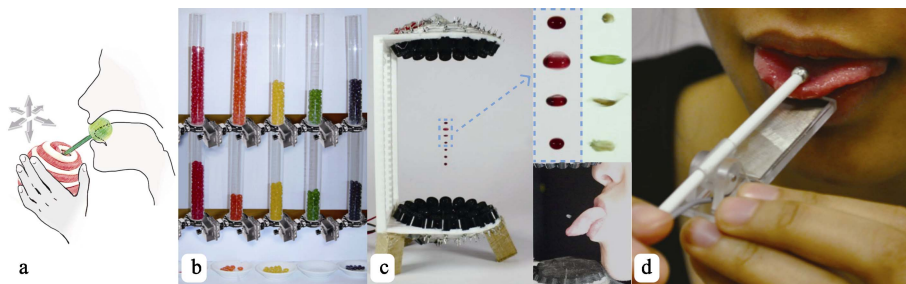


图 3 味觉刺激模拟方法

Fig.3 Gustatory sensory feedback simulation methods

## 2 多通道感觉刺激融合的原理与方法

### 2.1 相关认知科学理论总结

在认知科学和神经科学领域中关于人类感觉的相关研究为多通道感觉刺激融合方法提供了理论支持。Velasco 等<sup>[3]</sup>认为不同经历涉及的感觉类型、感觉数量及主导的感觉均有不同,并总结了在形成综合感知体验中不同感觉间的相互作用规律。以感觉过载为例,当用户被呈现过多的感觉信息时,会造成感觉过载,从而对体验造成负面影响。因此,呈现的感觉信息并不是越多越好,应使用户能够准确分辨每一种感觉信息,且所有信息要符合感觉一致性。表 2 总结了现有研究中不同感觉之间互相影响的规律。

在表 2 所提及的方法与现象中,研究人员应重点关注感觉补偿及感觉替代方法,它们能够弥补现有硬件在感觉刺激模拟上的不足。感觉补偿方法,本质来源于联觉及语义一致性现象。人类会在潜意识中将两种跨通道或同通道感觉联系起来。例如,兴奋、愤怒等高唤醒度的情绪往往与高饱和度的颜色或尖锐的形状联系在一起<sup>[79]</sup>。因此,当某种感觉模拟方法无法完全支持实际应用中的需求时,可以尝试使用其他感觉进行补偿。例如,Han 等<sup>[84]</sup>发现通过改变温度、压强,即可让用户产生湿度变化的错觉,证明了触觉通道中不同感觉间互相补足的能力。而当被补偿的感觉完全消失时(例如,无法模拟该种感觉刺激,或用户存在某种身体缺陷),则应该考虑使用感觉替代方法。

表 2 不同感觉间相互作用的规律总结  
Tab.2 Summary of the rules of interaction between different sensations

| 方法或现象                 | 含义                                              | 举例                                                                               |
|-----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 感觉一致性 <sup>[3]</sup>  | 当呈现两种或多种感觉信息时，会受到时间一致性、空间一致性、语义一致性三个方面的影响。      | 时间一致性：当视频音画不同步时，观众会感觉到异样；<br>空间一致性：认为车铃声来自最近的自行车；<br>语义一致性：人们会下意识地觉得番茄味的饼干是偏红色的。 |
| 联觉 <sup>[79]</sup>    | 部分特征（如颜色、形状、音色）在感官上存在关联性。                       | 红色常常与尖锐的、复杂的形状相关联，而蓝色则相反。                                                        |
| 感觉过载 <sup>[3]</sup>   | 当同时呈现太多的感觉信息时，用户的感官可能会过载，对体验产生负面影响。             | 早晚高峰的地铁上，存在着繁多的声音、气味等，会对用户造成负面的体验。                                               |
| 感觉补偿 <sup>[80]</sup>  | 通过增强已有感官的体验，补偿缺失感官的体验。                          | 食物所产生的嗅觉刺激可以弥补其在味觉上的不足。                                                          |
| 感觉替代 <sup>[81]</sup>  | 将一个人丢失的感觉信息转化为另一种完整的、感觉可以处理的格式，从而恢复其对感觉信息的获取能力。 | 盲文是触觉对视觉的完全替代。                                                                   |
| 情绪效应 <sup>[82]</sup>  | 不同的感觉会对人类的情绪造成不同程度的干预。                          | 明亮饱和的颜色或是怡人的气味能给人带来愉悦的感受。                                                        |
| 鸡尾酒效应 <sup>[83]</sup> | 一个人将注意中心的特定刺激与其他刺激区分开来，并过滤掉其他无关刺激的感觉能力。         | 人能够在噪音背景下分离出有效的声音信息。                                                             |

早在 19 世纪，Bach-y-Rita 等<sup>[85]</sup>就提出了使用触觉完全替代视觉的方法，并逐渐发展为感觉替代理论。该理论认为，如果将一个人丢失的信息转化为另一种完整的、感觉可以处理的格式，那么就会重新获得信息。由于人类大脑的可塑性，即便失去某一种感官，在大脑中对应感觉区域未受损的情况下，仍可能实现感觉替代。感觉替代可以发生在感觉系统之间，例如触觉对视觉的替代（如盲文）；感觉替代也可以发生在同一感觉系统之内，例如额头触感对指尖触感的替代<sup>[86]</sup>。活用感觉补偿或感觉替代方法，能够从设计角度解决技术方案的不足。

现有多通道感觉刺激融合系统多为视听通道的延伸方案，在 VR、AR 等视听交互系统的基础上，添加其他感觉通道的刺激模拟装置。下面将以视听触融合、视听嗅融合为例，介绍在认知理论支撑下的多通道感觉刺激融合的设计方法及应用方向。

2.2 视听触融合方法

视听触融合方法在视听通道的基础上添加了针对触觉的输入输出方法，能够在构建 VR 系统时提高用户的沉浸感、自然感和真实感，提升虚实空间一致性。

听触融合的多通道感觉刺激系统，一般采用 VR 技术作为视听通道的主要输出手段。针对触觉通道的融合，目前主要通过两类方法来部署触觉反馈硬件：（1）以可穿戴形式部署在用户身上；（2）以可移动方式部署在物理环境中。对于可穿戴部署形式，相关研究主要将不同形式的触觉反馈硬件附加到 VR 头戴式显示器（Head Mounted Display, HMD）上，且主要

针对用户面部提供细粒度的触觉反馈。Jingu 等<sup>[11]</sup>在 HMD 下方添加超声波阵列，为嘴部提供了多样化的触觉反馈能力，设计了诸多视听触融合的体验场景（例如，当虚拟视野中有昆虫爬到嘴上时，提供与昆虫的足位置对应的点状触感）。Wilberz 等<sup>[87]</sup>设计了基于 HMD 的机械臂，实现了多方向可移动的风、热等触觉反馈，并将其与视觉场景进行结合。例如，在瀑布的场景中使用喷雾器营造水雾的湿润触感，在篝火的场景中使用加热丝和风扇提供热风的触感。对于以物理环境为主的部署方式，相关研究主要集中于如何使物理空间的触觉反馈与虚拟空间中的视听反馈一致化，从而加强用户对虚拟空间中自身位置、运动状态等信息的感知，提升整体的真实感及空间感。RoomShift 利用扫地机器人开发了一组可移动、可升降的桌椅和薄墙，构建了一种可根据虚拟场景需要随时变更位置、改变高度的物理环境，实现了物品触觉反馈与视听反馈的一致性<sup>[88]</sup>；VR Bridges 构建了一种高度可变的桥状结构<sup>[89]</sup>，实现了非平坦地面的倾斜感知，增强了虚拟场景中高度变化时的用户体验。

研究者们经常利用联觉与语义一致性的理论来提升用户在虚拟环境中的整体感知。例如，人类往往将触觉中的“热感”与视觉中的暖色联系在一起，将“冷感”与冷色联系在一起。Günther 等<sup>[90]</sup>证明了跨通道的联觉在实际应用中的可靠性。例如，在视觉上接收到红色与火的图像时会让用户在触觉通道产生热感，而蓝色与雪花的图像则会产生冷的触觉感受。联觉现象同时也证明了感官补偿方法的有效性，即通

过一种较为成熟的感觉反馈方式能够对存在缺陷的感觉反馈方法进行补足。例如, Günther 等<sup>[91]</sup>证明了在粗糙度上视觉对触觉可产生明显的补偿效果。该研究使用了一组不同粗糙度的材质以及与之——对应的图像, 使被试者依次触摸这些材质, 并分别在有、无视觉刺激辅助的情况下对粗糙度进行排序, 结果表明有视觉帮助的组别准确率明显较高。

### 2.3 视听嗅融合方法

在传统视听交互的基础上添加嗅觉反馈通道, 需充分利用嗅觉反馈在空间分布、方向、浓度等多个层级上的渲染效果, 能够提升用户的整体感知。

视觉通道可从两个角度来辅助用户产生嗅觉体验。一方面, 运用感觉补偿方法, 视觉通道的输出能够辅助嗅觉刺激模拟系统提升用户对气味的分辨能力。尽管现有的嗅觉刺激模拟方法已经可以实现浓度调节、方向变化等功能, 但使用物理方法实现精准的气味空间分布较为困难, 且气味的扩散需要一定时间。Tsai 等<sup>[58]</sup>在 VR 系统中添加了薄雾状的可视气味, 并且通过改变薄雾的浓度和上升的方向, 与气味生成系统形成配合, 提升用户在气味浓度、方向上的分辨能力, 改善嗅觉体验。另一方面, 视觉通道可作为输入, 辅助系统判断用户的注意力方向。这一方法可用于改善鸡尾酒效应(见表 2)在人体嗅觉通道的表现。例如, Zou 等<sup>[92]</sup>通过眼动捕捉分辨用户的注意力方向, 并据此改变气味的浓度配比, 提升注意力中心物体所对应气味的浓度, 从设计角度弥补了人体在嗅觉通道鸡尾酒效应中表现较弱的生理限制。

充分利用嗅觉通道的信息传达能力, 可将嗅觉作为视觉的自然补充。针对视野内的物品, 嗅觉渲染可改善体验的完整性、氛围感, 并提升人体对空间维度的感受。Season Traveller 通过融合视听触嗅四种感觉通道来模拟四季的虚拟场景<sup>[56]</sup>。例如, 使用花香、果香、肉桂、咖啡等多种气味模块设计出与四季对应的嗅觉刺激, 并使之与 VR 眼镜中的四季风景形成配合, 为用户提供完整的场景体验。Patnaik 等<sup>[93]</sup>则重点研究了三维气味对人体空间感知的作用。基于特定的网状数据图, 他们使用超声波技术实现气味在空间中的可控分布, 提升了用户对三维图像的分析能力。针对视野外的物品, 嗅觉通道所提供的信息能够起到提示作用, 并帮助用户实现气味源的定位。例如, Bahremand 等<sup>[94]</sup>设计了一套可根据用户与气味源的距离动态调整气味浓度的设备, 以提升用户对虚拟物品的定位能力; Nakamoto 等<sup>[63]</sup>为气味源定位技术在虚拟场景中的实际效果设计了实验, 使用户在双层虚拟建筑中依靠烟味变化找到火灾源头, 并证明有一半用户能够成功到达灾源位置。

## 3 多通道感觉刺激融合的典型应用

多通道感觉刺激技术在多个领域均有巨大的应

用潜力。例如, 在游戏领域, ImpactVest 作为一个可穿戴触觉反馈设备<sup>[95]</sup>, 能够模拟用户在射击、拳击等游戏中被击中的体验; 在文化遗产领域, Frisoli 等<sup>[96]</sup>通过触觉反馈设备使用户与数字模型进行互动, 增强用户对文化的理解; 在多人协作领域, Wang 等<sup>[97]</sup>使用 VR 设备与触觉反馈系统, 实现专家远程辅助工人绘图。下面将重点整理医疗康复、虚拟购物、智能教育三个领域的相关应用案例。

### 3.1 医疗康复领域

多通道感觉刺激融合在医疗康复领域的应用主要可分为两种: (1) 基于感觉替代理论, 将患者丢失的信息转化为另一种完整的感觉可以处理的格式, 使之重新获得信息; (2) 基于多感觉刺激疗法, 促进患者神经系统或机体功能的恢复。

感觉替代方法为缺失某种感觉的残障人群提供了重新获取感觉的可能。Bach-y-Rita 等<sup>[81]</sup>认为, 在感觉替代中, 人机界面能够起到换能器 (Transducer) 的作用, 将来自传感器的信息经由人类感官传递给大脑。当人类习惯之后, 就不再认为感觉刺激来源于人机界面的位置。例如, 在为下肢截肢患者设计的感觉替代系统中, 来自假肢底部的压力传感器将信息传递至患者大腿处的人机界面, 再由该人机界面进行信息传达<sup>[98]</sup>。当患者熟悉该系统之后, 会认为其感觉刺激来自于脚底而非大腿, 从而实现了健康部位对残缺部位的触觉替代。

触视觉替代 (Tactile-Vision Sensory Substitution, TVSS) 是感觉替代的一种, 使用触觉替代视觉<sup>[81]</sup>, 为视障人群提供了多样化的信息交流渠道。TVSS 的经典触觉反馈方式是指将平面的图像或文字转换为指尖可感知的、同形状的凸起。然而, 使用与图像、文字等视觉信息完全不同的表达方式, 在简单信息的表达上可能更为高效。例如, 通过改变设备表面的凸起方向, 使之指向左、前或右方<sup>[99]</sup>; 在手臂上添加不同方向的拉力<sup>[23]</sup>; 使用无人机牵拉用户的指尖<sup>[100]</sup>等, 能够快速地从触觉通道表达方向语义, 从而辅助视障人群完成定位、导航等任务。Ducassee 等<sup>[101]</sup>使用吸盘及可伸缩线盘, 辅助视障用户用触觉来实现对地图的探索。此外, 将指尖之外的部位作为触觉输入的感官界面也可实现 TVSS。Bach-y-Rita 等<sup>[85]</sup>将图像转化为触觉施加于用户的背部, 成功实现了图像的分辨。Jung 等<sup>[102]</sup>设计了一款桌面式游戏平台, 包括一个棋盘状触觉反馈系统和一套基于摄像头的动作捕捉设备。一方面, 棋盘中的每个小格均可上下移动, 与游戏中的像素块相对应, 使用户放置在棋盘上的左手可通过掌心分辨图像; 另一方面, 用户可用右手手指在左手手背上滑动, 经由动捕系统实现操作输入。

在使用多感觉刺激疗法促进患者恢复的方法中, 视觉、听觉、触觉通道被广泛运用于脑卒中患者的恢复性治疗与状态评估。例如, 在同一位置使用声光刺

激引导患者的注意力,从而治疗脑卒中引起的半侧空间忽略症(Unilateral Spatial Neglect, USN)<sup>[103]</sup>;通过在VR系统中搭建虚拟超市<sup>[104]</sup>、设置虚拟轮椅导航任务<sup>[105]</sup>等方法,实现对USN的评估与治疗;采用音乐疗法来修复脑卒中患者的视听处理功能<sup>[106]</sup>;使用音乐康复手套,从视听触三个方向施加刺激,以恢复患者的神经功能<sup>[107]</sup>等。此外,已有多项研究证实了触觉通道在上肢康复领域的有效性。例如,Gupta等<sup>[108]</sup>设计了基于手臂外骨骼的运动反馈装置,辅助上肢神经损伤后的康复;Bortone等<sup>[109]</sup>结合VR及手部触觉反馈装置,设计了辅助儿童上肢功能康复的系统。该系统基于传统的康复方法,在虚拟环境中设置操作类游戏(例如,将金币捡起并放入漂浮的、不断旋转的罐子里),并提供对应的触觉反馈。

### 3.2 虚拟购物领域

多通道感觉刺激方法为电商场景的感知增强提供了新的可能性。心理无形性仍是线上购物面临的最大挑战,即用户难以想象商品的真实使用体验<sup>[110]</sup>。心理无形性不仅会影响消费者对商品的价值判断,还会抑制消费者的购物意愿。实证研究表明,如果无法在购买前闻到香水的味道或触摸衣服的材质,消费者可能会感到沮丧<sup>[111]</sup>。此外,线上购物场景也缺乏能够使消费者沉浸其中的多通道感觉反馈<sup>[112]</sup>。针对线上购物所面临的各种体验问题,相关研究认为多感官刺激与扩展现实技术的结合是一个必然的趋势<sup>[113]</sup>。实际上,人类对外界的感知都极大地受到了感官输入的影响,与单纯的视觉刺激相比,多种感官的协同作用能最大程度地增强消费者对商品的感知。同时,在使用多感官反馈方法设计虚拟购物场景时,应当注意产品种类的选择。研究表明,多感觉反馈交互方式能够实现视觉冲击更强、更加新奇有趣的购物体验,增强产品对用户的情感吸引力<sup>[114]</sup>。因此,娱乐类、食品类等产品比实用类产品更适合多通道反馈的购物场景。

部分电商已开始尝试使用多感觉反馈的方法提升用户的购物体验。在Canada Goose<sup>[115]</sup>的概念商店中,消费者可以进入-12℃的环境中,深入体验保暖外套的防寒效果。该商店模拟了冰川的场景,消费者每一次走动,就会听到冰块碎裂的声音。阿里巴巴创新实验室所开发的灵境装置,使用裸眼3D屏幕、超声波反馈等硬件模块,使用户可以从视听嗅触四个通道全方位感受物品本身及其使用场景<sup>[116]</sup>。此外,现有研究中的多感觉反馈装置均具备迁移至虚拟购物场景的潜力。在研究层面,MetaCookie+将味觉反馈与AR设备相结合<sup>[117]</sup>,允许用户体验并选择不同味道的饼干,用户可以在AR界面中切换各种口味的饼干,同时味觉刺激模拟装置会释放出对应的味道(巧克力、草莓等)。Ranasinghe等<sup>[118]</sup>设计的交互式装置能够迁移至虚拟场景中,用于模拟不同的饮料口感。

它通过微型空气泵向用户传递嗅觉刺激,并利用舌尖电刺激提供味觉反馈。FingerX是一款能够实现抓握触感的触觉反馈手套<sup>[119]</sup>,在虚拟购物场景中,能够使用户更为直观地感受到产品的大小和形状。

### 3.3 智能教育领域

研究表明,人类在自然环境中的学习效率高于单感觉通道环境<sup>[120]</sup>。因此,在教学环境中引入符合感觉一致性规律的多通道感觉刺激,能够提高学习质量。这种方法对初等教育及高等教育均可适用。

在早期阶段的教育中,多通道刺激的学习方法尤为重要。Bahrick等<sup>[121]</sup>发现五个月大的婴儿只有在同时接受视觉及听觉刺激时才能够分辨出节奏,而在单一视觉刺激的情况下则无法分辨节奏。早在19世纪,Montessori就开始研究使用包含视觉、听觉、触觉的混合教学方法,并为幼稚园孩童设计了Froebel gifts<sup>[122]</sup>,使用各式感官材料(例如,六种颜色的、带有细线的羊毛球)促进儿童的感官学习。这一方法被广泛运用到孩童教育中。STTory构建了一个多感官故事叙述系统<sup>[123]</sup>,使用故事书、触摸板、多感官材料(气味罐、糖果、玩偶服装等),提升儿童对故事场景的体验(例如,在故事中人物享用一个草莓冰淇淋时,儿童也能闻到草莓的气味);“Nice-smelling Interactive Multimedia Alphabet”<sup>[124]</sup>则是一款视听嗅融合的字母表学习系统,使用气味对孩童的学习产生积极影响。

在高等教育环境下,多通道感觉刺激方法已被证明在多个领域均有成效。在物理及化学概念相关的教育中,Science Space Worlds<sup>[124-125]</sup>结合VR及触觉反馈设备,实现了牛顿世界(运动学)、麦克斯韦世界(静电学)以及鲍林世界(分子结构)的视触融合体验,帮助学生理解抽象的物理及化学概念;Tijou等<sup>[126]</sup>则将虚拟技术与嗅觉反馈设备相结合,为化学分子图像提供对应的气味,增强学生对化学物质的理解。在生物工程及医疗方面,Ullrich等<sup>[127]</sup>设计了一款触诊模拟系统,以提升中医学生的诊断水平;Schönborn等<sup>[128]</sup>开发了基于触觉反馈的虚拟分子对接系统,以提升学生对生命科学中抽象概念的理解。在艺术与展览方面,Eid等<sup>[129]</sup>设计了一个触觉辅助的手写练习系统,使用力反馈来矫正用户的书写轨迹;Vi等<sup>[130]</sup>在画作展览中添加了气味刺激,证明嗅觉刺激有助于用户理解绘画的语义内容和艺术手法。

嗅觉刺激被证实有助于增强学习过程中的注意力和记忆力,同时有助于平复学生情绪。Kwok等<sup>[131]</sup>创建了一套融合视听嗅交互的智能学习系统,该系统模拟了多个场景,并测试其对学生学习效率的影响。其中,安静的道路伴随着雨声与紫罗兰香味的场景能够营造平静的感觉,提升学生整理思路的能力;而另一种有青苹果味的日出场景则能够引发新鲜的感觉,唤醒学生的灵感及自由思考的能力。Smith等<sup>[132]</sup>通过

实验发现,参与者在初次学习和再学习过程中闻到同种气味时,其记忆力得到了显著加强。

## 4 结语

人类通过不同感官收集的线索来感知环境并与环境互动。跨感官信息整合是人类感知和行动的关键,也是一个极其复杂的过程。虽然脑科学与认知科学领域在研究人类跨感官信息整合方面已经取得许多突破,但许多机理也尚不明确,这也对多通道人机交互技术的研究提出了挑战。此外,构建多通道交互工具不仅需要以认知科学为支撑,也需要相关硬件技术的支持。如前文所述,当前实现触觉模拟、嗅觉模拟以及味觉模拟的设备还存在体积大、难便携、佩戴方式不自然等诸多缺陷,这使多通道感觉刺激模拟技术在实际应用场景中非常受限。研发自然轻便的多通道交互硬件设备,是应用多通道感觉刺激融合技术的基础。

在利用多通道感觉刺激模拟技术扩展现有智能设备的信息交流方式时,可以允许这些方法对用户造成一定的学习成本和认知负荷。图形交互界面的成功说明用户能够接受并学习新的交互模式,并在熟练后实现更为高效的交互。多通道人机交互具备超越传统交互方式、提升人机交流效率的潜力,其方法在前期可能会造成用户付出不可避免的学习成本。现有研究中已有大量基于触觉实现输入的方法,例如指尖键盘(通过触碰指尖或指甲实现打字操作)<sup>[40-41]</sup>、手脸交互(识别手在脸颊上滑动或敲击的不同动作模式)<sup>[38-39]</sup>等,这些方法对习惯鼠标、触屏输入的用户来说需要一定的学习时间,但研究表明这些新型交互方式有助于提高交互效率。

在利用多通道感觉刺激模拟技术提升虚拟空间中体验的真实感时,研究人员也应当意识到一些交互模式还具备超越真实的可能性。现有研究大多关注虚拟空间在“虚拟物体和场景构建”以及“多人远程情况下虚拟空间的重合”两个方向上的功能。活用这两种功能进行设计,能够将真实场景中的活动转移到虚拟空间中,并实现高于现实的用户体验。然而,虚拟空间实际上具备跳出现实世界规律的潜力。例如,Bailenson等<sup>[133]</sup>使虚拟视觉反馈跳出真实课堂,在VR场景中实现每名学生同时感受到“教师正在注视自己”的情景,从而增强学生的课堂专注度;Liu等<sup>[134]</sup>研究如何提升在虚拟环境中飞翔的感觉,实现了普通人对高风险行为的体验,并证明了其对提升用户自信的作用。因此,多通道交互技术不仅可以在虚拟空间中模拟真实世界的体验,还可以在真实世界中创造全新的虚拟体验,解决现实场景中的限制。

多通道人机交互中感觉刺激模拟技术的发展,是实现智能时代下自然人机交互的重要推动力。在未来,随着不同通道的感觉刺激模拟技术趋向成熟,人

机之间信息交流的方式将进入全新模式。

## 参考文献:

- [1] 张凤军,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 Feng-jun, DAI Guo-zhong, PENG Xiao-lan. A Literature Review of Human-Computer Interaction in Virtual Reality[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2016, 46(12): 1711-1736.
- [2] TIAN F, FAN J, DAI G, et al. Thoughts on Human-computer Interaction in the Age of Artificial Intelligence[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2018, 48(4): 361-375.
- [3] VELASCO C, OBRIST M. Multisensory Experiences: Where the Senses Meet Technology[M]. Oxford, U.K: Oxford University Press, 2020.
- [4] 王韞,何丽雯,王党校. 智能家居中的触觉交互体验[J]. 包装工程, 2022, 43(16): 38-49. WANG wen, HE Li-wen, WANG Dang-xiao. Haptic Interaction Experience in Smart Homes[J]. PACKAGING ENGINEERING, 2022, 43(16): 38-49.
- [5] RAKKOLAINEN I, FREEMAN E, SAND A, et al. A Survey of Mid-Air Ultrasound Haptics and its Applications[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2021, 14(1): 2-19.
- [6] CARTER T, SEAH S A, LONG B, et al. UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces[C]//Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013.
- [7] LONG B, SEAH S A, CARTER T, et al. Rendering Volumetric Haptic Shapes in Mid-Air Using Ultrasound[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(6): 1-10.
- [8] GEORGIOU O, JEFFREY C, CHEN Z, et al. Touchless Haptic Feedback for VR Rhythm Games[C]//2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). 2018.
- [9] ARIGA K, FUJIWARA M, MAKINO Y, et al. Work-space Evaluation of Long-Distance Midair Haptic Display Using Curved Reflector[C]//2021 IEEE World Haptics Conference (WHC). 2021.
- [10] SHEN V, SHULTZ C, HARRISON C. Mouth Haptics in VR Using a Headset Ultrasound Phased Array[C]//Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.
- [11] JINGU A, KAMIGAKI T, FUJIWARA M, et al. Lip-Notif: Use of Lips as a Non-Contact Tactile Notification Interface Based on Ultrasonic Tactile Presentation[C]//The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, NY,

- USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [12] ZHU M, BISWAS S, DINULESCU S I, et al. Soft, Wearable Robotics and Haptics: Technologies, Trends, and Emerging Applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(2): 246-272.
- [13] ZHU M, MEMAR A H, GUPTA A, et al. PneuSleeve: In-Fabric Multimodal Actuation and Sensing in a Soft, Compact, and Expressive Haptic Sleeve[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [14] DELAZIO A, NAKAGAKI K, KLATZKY R L, et al. Force Jacket: Pneumatically-Actuated Jacket for Embodied Haptic Experiences[C]//*Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018.
- [15] CHEN Y Y, LU Y J, HAN P H. GravityPack: Exploring a Wearable Gravity Display for Immersive Interaction Using Liquid-Based System[C]//*ACM SIGGRAPH 2022 Posters*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.
- [16] 周海锋. 形状记忆合金及其应用[J]. *机电设备*, 2002(5): 38-41.  
ZHOU Hai-feng. Shape Memory Alloys and its Application[J]. *MECHANICAL AND ELECTRICAL EQUIPMENT*, 2002, 20(5): 38-41.
- [17] JEONG J, YASIR I B, HAN J, et al. Design of Shape Memory Alloy-based Soft Wearable Robot for Assisting Wrist Motion[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19).
- [18] 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*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019.
- [19] 陈大任, 李国荣, 殷庆瑞. 逆压电效应的压电常数和压电陶瓷微位移驱动器[J]. *无机材料学报*, 1997, 12(6): 6.  
CHEN Da-ren, LI Guo-rong, YIN Qing-rui. Piezoelectric Constants Measured from Converse Piezoelectric Effect and Piezoelectric Ceramic Actuators[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 1997, 12(6): 6.
- [20] 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.
- [21] KWON J, PARK J H, KU S, et al. A Soft Wearable Robotic Ankle-Foot-Orthosis for Post-Stroke Patients[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2547-2552.
- [22] TRINITATOVA D, TSETSERUKOU D. DeltaTouch: A 3D Haptic Display for Delivering Multimodal Tactile Stimuli at the Palm[C]//*2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. 2019.
- [23] TSAI H R, CHANG Y C, WEI T Y, et al. GuideBand: Intuitive 3D Multilevel Force Guidance on a Wristband in Virtual Reality[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [24] HINCHET R, VECHEV V, SHEA H, et al. DextrES: Wearable Haptic Feedback for Grasping in VR via a Thin Form-Factor Electrostatic Brake[C]//*Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018.
- [25] Tanvas. TanvasTouch[EB/OL]. (2015-08-14) [2023-02-18]. <https://tanvas.co/>.
- [26] LEE J, LEE H, EIZAD A, et al. Effects of Using TENS as Electro-Tactile Feedback for Postural Balance Under Muscle Fatigue Condition[C]//*2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. 2021.
- [27] Teslasuit. TESLASUIT[EB/OL]. (2022-03-02) [2023-02-18]. <https://teslasuit.io/>.
- [28] NITH R, TENG S Y, LI P, et al. DextrEMS: Increasing Dexterity in Electrical Muscle Stimulation by Combining it with Brakes[C]//*The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [29] OGATA M, KOYAMA Y. A Computational Approach to Magnetic Force Feedback Design[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [30] BOLDU R, WIJEWARDENA M, ZHANG H, et al. MAGHair: A Wearable System to Create Unique Tactile Feedback by Stimulating Only the Body Hair[C]//*22nd International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [31] LANGERAK T, ZÁRATE J J, VECHEV V, et al. Optimal Control for Electromagnetic Haptic Guidance Systems[C]//*Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [32] ADEL A, SEIF M A, HÖLZL G, et al. Rendering 3D Virtual Objects in Mid-Air Using Controlled Magnetic Fields[C]//*2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2017.
- [33] YASU K. Magnetic Plotter: A Macrotexture Design Method Using Magnetic Rubber Sheets[C]//*Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017.
- [34] JANSEN Y, KARRER T, BORCHERS J. MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for

- Touch Surfaces[C]//ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. Saarbrücken Germany: ACM, 2010.
- [35] NOWAK O, SCHÄFER R, BROCKER A, et al. Shaping Textile Sliders: An Evaluation of Form Factors and Tick Marks for Textile Sliders[C]//Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.
- [36] OLWAL A, STARNER T, MAININI G. E-Textile Microinteractions: Augmenting Twist with Flick, Slide and Grasp Gestures for Soft Electronics[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Honolulu HI USA: ACM, 2020.
- [37] KU P S, GONG J, WU T Y, et al. Zippro: The Design and Implementation of an Interactive Zipper[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [38] WENG Y, YU C, SHI Y, et al. FaceSight: Enabling Hand-to-Face Gesture Interaction on AR Glasses with a Downward-Facing Camera Vision[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [39] XU X, SHI H, YI X, et al. EarBuddy: Enabling On-Face Interaction via Wireless Earbuds[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [40] XU Z, CHEN W, ZHAO D, et al. BiTipText: Bimanual Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [41] LEE D, KIM J, OAKLEY I. FingerText: Exploring and Optimizing Performance for Wearable, Mobile and One-Handed Typing[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [42] MORRISON I, LÖKEN L S, OLAUSSON H. The Skin as a Social Organ[J]. *Experimental Brain Research*, 2010, 204(3): 305-314.
- [43] HERTENSTEIN M J, HOLMES R, MCCULLOUGH M, et al. The Communication of Emotion via Touch[J]. *Emotion*, 2009, 9(4): 566-573.
- [44] SUK H J, JEONG S H, YANG T H, et al. Tactile Sensation as Emotion Elicitor[J]. *KANSEI Engineering International*, 2009, 8(2): 153-158.
- [45] ZHANG Z, ALVINA J, HÉRON R, et al. Touch Without Touching: Overcoming Social Distancing in Semi-Intimate Relationships with SansTouch[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Yokohama Japan: ACM, 2021.
- [46] GALLACE A, SPENCE C. The Science of Interpersonal Touch: An Overview[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2010, 34(2): 246-259.
- [47] YOHANAN S, MACLEAN K E. The Haptic Creature Project: Social Human-Robot Interaction Through Affective Touch[C]//Proceedings of the AISB 2008 Symposium on the Reign of Catz & Dogs: The Second AISB Symposium on the Role of Virtual Creatures in a Computerised Society. Citeseer, 2008.
- [48] GAO Y, BIANCHI-BERTHOUSSE N, MENG H. What Does Touch Tell Us About Emotions in Touchscreen-Based Gameplay?[J]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2012, 19(4): 1-30.
- [49] LV H R, LIN Z L, YIN W J, et al. Emotion Recognition Based on Pressure Sensor Keyboards[C]//2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. IEEE, 2008.
- [50] TSAI C Y, TSAI I L, LAI C J, et al. AirRacket: Perceptual Design of Ungrounded, Directional Force Feedback to Improve Virtual Racket Sports Experiences[C]//Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022.
- [51] RYU N, JO H Y, PAHUD M, et al. GamesBond: Bimanual Haptic Illusion of Physically Connected Objects for Immersive VR Using Grip Deformation[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [52] LEE C J, TSAI H R, CHEN B Y. HairTouch: Providing Stiffness, Roughness and Surface Height Differences Using Reconfigurable Brush Hairs on a VR Controller[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [53] TSAI H R, HUNG C W, WU T C, et al. ElastOscillation: 3D Multilevel Force Feedback for Damped Oscillation on VR Controllers[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [54] RICHARD E, TIJOU A, RICHARD P, et al. Multi-Modal Virtual Environments for Education with Haptic and Olfactory Feedback[J]. *Virtual Reality*, 2006, 10(3): 207-225.
- [55] MATSUKURA H, YONEDA T, ISHIDA H. Fragrant Multimedia Display System: Presenting Odor Distribution on Display Screen[C]//2012 IEEE SENSORS. 2012.
- [56] RANASINGHE N, JAIN P, THI NGOC TRAM N, et al. Season Traveller: Multisensory Narration for Enhancing the Virtual Reality Experience[C]//Proceed-

- ings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Montreal QC Canada: ACM, 2018.
- [57] WANG Y, AMORES J, MAES P. On-Face Olfactory Interfaces[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [58] TSAI S E, TSAI W L, PAN T Y, et al. Does Virtual Odor Representation Influence the Perception of Olfactory Intensity and Directionality in VR?[C]//2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Lisboa, Portugal: IEEE, 2021.
- [59] BROOKS J, TENG S Y, WEN J, et al. Stereo-Smell via Electrical Trigeminal Stimulation[C]//Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [60] WEISS T, SHUSHAN S, RAVIA A, et al. From Nose to Brain: Un-Sensed Electrical Currents Applied in the Nose Alter Activity in Deep Brain Structures[J]. *Cerebral Cortex*, 2016, 26(11): 4180-4191.
- [61] YANAGIDA Y, KAWATO S, NOMA H, et al. A Nose-Tracked, Personal Olfactory Display[C]//ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003.
- [62] HASHIMOTO K, NAKAMOTO T. Tiny Olfactory Display Using Surface Acoustic Wave Device and Micropumps for Wearable Applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(12): 4974-4980.
- [63] NAKAMOTO T, HIRASAWA T, HANYU Y. Virtual Environment with Smell Using Wearable Olfactory Display and Computational Fluid Dynamics Simulation[C]//2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). 2020.
- [64] UTZ K S, DIMOVA V, OPPENLÄNDER K, et al. Electrified Minds: Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) and Galvanic Vestibular Stimulation (GVS) As Methods of Non-Invasive Brain Stimulation in Neuropsychology—A Review of Current Data and Future Implications[J]. *Neuropsychologia*, 2010, 48(10): 2789-2810.
- [65] AOYAMA K, MIYAMOTO N, SAKURAI S, et al. Electrical Generation of Intranasal Irritating Chemosensation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 106714-106724.
- [66] OBRIST M, TUCH A N, HORNBAEK K. Opportunities for Odor: Experiences with Smell and Implications for Technology[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Toronto Ontario Canada: ACM, 2014.
- [67] CHU S, DOWNES J J. Odour-Evoked Autobiographical Memories: Psychological Investigations of Proustian Phenomena[J]. *Chemical Senses*, 2000, 25(1): 111-116.
- [68] HERZ R S, BELAND S L, HELLERSTEIN M. Changing Odor Hedonic Perception Through Emotional Associations in Humans[J]. *International Journal of Comparative Psychology*, 2004, 17(4).
- [69] GARZOTTO F, BECCALUVA E, GIANOTTI M, et al. Interactive Multisensory Environments for Primary School Children[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [70] DMITRENKO D, MAGGIONI E, BRIANZA G, et al. CARoma Therapy: Pleasant Scents Promote Safer Driving, Better Mood, and Improved Well-Being in Angry Drivers[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [71] VI C T, MARZO A, ABLART D, et al. TastyFloats: A Contactless Food Delivery System[C]//Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017.
- [72] MURER M, ASLAN I, TSCHELIGI M. LOLLio: Exploring Taste as Playful Modality[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013.
- [73] MAYNES-AMINZADE D. Edible Bits: Seamless Interfaces Between People, Data and Food[C]//Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'05)-Extended Abstracts. Portland, Oregon, USA, 2005.
- [74] CRUZ A, GREEN B G. Thermal Stimulation of Taste[J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 889-892.
- [75] NAKAMURA H, MIYASHITA H. Augmented Gustation Using Electricity[C]//Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011.
- [76] RANASINGHE N, JAIN P, KARWITA S, et al. Virtual Lemonade: Let's Teleport Your Lemonade![C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017.
- [77] RANASINGHE N, DO E Y L. Digital Lollipop: Studying Electrical Stimulation on the Human Tongue to Simulate Taste Sensations[J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 2016, 13(1): 5:1-5:22.
- [78] CHEOK A D, KARUNANAYAKA K. Virtual Taste and Smell Technologies for Multisensory Internet and Virtual Reality[M]. Cham: Springer, 2018.
- [79] LIN A, SCHELLER M, FENG F, et al. Feeling Colours: Crossmodal Correspondences Between Tangible 3D Objects, Colours and Emotions[C]//Proceedings of

- the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [80] KUPERS R, PTITO M. Compensatory Plasticity and Cross-Modal Reorganization Following Early Visual Deprivation[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2014, 41: 36-52.
- [81] BACH-Y-RITA P, W KERCEL S. Sensory Substitution and the Human-machine Interface[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2003, 7(12): 541-546.
- [82] MARCOLIN F, WALLY SCURATI G, ULRICH L, et al. Affective Virtual Reality: How to Design Artificial Experiences Impacting Human Emotions[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2021, 41(6): 171-178.
- [83] CHERRY E C. Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and With Two Ears[J]. *The Journal of the acoustical society of America*, 1953, 25(5): 975-979.
- [84] HAN T, WANG S, WANG S, et al. Mouillé: Exploring Wetness Illusion on Fingertips to Enhance Immersive Experience in VR[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Honolulu HI USA: ACM, 2020.
- [85] BACH-Y-RITA P, COLLINS C C, SAUNDERS F A, et al. Vision Substitution by Tactile Image Projection[J]. *Nature*, 1969, 221: 963-964.
- [86] BACH-Y-RITA P. Nonsynaptic Diffusion Neurotransmission and Late Brain Reorganization[M]. *Demos Medical Publishing*, 1995.
- [87] WILBERZ A, LESCHTSCHOW D, TREPkowski C, et al. FaceHaptics: Robot Arm Based Versatile Facial Haptics for Immersive Environments[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Honolulu HI USA: ACM, 2020.
- [88] SUZUKI R, HEDAYATI H, ZHENG C, et al. Room-Shift: Room-Scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-Moving Swarm Robots[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [89] VASYLEVSKA K, KOVÁCS B I, KAUFMANN H. VR Bridges: Simulating Smooth Uneven Surfaces in VR[C]//*2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2020.
- [90] GÜNTHER S, MÜLLER F, SCHÖN D, et al. Terminator: Understanding the Interdependency of Visual and On-Body Thermal Feedback in Virtual Reality[C]//*Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020.
- [91] GÜNTHER S, RASCH J, SCHÖN D, et al. Smooth as Steel Wool: Effects of Visual Stimuli on the Haptic Perception of Roughness in Virtual Reality[C]//*CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New Orleans LA USA: ACM, 2022.
- [92] ZOU S, HU X, BAN Y, et al. Simulating Olfactory Cocktail Party Effect in VR: A Multi-Odor Display Approach Based on Attention[C]//*2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2022.
- [93] PATNAIK B, BATCH A, ELMQVIST N. Information Olfaction: Harnessing Scent to Convey Data[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(1): 726-736.
- [94] BAHREMAND A, MANETTA M, LAI J, et al. The Smell Engine: A System for Artificial Odor Synthesis in Virtual Environments[C]//*2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2022.
- [95] TSAI H R, LIAO Y S, TSAI C. ImpactVest: Rendering Spatio-Temporal Multilevel Impact Force Feedback on Body in VR[C]//*CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New Orleans LA USA: ACM, 2022.
- [96] FRISOLI A, JANSSON G, BERGAMASCO M, et al. Evaluation of The Pure-Form Haptic Displays Used for Exploration of Works of Art at Museums[C]//*World haptics conference*, Pisa, March. 2005.
- [97] WANG P, BAI X, BILLINGHURST M, et al. Haptic Feedback Helps Me? A VR-SAR Remote Collaborative System with Tangible Interaction[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2020, 36(13): 1242-1257.
- [98] FAN R E, WOTTAWA C, MULGAONKAR A, et al. Pilot Testing of a Haptic Feedback Rehabilitation System on a Lower-Limb Amputee[C]//*2009 ICME International Conference on Complex Medical Engineering*. 2009.
- [99] LIU G, YU T, YU C, et al. Tactile Compass: Enabling Visually Impaired People to Follow a Path with Continuous Directional Feedback[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [100] HUPPERT F, HOELZL G, KRANZ M. GuideCopter - A Precise Drone-Based Haptic Guidance Interface for Blind or Visually Impaired People[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021.
- [101] DUCASSE J, MACÉ M J M, SERRANO M, et al. Tangible Reels: Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users[C]//*Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016.
- [102] JUNG J, SON S, LEE S, et al. ThroughHand: 2D Tactile Interaction to Simultaneously Recognize and Touch Multiple Objects[C]//*Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Ma-

- chinery, 2021.
- [103] ZIGIOTTO L, DAMORA A, ALBINI F, et al. Multisensory Stimulation for the Rehabilitation of Unilateral Spatial Neglect[J]. *Neuropsychological Rehabilitation*, 2021, 31(9): 1410-1443.
- [104] RAND D, KATZ N, WEISS P L. Intervention Using the VMall for Improving Motor and Functional Ability of The Upper Extremity in Post Stroke Participants[J]. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2009, 45(1): 113-121.
- [105] BUXBAUM L J, PALERMO M A, MASTROGIOVANNI D, et al. Assessment of Spatial Attention and Neglect with a Virtual Wheelchair Navigation Task[J]. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 2008, 30(6): 650-660.
- [106] MUSACCHIA G, SAMS M, SKOE E, et al. Musicians Have Enhanced Subcortical Auditory and Audiovisual Processing of Speech and Music[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(40): 15894-15898.
- [107] LI Q, FENG J, GUO J, et al. Effects of the Multisensory Rehabilitation Product for Home-based Hand Training after Stroke on Cortical Activation by Using NIRS Methods[J]. *Neuroscience Letters*, 2020, 717: 134682.
- [108] GUPTA A, O'MALLEY M K. Design of a Haptic Arm Exoskeleton for Training and Rehabilitation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(3): 280-289.
- [109] BORTONE I, BARSOTTI M, LEONARDIS D, et al. Immersive Virtual Environments and Wearable Haptic Devices in Rehabilitation of Children with Neuromotor Impairments: A Single-Blind Randomized Controlled Crossover Pilot Study[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2020, 17(1): 144.
- [110] HELLER J, CHYLINSKI M, DE RUYTER K, et al. Touching the Untouchable: Exploring Multi-Sensory Augmented Reality in the Context of Online Retailing[J]. *Journal of Retailing*, 2019, 95(4): 219-234.
- [111] LØKKE-ANDERSEN C B, WANG Q J, GIACALONE D. User Experience Design Approaches for Accommodating High "Need For Touch" Consumers in Ecommerce[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2022, 37(2): e12727.
- [112] PETIT O, VELASCO C, SPENCE C. Digital Sensory Marketing: Integrating New Technologies into Multisensory Online Experience[J]. *Journal of Interactive Marketing*, 2019, 45: 42-61.
- [113] PETIT O, VELASCO C, WANG Q J, et al. Consumer Consciousness in Multisensory Extended Reality[J]. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13.
- [114] MISHRA A, SHUKLA A, RANA N P, et al. From "Touch" to a "Multisensory" Experience: The Impact of Technology Interface and Product Type on Consumer Responses[J]. *Psychology & Marketing*, 2021, 38(3): 385-396.
- [115] Canada Goose. The Cold Room at Canada Goose[EB/OL]. (2016-06-25) [2023-02-18]. <https://www.canadagoose.com/ca/en/find-a-retailer/find-a-retailer.html>.
- [116] 浙江大学国际设计研究院. 灵境[EB/OL]. (2022-08-14) [2023-02-18]. <http://www.idi.zju.edu.cn/3384.html>. International Design Institute of Zhejiang University. LingJing[EB/OL]. (2022-08-14) [2023-02-18]. <http://www.idi.zju.edu.cn/3384.html>.
- [117] NARUMI T, NISHIZAKA S, KAJINAMI T, et al. Augmented Reality Flavors: Gustatory Display Based on Edible Marker and Cross-Modal Interaction[C]//*Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011.
- [118] RANASINGHE N, NGUYEN T N T, LIANGKUN Y, et al. Vocktail: A Virtual Cocktail for Pairing Digital Taste, Smell, and Color Sensations[C]//*Proceedings of the 25th ACM international conference on Multimedia*. 2017.
- [119] TSAI H R, TSAI C, LIAO Y S, et al. FingerX: Rendering Haptic Shapes of Virtual Objects Augmented by Real Objects Using Extendable and Withdrawable Supports on Fingers[C]//*CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New Orleans LA USA: ACM, 2022.
- [120] SHAMS L, SEITZ A R. Benefits of Multisensory Learning[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2008, 12(11): 411-417.
- [121] BAHRICK L E, LICKLITER R. Intersensory Redundancy Guides Attentional Selectivity and Perceptual Learning in Infancy[J]. *Developmental Psychology*, 2000, 36: 190-201.
- [122] WIGGIN K D S, SMITH N A. Froebel's Gifts[M]. Boston and New York: The Riverside Press, Cambridge, 1895.
- [123] PONTICORVO M, DI FUCCIO R, FERRARA F, et al. Multisensory Educational Materials: Five Senses to Learn[C]//DI MASCIO T, VITTORINI P, GENNARI R, et al. *Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning*, 8th International Conference. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [124] DEDE C, SALZMAN M C, LOFTIN R B, et al. Multisensory Immersion as a Modeling Environment for Learning Complex Scientific Concepts[M]//FEURZEIG W, ROBERTS N. *Modeling and Simulation in Science and Mathematics Education*. New York, NY: Springer, 1999.
- [125] SALZMAN M C, DEDE C, LOFTIN R B, et al. A Model for Understanding How Virtual Reality Aids Complex Conceptual Learning[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1999, 8(3): 293-316.