・综述・

多媒体(移动)终端静电力触觉再现

燕学智*,武秋爽,孙晓颖

通信工程学院, 吉林大学, 长春 130022

* 通信作者: yanxz@jlu.edu.cn

收稿日期: 2019-01-10 接受日期: 2019-03-05

基金资助:国家自然科学基金(61631010);国家重点研发计划(2016YFB1001304);吉林大学高层次创新团队项目 (2017TD-19);中央高校基本科研业务专项项目。

 引用格式: 燕学智,武秋爽,孙晓颖. 多媒体(移动)终端静电力触觉再现. 虚拟现实与智能硬件,2019,1(2): 201-218
 Xuezhi YAN, Qiushuang WU, Xiaoying SUN. Electrostatic tactile representation in multimedia mobile terminal. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2019, 1(2): 201-218

DOI: 10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0003

摘 要 静电力触觉再现技术可以通过裸指感知触摸屏中视觉对象的形状、纹理等触觉特征,提升 人机交互的真实性和沉浸感。本文着眼于静电力触觉再现技术在平板显示器上的应用,从静电力触 觉再现的典型装置、触觉渲染模型驱动和数据驱动算法、驱动信号加载方式、触觉再现效果评测方 法等几个方面进行综述,通过对文献的整理和分析,对该技术的发展现状和未来前景作出以下判 断:(1)静电力触觉再现技术是在多媒体终端表面实现低功耗裸指触觉再现功能的优选方案;(2)静 电力触觉再现技术渲染动态范围尚有不足,针对粗糙纹理的呈现效果较佳,但对细腻纹理的呈现效 果不理想,多元融合技术可能是解决途径之一;(3)从触觉再现效果评测的角度看,该领域尚有相当 大的进步空间,理论模型和应用算法均有很多工作尚未展开;(4)静电力触觉再现技术本质上属于应 用科学,理论研究和商业应用的相互促进、良性推动是其进步的必由之路,因此急需一款较为成熟 的原理样机在商业上推广应用。

关键词 静电触觉; 渲染算法; 模型驱动; 数据驱动; 表面触觉再现; 人机交互

1 引言

近年来,平板电脑、智能手机等多媒体终端日益普及,成为应用最为广泛的人机交互媒介^[1], 触控技术也成为当下最为普遍的交互技术之一。然而,绝大多数交互操作依赖于视觉和听觉^[2,3],仅 有大约15%的信息来自触觉,相比于视听交互技术,触觉交互技术研究仍处于起步阶段。触觉反馈 会提升操作效率和用户体验^[4],为多媒体终端人机交互界面设计提供了新的发展空间。

表面触觉再现技术可通过裸指触摸屏幕来感知视觉对象的形状、纹理等触觉特征,利用人类的 触觉感知通道提高人机交互操作的真实性和沉浸感。表面触觉再现功能有振动式、压力式、压膜 式、电刺激和静电力式等多种实现技术,其中基于静电力的技术可再现连续细腻的纹理触觉,与人 体皮肤的感知特性相符,低功耗、适合裸指操作是现阶段研究的重点和热点。

1953年, Mallinckrodt 等⁽⁵⁾发现了静电力触觉再现现象,金属表面在通电时的触感较未通电时粗糙,是由于手指内导体和金属层构成的平行电容结构充放电所致。当在导电金属层施加周期性变化的信号 *V(t)*时,金属层将交替分布正负电荷,皮肤角质层则由于电荷感应原理带有相应的正负电荷(图1)。随着 *V(t)*周期性变化,皮肤和导电金属间会产生周期性的静电吸引力,该静电吸引力不足以

直接使手指产生弹性形变,但借助手指的滑动,会使手指所受摩擦力变化,从而再现触觉感知。其力学模型如图2所示,*f*。为静电吸引力,*f*,为滑动摩擦力,方向与手指运动方向相反。







图 2 基于静电力的表面触觉再现力学模型^[6] Figure 2 Tactile representation mechanical model based on electrostatic force.^[6]

1970年, Strong和Troxel⁶⁰深入研究了影响 $f_e(t)$ 的因素,提出了 $f_e(t)$ 和 $f_r(t)$ 的数学模型

$$f_{e}(t) = \frac{\varepsilon_{0}A[v(t)]^{2}}{2(\frac{T_{i}}{\varepsilon_{i}} + \frac{T_{sc}}{\varepsilon_{sc}})^{2}}$$
(1)

$$f_r(t) = \mu \left[F_n + f_e(t) \right] \tag{2}$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数,A为手指接触区域面积,v(t)为瞬态电压, T_i 和 T_{sc} 分别为设备绝缘层和皮肤角质层的厚度, ϵ_i 和 ϵ_{sc} 分别为绝缘层和皮肤角质层的相对介电常数, μ 为手指与静电力触摸屏的 摩擦系数, F_n 为手指压力。由式(2)可知, $f_r(t)$ 的变化主要取决于 $f_e(t)$ 的变化,而 $f_e(t)$ 则取决于v(t)的变 化情况,因此静电力设备实际是通过控制激励信号幅度等参量实现表面触感再现。

之后的30年间,静电力触觉再现受技术和工艺水平的限制,发展相对缓慢。1995年Beebe等采用标准的集成电路制作材料和技术分别制作了如图3所示三种尺寸的静电力触觉再现电极阵列,来研究电极大小和间隔对感觉和分辨率的影响^[7]。1998年Tang等^[8]通过在尺寸和间隔不同的电极阵列上进行阈值、分辨率、图形识别等实验研究电极阵列的分辨率和设备的有效性。

2001年,Robles-DE-LA-Torre和Hayward¹⁹在Nature上撰文 证明人类对物体形状的触觉感知取决于手指受到的作用力,为 触觉再现技术的实现提供重要的理论依据。以此为标志,同时 在平板显示技术巨大进步的推动下,静电力触觉再现技术进入 快速发展的20年。在以美国西北大学、法国里尔大学、美国 Disney研究中心和芬兰Senseg公司为代表的研究机构的共同推 动下,大批研究成果相继涌现,这些成果涉及方方面面,贡献 也不尽相同,因此有必要对其进行一下梳理和总结。

本文以静电力触觉再现技术在平板显示器上的应用为前 提,从静电力触觉再现的典型装置(含融合了静电力的装置)、 触觉渲染算法、驱动信号加载方式、触觉再现效果评测方法等 几个方面进行了详细的介绍。针对每个成果的贡献、特点及不



图 3 静电力触觉再现电极阵列图^[7] Figure 3 Electrode array of Electrostatic tactile representation.^[7]

足给出了公正的评价,经过对文献的整理和分析,作者对静电力触觉再现技术发展前景提出了一些 看法。

2 静电力装置的发展进程

2003年Yamamoto等首次将静电力触觉再现和LCD显示屏结合实现了触觉视觉同屏显示^[10]。如 图4所示的触觉显示器由固定电极阵列和滑动导体薄膜组成,当手指带动导体薄膜在固定电极阵列 上滑动时,通过给固定电极阵列加载不同的驱动信号可以再现不同的表面粗糙度。

2006年,Yamamoto等^[11]将50个长为37mm、宽为0.8mm的电极两两相距2.54mm排列成矩形电极阵列,在100—200V电压作用下可产生0—900 mN摩擦力,如图5所示。位置传感器采集手指位

置信息并输入系统,控制导轨在纹理表面移动, 并将表面受力信息反馈入系统,生成刺激信号 产生对应触感。该设备的纹理再现信息取自于 真实表面,可信度较高,且易与移动终端结合, 但设备采用电极阵列形式,触觉再现不连续, 呈现的纹理模糊,感觉微弱。

2009年,芬兰的Linjama等开发出 E-sense 系统,通过静电力直接微震皮肤,能够让使用 者产生被触碰的感觉^[12]。

透明导电材料的发展进一步推动了静电力 触觉再现技术的发展。2010年,Disney研究中 心Bau等^[13]采用现有的电容定位屏作为触觉再现 面板搭建了如图6所示的触觉再现系统 TeslaTouch,将触觉显示和视觉显示集成到一个 显示屏上,并且脱离触觉手套等辅助装置实现 了裸指触觉再现,通过3个心理物理学实验研究 了静电力触觉再现电压阈值以及电压和频率的 最小可觉差。

2013年 Meyer 等根据皮肤角质层生物电特 性将角质层等效为电阻电容并联的形式,通过 等效模型的仿真得到触觉静电力和驱动信号幅 值、频率的关系,并通过实际测量触觉静电力 验证了模型在幅值方面的有效性,但在频率方 面,等效模型仿真结果和实际测量数据有一定 差距^[14]。

2014年,芬兰Senseg公司开发了Feelscreen 触觉感知系统,在平板电脑上实现了静电力触 觉再现,开发者可以通过在互动设计中增加触 觉反馈来提升用户的交互体验^[15]。

2014年,吉林大学孙晓颖团队研制出基于 Windows 平台和 Android 平台的静电力表面触觉 再现终端,实现了视觉对象形状等特性的表面 触觉再现(图7)。该设备包括触觉再现面板、控 制单元和定位单元三部分^[16-18]。

单一技术触觉再现技术存在力反馈维度单 一的局限性,为了提高用户触觉交互体验,国 内外学者开始研究多种触觉再现技术融合的装 置,探索效果更佳的触觉再现方法。



图 4 Yamamoto 等搭建的静电力触觉再现装置^[10] Figure 4 Electrostatic tactile representation device by Yamamoto.^[10]



图5 触觉再现系统原理图^[11]

Figure 5 Principle diagram of tactile representation system.^[11]



图 6 TeslaTouch 设备^[13] Figure 6 TeslaTouch device.^[13]

2013年,Giraud等从理论上分析静电力触觉与空气压膜触觉的异同,并提出这两者存在融合的 可行性,但并没有进行验证^[19],随后在2015年,Giraud团队的Vezzoli等通过实验验证了这两者融 合的可行性^[20]。通过仿真和实验两种方法证明了两种技术间的干扰对操作者触觉感知效果影响较 小,肯定了组合式表面触觉再现设备的有效性。图8是该团队融合静电力和压膜效应的触觉再现实 验装置。

2017年, Ito等提出了融合静电力与振动的触觉再现技术,并基于此技术开发了融合装置、提



图 7 静电力触觉再现移动学习终端.^[16-18] (a) 基于 Windows 系统; (b) 基于 Android 系统 Figure 7 Electrostatic tactile display mobile learning terminal.^[16-18] (a) Based on Windows System; (b) Based on Android

System.

出了融合算法,以正弦光栅为渲染对象对算法进行了验证 (图9)^[21]。

通过上述对静电力触觉再现装置发展进程的综述可以看 到,受实现原理和工艺水平限制,早期设备普遍存在体积 大、功耗高、构成繁杂、显示屏与触觉面板分离等问题,无 法满足功耗低、体积小、对显示影响小等多媒体终端裸指触 觉的基本要求。近几年,随着研究人员的不懈努力和工艺水 平的快速进步,静电力触觉再现装置的功耗已降低至0.5W 的量级, 且由于透明导电材料的出现使得静电力触觉与视觉 信息同时呈现,这些进展使得装置的结构得以简化,体积大 大降低, SENSEG 更是只需在普通手机屏幕上覆一层半导体 膜,在手机壳体内安装一块面积很小的驱动电路,就可以让 其具备触觉再现功能。前文提到的静电力与其他技术的融合 方案,也仅限于原理验证和性能分析阶段,应用于平面裸指 触觉再现技术中的振动触觉技术和空气压膜技术的功率大多 在5W和25W的量级(具体数值与所用压电陶瓷片或电机数 量有关),比静电力技术的功耗大1-2个数量级,同时由于 压电瓷片和压电电机的存在, 也使得结构变得更为复杂, 在 功率和结构问题解决之前,静电力触觉再现技术仍为裸指触 觉再现较为理想的技术选择。

应该说,尽管基于静电力触觉再现的原理样机出现了很 多,但尚没有一款样机的成熟度适宜在商业上进行推广(包括SENSEG方案)。静电力触觉再现技术本质上属于应用科 学,理论研究和商业应用的相互促进、良性推动才是必由 之路。



图 8 融合了静电力和压膜效应的触觉再现 实验装置^[20]

Figure 8 Tactile representation experimental device fused by electrostatic and squeeze film.



图 9 静电力与振动融合触觉再现装置^[21] Figure 9 Representation device fused by electrostatic and vibration.^[21]

3 静电力触觉再现渲染方法

如何提高触觉体验的真实感和沉浸感,是触觉渲染技术的研究重点。触觉渲染技术通过建立触 觉力数学模型计算出触觉再现设备所需的力信息,是决定触觉再现系统性能的核心技术。下面将具 体介绍两类不同的渲染方法,并总结渲染方法的特点。

3.1 基于视觉对象特征的渲染方法

基于视觉对象特征的渲染方法通过提取视觉对象中能够反映形状、纹理变化的触觉特征建立渲 染模型,控制触觉再现设备呈现触感。按照视觉对象的维度不同,可以将基于视觉对象特征的渲染 方法分为形状渲染方法和图像渲染方法两类。前者适用于再现凸起或凹陷等简单形状的触觉信息, 后者适用于再现纹理或轮廓等复杂的图像触觉信息。

3.1.1 形状渲染方法

2001年, Robles-De-La-Torre 等首次提出可以通过调节手指所受切向力,在平坦的触摸表面上 实现形状的触觉感知^{19]}。在真实形状物理表面根据受力分析,计算出手指所受切向力,通过在力反 馈设备上为手指施加相同的切向力,在平坦的触摸平面上构造了与真实形状触感相同的虚拟形状, 当虚拟形状与真实形状叠加在一起时,会产生触感的叠加或抵消。这一结论为后续的形状触觉再现 渲染方法提供了理论基础。

2004年,Lécuyer等提出了一种伪触觉形状渲染方法,利用视觉欺骗提供给用户触觉体验^[21]。 将光标在计算机屏幕上的C/D比(手动鼠标的移动速度/屏幕光标的移动速度)与凸起形状的高度对 应,利用光标速度的变化来反映触摸凸起时切向力的变化。如图10所示,假设屏幕上显示的图像 对应于凸起形状的顶视图,光标的C/D比随着光标所在处的虚拟形状的高度而不断变化,光标的加 速度表示凸起形状的负斜率,反之,光标的减速度表示凸起形状的正斜率,在光标运动的过程中使 用户产生触摸虚拟凸起的感受。

2006年,Yamamoto等¹¹¹在自主研发的视觉一触觉 集成显示系统上,通过将像素亮度值转换为驱动信号 电压的方法实现触觉显示的功能,建立了归一化的像 素亮度值与驱动信号绝对电压的映射关系(图11),实 现了几何图形的触觉再现,但是这种渲染方法与之前 已有的渲染方法相比触感弱且真实感较差。

2011年,Xu等^[23]在TeslaTouch 触觉再现设备上围 绕为视觉障碍人士提供触觉信息做了一系列研究工 作,提出了点形状和盲文的渲染方法。他们首先通过

电压的线性变化,在点的位置处施加最大电压,实现点形状的渲染(图12)。然后提出了3种盲文的 渲染方式: (1)只在形状边缘加载信号(图13a); (2)在形状内部全部加载信号(图13b); (3)在形状边 缘加载比内部更强的信号(图13c)。经过对比实验发现,第2种渲染方式的识别度最大,其次是第3 种渲染方式,第1种渲染方式最难识别。

2012年, Park等提出一种根据接触位置实现虚拟 形状感知的渲染方法^[24]。该方法中将虚拟形状分为两 个表面和一个边缘(图14),如果虚拟手指的任何部分 落入一个区域,则计算虚拟手指上的点与物体表面之 间的最小距离。虚拟手指上最接近虚拟对象的点成为 匠 可能的接触点的候选点。最多可以有3个接触点候选。 选择到物体表面距离最小的点作为指尖上最可能的接 触点。渲染模型如下:

$$F = K_n (x_p - x_f) \tag{3}$$

式中, F为接触力, K_n为虚拟表面刚度系数, x_p为物体 表面上最可能的碰撞点, x_f为手指尖上最可能的接 触点。

2013年, Kocsis等通过力反馈设备渲染出了正弦



图 10 伪触觉形状渲染过程^[22] Figure 10 Pseudo-tactile shape rendering process.^[22]



图 11 归一化的像素亮度值与驱动信号绝对电压 的映射关系^[11]

Figure 11 The relationship between the normalized pixel value and the absolute voltage of the driven signal.^[11] 形状和三角形状,提出了一种图形高度与触觉力的渲染模型[2]:





图 13 三种盲文渲染方式^[23] Figure 13 Three kinds of braille rendering methods.^[23]

$$F_{z} = \begin{cases} K \times [h(x) - p_{z}] & when \ p_{z} < h(x) \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

式中, *F*_z为法向力, *K*为刚度系数, *h*(*x*)为图形表面高度, *p*_z为触觉交互点的高度。通过实验, 探究裸指和触笔分别在虚拟形状表面与真实形状表面触摸时的鉴别阈值,论证相同高度的正弦形状与三角形状的鉴别阈值没有明显差异,手指感知真实形状表面时的感知阈值明显小于触笔感知虚拟形状表面的感知阈值。

2015年,Perez等提出一种通过局部接触面模型来刺激皮肤的 触觉渲染算法^[26]。该算法首先模拟虚拟环境下,手指与虚拟形状表 面不同接触方式下的接触面模型,将接触面模型存储在触觉再现 设备中,然后通过将虚拟环境中的接触面模型与设备渲染的接触 面模型之间的偏差最小化,控制触觉再现设备产生最真实的触感。 边缘表面1 及 表面2

(4)

图 14 虚拟形状的两个表面一个 边缘^[24]

Figure 14 Two surfaces and one edge of virtual shape.^[24]

2015年,吉林大学王婷婷等分析了几何形状和虚拟形状之间的力对应关系,利用阴影恢复形状 法还原形状表面三维高度(图15),建立了形状表面三维高度和切向力触觉渲染模型(图16)^{117]}。这种 渲染方法适用于低复杂度的形状触觉再现,对简单几何形状的触觉再现具有较好的效果。

2016年, Ito等研发了一种融合静电力和振动的触觉再现装置,并提出了一种融合渲染方法实现 了对正弦形状的触觉再现^[27]。该方法同时提供振动力*F*_v(*t*)和静电力*F*_e(*t*),计算过程如下:

$$F_{V}(t) = A\sin 2\pi \frac{x(t)}{\lambda}$$
(5)

$$V_e(t) = B\cos 2\pi \frac{x(t)}{\lambda} \tag{6}$$

式中, A和B分别为力增益系数和电压增益系数, x(t)为手指所在位置, 入为正弦形状的空间周期

$$F_{e}(t) = \mu_{0} \left(W + k_{e} V_{e}^{2}(t) \right)$$
⁽⁷⁾

式中, μ_o 为手指与触觉面板之间的摩擦系数,W为触觉面板的法向负载, k_e 为静电力常数,由静电力系统结构决定。



通过对比感知实验,在呈现正弦形状的触觉效果上,这种融合渲染方法与单一的静电力和振动 触觉反馈渲染方法相比,所呈现的触觉效果更好。

2017年,Osgouei等提出了一种提高三维形状识别的渲染方法^[28]。他们首先拓展了梯度算法来应用于任意 3D 网格的表面梯度,然后添加了边缘检测算法来渲染尖锐的边缘。这种渲染方法改善了之前梯度算法不能为边缘呈现尖锐触感的问题,显著提高了 3D 形状识别性能。

3.1.2 图像渲染方法

1990年, Minsky等首次提出用触觉反馈力模拟图像纹理的概念(图17),提出力与梯度的函数表达式,利用图像局部梯度值求解切向力以及法向力大小模拟局部纹理(图18)^[29]。



2008年, Vasudevan等针对图像纹理的触觉再现,提出了力触觉渲染掩膜的概念,通过m×m阶的掩膜算子与局部图像相乘,获取触觉交互点的纹理触觉力(图19)³⁰。这种渲染方法简单有效,但 是需要针对图像尺寸、分辨率,噪声水平等因素选取掩膜尺寸。

2011年,李佳璐等将像素力的概念引入触觉再现领域,利用颜色的变化表征纹理的变化,提出 了一种彩色图像的纹理触觉渲染方法^[31]。该方法根据像素点色调的冷暖和像素力计算切向力,由像 素点亮度和色调决定约束空间利用惩罚算法计算法向力。这种渲染方法有效解决了彩色图像灰度化 过程中造成纹理缺失的问题。

2012年, Saga等在Minsky等的研究基础上,通过对比感知实验,论证了在0—22 mm的波长范围内,波长与感觉强度呈负相关关系,并且建立了深度图像的空间波长与触觉力的数学模型,使人感受到形状、纹理等触觉信息^[32]。该算法首先利用Haar小波变换,提取第*i*个相位图像的波长强度*A*:

$$\overline{x_{i}} = \frac{1}{2^{i}} \sum_{x=1}^{2^{i}} p_{i} (x, y = 2^{i-1})$$

$$\overline{y_{i}} = \frac{1}{2^{i}} \sum_{y=1}^{2^{i}} p_{i} (x, y = 2^{i-1})$$

$$A_{x_{i}} = \log_{2} \overline{x_{i}}$$

$$A_{y_i} = \log_2 \overline{y_i} \tag{1}$$

式中, \bar{x}_i 和 \bar{y}_i 分别为x方向和y方向中心线上每个像素的平均 值, $p_i(x, y)$ 为相位图像的像素值, A_{x_i} 和 A_{y_i} 分别为第i个相位 图像x方向和y方向的波长强度。

然后计算不同空间波长上切向力振幅的补偿权重G(x):

$$G(x) = C \exp\left[2.0 - \log_2 A_{x_1}\right]$$
(12)

最后,根据Minsky等的研究结论,计算切向力
$$F_{px}(x)$$
:



但是,这种渲染方法可应用的波长局限于"0—22mm",使得可渲染的切向力的范围受到了限制, 当波长超过22mm时,这种渲染方法将不再适用。

2013年,Kim等^[33]提出了一种应用于平面触觉再现的3D特征触觉渲染方法。首先通过主观感知实验拟合出驱动信号与主观感知摩擦力强度的心理物理模型:

$$Y = 1.24X - 1.05 \tag{14}$$

式中*Y*为主观感知摩擦力强度的对数,*X*为驱动信号幅度的对数。然后,提出了利用梯度特征和手指滑动速度计算接触点摩擦力的数学模型,步骤如下:

(1)从二维灰度图像中计算深度分布的梯度场

$$\nabla F(x,y) = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}\right) = \frac{\partial F}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial F}{\partial y}\vec{j}$$
(15)

式中F(x, y)是二维图像的深度分布。

(2)定义手指运动的方向向量

$$\overline{V}_{i} = \frac{x_{i} - x_{i-1}}{\left|x_{i} - x_{i-1}\right|}$$
(16)

式中x_i是时间为t_i时手指的位置向量。

(3)计算感知摩擦力

$$f_i = f_0 |\nabla F| \cos\theta_i = f_0 \nabla F \cdot \overrightarrow{V}_i \tag{17}$$

式中, f,是时间为t,时的感知摩擦力的标量值, f,为非零比例因子, θ,为两个向量间的夹角。

最后,结合心理物理模型,计算设备的控制电压,过程如图20所示。

这种渲染方法仅使用静电力效应产生的切向摩擦力来模拟平面触摸表面的几何特征,并且可以









图 19 掩膜渲染方法^[30] Figure 19 Mask rendering method.^[30] 轻松的渲染各种视觉对象, 创建逼真可信的触觉体验。

2013年,田磊等利用偏微分方程将图像的轮廓形状信息和细节纹理信息分别提取出来,对于轮廓形状信息采用阴影恢复形状法进行三维重建并且利用 God-object 算法进行力触觉渲染,对于细节纹理信息直接将像素灰度值映射为切向力和法向力^[34]。这种渲染方法,对轮廓形状信息和细节纹理各自的特点有针对性的选取不同的力渲染方法,适用于具有丰富纹理信息的图像,能有效提高纹理识别准确度。

2015年, Meyer等^[35]从视觉和听觉纹理模型中汲取灵感,提出利用空间谱图信息重构触觉纹理的概念。研究人类可以感知局部特征的长度尺度,并利用局部特征的光谱图表征纹理。通过实验探究发现,采用0.2mm的窗重构图像的还原度最高。但是这种方法,并没有探究真实纹理与虚拟纹理的相似性,触觉效果的真实感较差。

2016年,王婷婷等利用图像的不同频率分量反应粗糙度、凹陷程度、轮廓等不同的纹理特征信息,采用局部傅里叶变换法对图像进行频率分离,提取表征局部纹理特征信息的频率分量(图21)^[36],利用Kim等提出的静电力心理物理学模型,将局部纹理特征信息映射为驱动信号的幅度。这种方法适用于纹理变化较小的图像,但是对于纹理变化剧烈的图像,纹理特征信息会被划分为高频分量在 滤波过程滤除,造成纹理失真。





2017年,吴赛文等提出利用静电力驱动信号的幅度和频率联合渲染图像的纹理信息的方法^[16]。 该算法首先提取图像梯度反映图像纹理的变化,再分别用驱动信号的幅度去渲染图像纹理的高度信 息,驱动信号的频率去渲染图像纹理的硬度和颗粒度信息(图22)。相比于单一的驱动信号幅度参量 的渲染方法,这种多参量联合渲染的方法有效提高了触觉再现效果。

2017年,Kim等提出了一种3D视觉对象触觉渲染方法^[37]。首先利用Sobel算子提取3D对象的 曲率和几何特征并进一步将纹理划分为若干区域,与不同的触觉反馈信号进行映射(例如,破碎部 分上的颠簸信号,面部上的平滑信号),如图23所示。通过这种渲染方法,用户不仅可以感知几何 形状和纹理,而且还可以感知来自3D对象的特定区域的反馈,有效提高了触觉反馈的真实感。

基于视觉对象特征的渲染方法通用性强,易应用于各种触觉反馈设备,建模过程复杂度低,但 所呈现的触觉真实感有待提高。



图 22 频率和幅度联合渲染^[16]

Figure 22 Joint rendering of frequency and amplitude.^[16]



图 23 3D视觉对象触觉渲染方法.¹³⁷ (a) 3D视觉对象;(b) 特征提取;(c) 不同触觉反馈信号映射 Figure 23 Tactile rendering of 3D visual objects.^{137]} (a) 3D visual object; (b) Feature extraction; (c) Mapping of different tactile feedback signals.

3.2 基于实测真实纹理触觉特征的渲染方法

基于实测真实纹理触觉特征的渲染方法是近年来一种新兴的技术,它通过扫描真实纹理物理表 面,采集记录能够表征纹理变化的触觉特征信号,建立力触觉渲染模型,在触觉再现系统上实现触 觉重现。这种渲染方法,往往需要高精度的传感设备作为中间工具采集和记录数据,并且建模过程 复杂,通常适用于各向同性材质的触觉渲染,呈现的触觉真实感较强。

2006年, Vasudevan等首次提出了"记录"纹理的概念,通过纹理采集工具探索纹理表面,记录水平方向的移动速度和垂直方向的振动情况,建立虚拟表面纹理的力触觉模型,再通过力反馈装置重现纹理触觉^[38]。这种记录和再现纹理的算法较为简单,可以容易地再现具有均匀纹理的平面表面触觉。

2007年,Andrews和Lang采用低成本移动式触摸探头和基于图像的跟踪技术,通过扫描真实物体表面纹理,采集加速度信息和力信息,映射为物体表面轮廓高度信息。根据轮廓高度信息,计算接触点的接触压力 F_c 、切向摩擦力 F_{PX} 和法向力 F_z ,合成接触点的触觉力F,通过力反馈设备重现触觉,过程如图24所示^[39]。

2012年, Romano等自主研发了一个运动捕捉触觉采集系统(图25), 该系统可以采集并记录随

时间变化的三维加速度,接触位置和接触力信号^[40]。 将三维加速度信号合成为等效的一维加速度信号,然 后使用线性预测编码将原始时域触觉信号转换为频域 纹理振动信号,通过音圈电机振动再现纹理触觉。这 种渲染方法实现了较为真实的触觉体验,但是需要恒 定速度和力值的长数据流,使得采集和建模的时间 较长。

2014年,Culbertson等提出了一种在自然且无约 束运动期间记录的数据创建触觉纹理模型的方法^[41]。 利用纹理采集装置(图26)扫描纹理表面,获得任意速 度和压力值下的力信号与加速度信号,将记录的数据 解析成短段,用来表示相应力和速度下的表面纹理感 觉。为每个数据段创建一个低阶自回归(AR)模型,每 个AR模型都由每个数据段的力平均值和速度平均值 确定,并存储在Delaunay三角剖分中,以创建给定纹 理的模型集。当用户与触觉再现系统交互时,使用这 些纹理模型集实时渲染合成振动信号。这种渲染方 法,可以准确再现真实纹理的粗糙度,但对硬度和光 滑感的渲染效果不佳。

2017年,Abdulali等提出了一种新的样本选择算法。该算法从纹理采集装置获取的原始数据中(图27),提取模型点集和相应的加速度模式,通过在多个独立试验中组合建模数据,在消除异常值的同时从每个独立试验中选择重要模型点^[42]。这种渲染方法容易与底层触觉建模算法一起使用,且不会影响渲染质量。但在当前算法中,异常检测是迭代执行的,在某些情况下,检测的迭代性质可能导致错误的结果。

2017年, Ilkhani等⁽⁴³⁾提出一种基于静电力触觉再 现装置的数据驱动纹理渲染方法,通过纹理采集装置 (图28),记录在纹理样本表面的移动过程中的加速度, 将记录的加速度信号放大并转换为静电力触觉再现驱 动电压信号幅值,呈现与真实纹理触感相似的虚拟纹 理。虽然这渲染方法中,没有考虑交互过程中手指形



图 24 Andrews 和 Lang 提出的這染方法^[39] Figure 24 Rendering methods proposed by Andrews and Lang.^[39]







图 26 Culbertson 等研发的纹理采集装置^[41] Figure 26 Texture acquisition device developed by Culbertson et al.^[41]

变等因素的影响,但是相比于单纯的调整周期性激励信号呈现虚拟纹理的方法,这种方法的触觉效 果更逼真。

2018年,Osgouei等开发一种电动线性摩擦计(图 29),通过扫描纹理表面,记录在不同速度和 不同压力下的切向摩擦力,并提出了一种利用逆NARX神经网络模型来生成类似PRBS驱动信号的 方法,通过静电力触觉再现装置实现与真实纹理相似的触觉效果^[44]。这种渲染方法,容易受扫描速 度的影响,当扫描速度过快时,容易造成提取的纹理形状变形。

2018年, Sianov等¹⁴³将机器学习的想法扩展到数据驱动的触觉渲染领域,提出了一种有助于处 理高维触觉交互信号的数据驱动渲染方法。首先记录采集大量力和位移数据集(图30),然后利用这 些数据构建维度缩减、紧凑的频域特征空间,在此特征空间中进行特征选择,丢弃数据集中的冗余 样本,减小原始数据集的大小,最终生成具有实时性的时域触觉模型。这种渲染方法的优点在于在 频域中构建紧凑的特征空间,通过特征选择过程实现有效的数据缩减。 2018年,北京航空航天大学焦健等提出了一种数 据驱动算法,用于在静电力触觉再现装置上对织物纹 理进行触觉渲染。他们设计了一种新的测量装置测量 手指在真实织物上滑动期间的摩擦力、法向力和位移 (图31)^[46]。使用这些测量值,从记录的摩擦力和法向 力计算摩擦系数。然后,通过控制施加到静电力触觉 再现装置的电压来再现摩擦系数,呈现被测织物的触 觉纹理。

基于实测真实纹理触觉特征的渲染方法可以呈现 与真实表面高度相似的触觉效果,但是对采集的纹理 触觉信号的数据精度要求很高,需要采集装置的传感 设备具有很高的精度,且建模过程复杂,数据量大, 对数据处理过程提出了更高的要求。

上述基于视觉对象特征的模型驱动渲染方法,均是 利用视觉对象的像素亮度值、梯度、波长、频率分量等 全部或者部分特征信息反应视觉对象形状或纹理的变化, 并建立静电力触觉再现驱动信号的映射模型。这种渲染 方法因为考虑的特征较少,映射模型复杂度低,实现相 对容易,有效提高了用户识别率。但是渲染效果易受视 觉对象分辨率、光源等因素的影响,且建模过程中没有 考虑渲染对象的柔软度、弹性等物理属性对触觉的影响, 所呈现的触感的真实性有待提高。

基于实测真实纹理的触觉特征的渲染方法近年来才 应用于静电力触觉再现领域的研究中,并逐渐与机器学 习、神经网络等新兴技术结合,用来提高渲染效果的真 实感。基于视觉对象特征的模型驱动渲染方法强调理论 推导,但是得到的驱动信号是以周期信号为主的相对简 单的信号;基于实测真实纹理的触觉特征的渲染方法关 注实验测量,得到的驱动信号是以数据驱动的,信号更 为复杂。这种渲染方法对各项同性材质的渲染效果较佳, 但是数据量大且处理过程复杂,需要针对每种材质进行 采集渲染并建立庞大的数据库,这几乎是一项无法完成 的任务。

需要指出,现有的静电力触觉渲染方法主要是从力 触觉再现的角度实现渲染,相似度可以达到80%左右的 水平^[43],但是对温度、湿度、弹性等影响触觉体验的因素 研究较少。



图 27 Abdulali 等研发的纹理采集装置^[42] Figure 27 Texture acquisition device developed by Abdulali et al.^[42]



图 28 Ilkhani 等研发的纹理采集装置^[43] Figure 28 Texture acquisition device developed by Ilkhani et al.^[43]



图 29 电动线性摩擦计^[44] Figure 29 Electric linear tribometer.^[44]

4 触觉再现效果评测研究现状

人体触感形成的机理十分复杂⁴⁷¹,且与个体的心理和生理等有关,评价用户在触觉再现终端上 感受到的触觉效果涉及到电子学、生理学、心理学、精神物理学等多学科的交叉问题。当前对静电 力触觉再现效果的评价主要从客观和主观两方面进行(图32)。客观评测主要是搭建力测量平台,测 量指尖力信息,而主观评价主要是采用基于精神物理学的科研调查问卷^[41]、访谈、评估等方式,探究人体触觉感受与驱动参数和力参数之间的关系^[48,49],运用经典的人机 交互理论和法则,采用任务绩效方式,评估融入触觉再 现技术的人机交互方式如何影响用户的交互效率和准 确性^[50]。

触觉再现效果的客观评测主要揭示驱动信号参数对 手指指尖静电力的影响,包括人体手指皮肤的电特性和 触觉再现的系统模型的分析,指尖静电力的参数的测量, 建立静电力强度与激励信号幅度和频率间的映射关系。 早在1976年,Yamamoto等研究表皮角质层的电模型,角 质层的电阳率与距皮肤表皮深度呈指数关系,角质层的 介电常数则与测试频率有关^[51]。Shultz等将手指皮肤角质 层等效成RC模型,推导了手指电特性参数与静电力的关 系^[52]。2013年,美国西北大学的Meyer等^[14]首次提出 通过测力传感器测量指尖静电力,通过静态和动态分 析了触觉再现系统,并设计了图33所示的力测量装 置,验证了力与驱动信号频率和幅度的关系,但力与 频率的实测关系与模型仿真结果不符。2013年,法国 里尔大学 Giraud 等^[19]忽略了角质层的容抗,建立了系 统等效电路模型,利用力测量平台测量了力的大小, 发现力是驱动电压的二阶响应。2014年,法国里尔大 学Vezzoli等^[53]建立了手指的电气模型,并通过测量静 电力验证了模型的有效性,力测量平台如图34所示。 2015年,利用摩擦计测量手指尖的静态与动态摩擦 力^[20]; 2015年,韩国光州科学技术研究院 Kim 等^[54]采 用静电力测量和精神物理学实验相结合的方法验证了 均匀电振动方法的有效性。虽然各机构对静电力进行 了客观测量,但是并没有研究力与驱动信号波形之间 的关系,未建立力与驱动信号参数可靠的数学模型, 未讨论静电力与触觉感知之间的关系。2017年,吉林 大学龙慧^[5]以Nano17测力传感器为核心传感器,搭建 指尖静电力测量平台(图35),研究驱动信号波形、频 率和幅度对指尖静电力波形、频率和幅度的影响。

目前对触觉再现效果的主观评价工作主要以人的

表面2 表面1 1 7 5 7 7 7 7 7 8 般位置网格





图 31 焦健等研发的纹理采集装置[49]







主观感受为主,探测人体的敏感频率、感知阈值和分辨阈值。Bolanowski等通过分析皮肤触觉感受器的分布和组成,仿真分析出人体的敏感频率在250Hz左右^[50]。2001年,Accot和Zhai采用Steering Law任务设计对输入设备的形式进行了比较和评估^[57]。2006年,Kaczmarek等对静电力触觉激励信号的不同极性进行了探索性研究,主要对正、负极和两种不同占空比的正负极等4种极性的驱动信号进行实验探测,采用传统精神物理学方法进行最小感知电压阈值实验评测,得出人体对负极电压驱动更为敏感的结论^[58]。Wijekoon等在静电力触觉再现原理样机上初步探索了静电力触觉的强度与驱动信号幅度和频率的关系,采用量级评估方法,建立了信号幅度和感知强度的统计关系,当驱动信号频率为80Hz时可得到最大感知强度,为触摸屏的触觉接口设计提供了依据^[49]。2010年,Bau等利用Tesla Touch系统^[13],完成了3个精神物理学实验和1个用户主观评价实验,以问卷的形式

探测了基于触觉再现技术的绝对感知阈值和频率幅值的分辨阈值,通过用户主观评价实验,运用五点 Likert量表评估了触觉的舒适度。2014年,Culbertson 等采用疲劳测试的问卷调查法^[41],对触觉再现的光滑 度、粗糙度等感知特性进行了评估。

目前触觉再现效果评测研究的主要方法,包括以 静电力测量为基础的客观评测方法和以精神物理学理 论为基础的主观评测方法。如前所述,触觉力的大小 只是触觉感受的一个方面,即便测量结果再精确,也 无法完全反映触觉的效果。像温度、湿度、弹性等影 响触觉体验的因素的研究因缺少必要的理论支持,尚 无法进行定量的测量,静电力测量的客观评价手段至 少是比较现实的一种评价方法。在将来的工作中,从 生理学角度,通过记录人体在经历不同触觉体验时脑 电波的变化情况,来评估触觉再现效果,也许是一个 有效的客观评测方向。对于触觉再现效果的相似度、 粗糙度、光滑度等评价方法局限于主观打分或问卷调 查等方法,实验工作量较大,评价结果易受个体差异 的影响。

综上所述,当前针对主客观评价的关系不明确, 缺乏评价的量化模型,未形成定量化、可标准化且成 体系的触觉再现评价方法。因此,开展对静电力触觉 再现效果的评价工作,对开发最适用于用户裸指触觉 交互的触觉接口,实现裸指式触觉再现移动终端的应 用具有十分重要的意义。

5 结论

本文介绍了静电力触觉再现技术的原理,并从静 电力触觉再现的典型装置、触觉渲染算法、触觉再现 效果评测方法等几个方面做了详细论述。在此基础上 对静电力触觉再现技术发展前景的做出以下判断:(1) 静电力触觉再现技术是在多媒体终端表面实现低功耗 裸指触觉再现功能的优选方案;(2)静电力触觉再现技



图 33 美国西北大学测力装置[14]

Figure 33 Force measuring device of northwestern university.^[14]



图 34 法国里尔大学测力装置^[53] Figure 34 Force measuring device of Lille University in France.^[53]



图 35 吉林大学测力装置^[55] Figure 35 Force measuring device of Jilin University.^[55]

术渲染动态范围尚有不足,针对粗糙纹理的呈现效果较佳,但对细腻纹理的呈现效果不理想,多元 融合技术可能是解决途径之一;(3)从触觉再现效果评测的角度看,目前的触觉效果还远未达到像 音频和视频等领域动辄识别率在95%以上的逼真程度,说明该领域尚有相当大的进步空间;(4)静 电力触觉再现技术本质上属于应用科学,理论研究和商业应用的相互促进、良性推动是其进步的必 由之路,因此急需一款较为成熟的原理样机在商业上推广应用。

参考文献

 蒋树强, 闵巍庆, 王树徽. 面向智能交互的图像识别技术综述与展望. 计算机研究与发展, 2016, 53: 113-122
 Jiang S Q, Min W Q, Wang S H. Survey and prospect of intelligent interaction-oriented image recognition techniques. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53: 113-122
 DOI:10.7544/issn1000-1239.2016.20150689

- 2 张全贵,闫健卓,王普.基于语义虚拟接口的三维用户界面组态.北京工业大学学报,2012,38:1062-1067
- Zhang Q G, Yan J Z, Wang P. 3D user interface configuration based on semantic virtual connector. Journal of Bejing University of Technology, 2012, 38: 1062–1067
- 3 季白桦, 袁修干, 温文彪. 三维人体运动数据提取的人机交互方法及实验. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(1): 91-94 Ji B H, Yan X G, Wen W B. Interactive method and experiment in 3D human motion data abstraction. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(1): 91-94 DOI:10.3969/j.issn.1001-5965.2000.01.025
- 4 Campbell P. Editorial on special issue on big data: Community cleverness required. Nature, 2008, 455: 1
- 5 Mallinckrodt E, Hughes A L, Sleator Jr W. Perception by the skin of electrically induced vibrations. Science, 1953, 118 (3062): 277
- 6 Strong R M, Troxel D E. An electrotactile display. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 1970, 11: 72-79
- 7 Beebe D J, Hymel C M, Kaczmarek K A, Tyler M E. A polyimide-on-silicon electrostatic fingertip tactile display. In: Proceedings of 17th International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 1995: 1545–1546
- 8 Tang H, Beebe DJ. A microfabricated electrostatic haptic display for persons with visual impairments. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1998, 6(3): 241–248 DOI:DOI:10.1109/86.712216
- 9 Robles-De-La-Torre G, Hayward V. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. Nature, 2001, 412(6845): 445–448
- 10 Yamamoto A, Ishii T, Higuchi T. Electrostatic tactile display for presenting surface roughness sensation. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003, 2: 680–684 DOI:10.1109/ICIT.2003.1290736
- 11 Yamamoto A, Nagasawa S, Yamamoto H, Higuchi T. Electrostatic tactile display with thin film slider and its application to tactile telepresentation systems. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(2): 168–177 DOI:10.1109/tvcg.2006.28
- 12 Linjama J, Mäkinen V. E-sense screen: Novel haptic display with capacitive electrosensory interface. In: 4th Workshop for Haptic and Audio Interaction Design. HAID, 2009
- 13 Bau O, Poupyrev I, Israr A, Harrison C. TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In: Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology. New York, USA: ACM, 2010: 283–292
- Meyer D J, Peshkin M A, Colgate J E. Fingertip friction modulation due to electrostatic attraction. In: World Haptics Conference (WHC). Daejeon, South Korea, 2013: 43–48
 DOI:10.1109/WHC.2013.6548382
- 15 Makinen V, Suvanto P, Linjama J. Method and apparatus for sensory stimulation. US Patent: 7924144, 2011-4-12
- 16 Wu S W, Sun X Y, Wang Q L, Chen J. Tactile modeling and rendering image-textures based on electrovibration. The Visual Computer, 2017, 33(5): 637–646 DOI:10.1007/s00371-016-1214-3
- 17 Wang T T, Sun X Y. Electrostatic tactile rendering of image based on shape from shading. In: International Conference on Audio, Language and Image Processing. Shanghai, China: 2014, 775–779 DOI:10.1109/ICALIP.2014.7009900
- 18 吴赛文,陈建,孙晓颖.面向视频感知的静电力触觉渲染方法.计算机应用,2016,36(4):1137-1140
 Wu S W, Chen J, Sun X Y. Electrostatic force tactile rendering method for video perception. Journal of Computer Application, 2016, 36(4): 1137-1140
 DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.04.1137
- 19 Giraud F, Amberg M, Lemaire-Semail B. Merging two tactile stimulation principles: Electrovibration and squeeze film effect. In: World Haptics Conference (WHC). Daejeon, South Korea, 2013: 199–203 DOI:10.1109/WHC.2013.6548408
- 20 Vezzoli E, Messaoud W B, Amberg M, Giraud F, Lemaire-Semail B, Bueno M A. Physical and perceptual independence of ultrasonic vibration and electrovibration for friction modulation. IEEE Transactions on Haptics, 2015, 8(2): 235–239 DOI:10.1109/toh.2015.2430353

- 21 Ito K, Okamoto S, Elfekey H, Kajimto H, Yamada Y. A texture display using vibrotactile and electrostatic friction stimuli surpasses one based on either type of stimulus. IEEE International Conference on Systems. Man, and Cybernetics (SMC). Banff, AB, Canada: 2017, 2343–2348 DOI:10.1109/SMC.2017.8122972
- 22 Lécuyer A, Burkhardt J M, Etienne L. Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudohaptic textures. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Vienna, Austria: ACM, 2004, 239–246
- 23 Xu C, Israr A, Poupyrev I, Bau O, Harrison C. Tactile display for the visually impaired using TeslaTouch. In: CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. Vancouver, BC, Canada: ACM, 2011: 317–322
- Park J, Doxon A J, Provancher W R, Johnson D E, Tan H Z. Haptic edge sharpness perception with a contact location display. IEEE Transactions on Haptics, 2012, 5(4): 323–331
 DOI:10.1109/toh.2012.14
- 25 Kocsis M B, Cholewiak S A, Traylor R M, Adelstein B D, Daniel Hirleman E, Tan H Z. Discrimination of real and virtual surfaces with sinusoidal and triangular gratings using the fingertip and stylus. IEEE Transactions on Haptics, 2013, 6(2): 181–192
 DOI:10.1100/tab.2012.21

DOI:10.1109/toh.2012.31

- 26 Perez A G, Lobo D, Chinello F, Cirio G, Malvezzi M, Martín J S, Prattichizzo D, Otaduy M A. Soft finger tactile rendering for wearable haptics. World Haptics Conference (WHC). Evanston, IL, USA: IEEE, 2015, 327–332 DOI:10.1109/WHC.2015.7177733
- 27 Ito K, Okamoto S, Elfekey H, Yamada Y. High-Quality Texture Display: The Use of Vibrotactile and Variable-Friction Stimuli in Conjunction. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2017: 125–130 DOI:10.1007/978-981-10-4157-0_22
- 28 Osgouei R H, Kim J R, Choi S. Improving 3D shape recognition withelectrostatic friction display. IEEE Transactions on Haptics, 2017, 10(4): 533-544 DOI:10.1109/toh.2017.2710314
- 29 Minsky M, Ming O Y, Steele O, Brooks F P Jr, Behensky M. Feeling and seeing: Issues in force display. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1990, 24(2): 235–241 DOI:10.1145/91394.91451
- 30 Vasudevan H, Manivannan M. Tangible images: runtime generation of haptic textures from images. In: Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Reno, NE, USA, 2008: 357–360 DOI:10.1109/HAPTICS.2008.4479971
- 31 李佳璐, 宋爱国, 张小瑞. 彩色图像的纹理力/触觉渲染方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23: 719-724 Li J L, Song A G, Zhang X R. Texture force/tactile rendering method for color images. Journal of computer aided design and graphics, 2011, 23: 719-724
- 32 Saga S, Deguchi K. Lateral-force-based 2. 5-dimensional tactile display for touch screen. In: Haptics Symposium (HAPTICS). Vancouver, BC, Canada: IEEE2012: 15-22 DOI:10.1109/HAPTIC.2012.6183764
- 33 Kim S C, Israr A, Poupyrev I. Tactile rendering of 3D features on touch surfaces. In: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology. St. Andrews, Scotland, United Kingdom: ACM, 2013: 531–538
- 34 田磊,宋爱国,王蔚.基于PDE方法的图像力触觉再现方法研究.仪器仪表学报,2013,34(10):2316-2321 Tian L, Song A G, Wang W. Research on the image haptic display method based on PDE. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2316-2321 DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.2013.10.023
- 35 Meyer D J, Peshkin M A, Colgate J E. Modeling and synthesis of tactile texture with spatial spectrograms for display on variable friction surfaces. World Haptics Conference (WHC). Evanston, IL, USA: IEEE, 2015, 125–130 DOI:10.1109/WHC.2015.7177702
- 36 王婷婷, 陈建, 孙晓颖. 图像局部纹理特性的静电力触觉渲染. 中国图象图形学报, 2016, 21: 1383–1391 Wang T T, Chen J, Sun X Y. Electrostatic tactile rendering of local texture characteristics of image. Journal of Image and Graphics, 2016, 21: 1383–1391

- 37 Kim J R, Shin S. Touch3D: touchscreen interaction on multiscopic 3D with electrovibration haptics. In: ACM SIGGRAPH 2017 Posters. Los Angeles, California: ACM, 2017: 1–2
- 38 Vasudevan H, Manivannan M. Recordable haptic textures. In: International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE 2006). Ottawa, Ont, Canada: IEEE, 2006: 130–133 DOI:10.1109/HAVE.2006.283779
- 39 Andrews S, Lang J. Interactive scanning of haptic textures and surface compliance. Sixth International Conference on 3d Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007). Montreal, QC, Canada: 2007, 99–106 DOI:10.1109/3DIM.2007.30
- 40 Romano J M, Kuchenbecker K J. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. IEEE Transactions on Haptics, 2012, 5(2): 109–119 DOI:10.1109/toh.2011.38
- 41 Culbertson H, Unwin J, Kuchenbecker K J. Modeling and rendering realistic textures from unconstrained tool-surface interactions. IEEE Transactions on Haptics, 2014, 7(3): 381–393 DOI:10.1109/toh.2014.2316797
- 42 Abdulali A, Hassan W, Jeon S. Sample selection of multi-trial data for data-driven haptic texture modeling. World Haptics Conference (WHC). Munich, Germany: IEEE, 2017, 66–71 DOI:10.1109/WHC.2017.7989878
- 43 Ilkhani G, Aziziaghdam M, Samur E. Data-driven texture rendering on an electrostatic tactile display. International Journal of Human–Computer Interaction, 2017, 33(9): 756–770 DOI:10.1080/10447318.2017.1286766
- 44 Osgouei R H, Shin S, Kim J R, Choi S. An inverse neural network model for data-driven texture rendering on electrovibration display. Haptics Symposium (HAPTICS). San Francisco, CA, USA, IEEE, 2018: 270–277 DOI:10.1109/HAPTICS.2018.8357187
- 45 Sianov A, Harders M. Exploring feature-based learning for data-driven haptic rendering. IEEE Transactions on Haptics, 2018, 11(3): 388–399

DOI:10.1109/toh.2018.2817483

- 46 Jiao J, Zhang Y R, Wang D X, Visell Y, Cao D K, Guo X W, Sun X Y. Data-driven rendering of fabric textures on electrostatic tactile displays. Haptics Symposium (HAPTICS). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2018, 169–174 DOI:10.1109/HAPTICS.2018.8357171
- 47 Tezuka M, Kitamura N, Tanaka K, Miki N. Presentation of various tactile sensations using micro-needle electrotactile display. PLoS One, 2016, 11(2): e0148410 DOI:10.1371/journal.pone.0148410
- 48 Lim J M, Jeong H T. Force and displacement analysis of a haptic touchscreen. International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, USA, IEEE, 2015, 589–591 DOI:10.1109/ICCE.2015.7066539
- 49 Wijekoon D, Cecchinato M E, Hoggan E, Linjama J. Electrostatic Modulated Friction as Tactile Feedback: Intensity Perception. Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 613-624

DOI:10.1007/978-3-642-31401-8_54

- 50 Accot J, Zhai S. Beyond fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In: Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems. ACM, 1997, 97(1): 295–302
- 51 Yamamoto T, Yamamoto Y. Electrical properties of the epidermal stratum corneum. Medical & Biological Engineering, 1976, 14(2): 151–158 DOI:10.1007/bf02478741
- 52 Shultz C D, Peshkin M A, Colgate J E. Surface haptics via electroadhesion: Expanding electrovibration with Johnsen and Rahbek. World Haptics Conference (WHC). Evanston, IL, USA: IEEE, 2015: 57–62 DOI:10.1109/WHC.2015.7177691
- 53 Vezzoli E, Amberg M, Giraud F, Lemaire-Semail B. Electrovibration Modeling Analysis. In: Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 369–376

- 54 Kim H, Kang J, Kim K D, Lim K M, Ryu J. Method for providing electrovibration with uniform intensity. IEEE Transactions on Haptics, 2015, 8(4): 492–496 DOI:10.1109/toh.2015.2476810
- 55 龙慧.静电力触觉再现效果测量建模与评价.长春:吉林大学,2017 Long H. Measurement modeling and evaluation for effect of electrostatic tactile display. Dissertation for Master Degree. Changchun: Jilin University, 2017
- 56 Bolanowski S J Jr, Gescheider G A, Verrillo R T, Checkosky C M. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. The Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 84(5): 1680–1694 DOI:10.1121/1.397184
- 57 Accot J, Zhai S. Scale effects in steering law tasks. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Seattle, Washington, USA: ACM, 2001: 1–8
- 58 Kaczmarek K A, Nammi K, Agarwal A K, Tyler M E, Haase S J, Beebe D J. Polarity effect in electrovibration for tactile display. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(10): 2047–2054 DOI:10.1109/tbme.2006.881804

Electrostatic tactile representation in multimedia mobile terminal

Xuezhi YAN*, Qiushuang WU, Xiaoying SUN

College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

* Corresponding author, yanxz@jlu. edu. cn Received: 10 January 2019 Accepted: 5 March 2019

Abstract Electrostatic tactile representation technology can enhance the authenticity and immersion of human-computer interaction by perception of tactile features such as the shape and texture of visual objects in touch screen in naked finger. Focusing on the application in multimedia terminal of electrostatic force tactile representation technology, this paper summarizes the typical devices of electrostatic tactile representation, tactile rendering model-driven and data-driven algorithm, driving signal loading method, tactile representation effect evaluation method and so on. The author's view on the development status and future prospects of this technology is presented as follows: (1) Electrostatic tactile representation technology is an optimization scheme for implementing the low power and bare finger tactile representation function on the surface of the multimedia terminal; (2) The rendering dynamic range of electrostatic tactile representation technology is still insufficient, and the rendering effect of rough texture is better, but there is no effective algorithm for the rendering of fine texture. Multiple fusion technology may be one of the solutions; (3) From the perspective of evaluation of tactile representation effect, which shows that there is still considerable room for improvement both in theoretical models and applied algorithms; (4) Electrostatic tactile representation technology is essentially an applied science. Mutual promotion and benign promotion of theoretical research and commercial application is the only way for its progress. Therefore, a more mature prototype of principle is urgently needed to be popularized and applied in commerce.

Keywords Electrostatic tactile; Rendering algorithm; Model-driven; Data-driven; Surface tactile representation; Human-computer interaction