arXiv:2602.03476v1 [cs.HC] 3 Feb 2026

TactDeform：受指腹变形启发的虚拟几何探索空间触觉反馈

Yihao Dong*悉尼大学计算机科学学院 澳大利亚新南威尔士州悉尼
yihao.dong@sydney.edu.au

Praneeth Bimsara Perera*悉尼大学计算机科学学院 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
pat0685@uni.sydney.edu.au

Chin-Teng Lin 澳大利亚人工智能研究所，悉尼科技大学计算机科学学院 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
chin-teng.lin@uts.edu.au

Craig T Jin 悉尼大学电气与计算机工程学院 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
craig.jin@sydney.edu.au

Anusha Withana 悉尼大学计算机科学学院 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚 悉尼大学悉尼纳米研究院 悉尼，新南威尔士州，澳大利亚
anusha.withana@sydney.edu.au

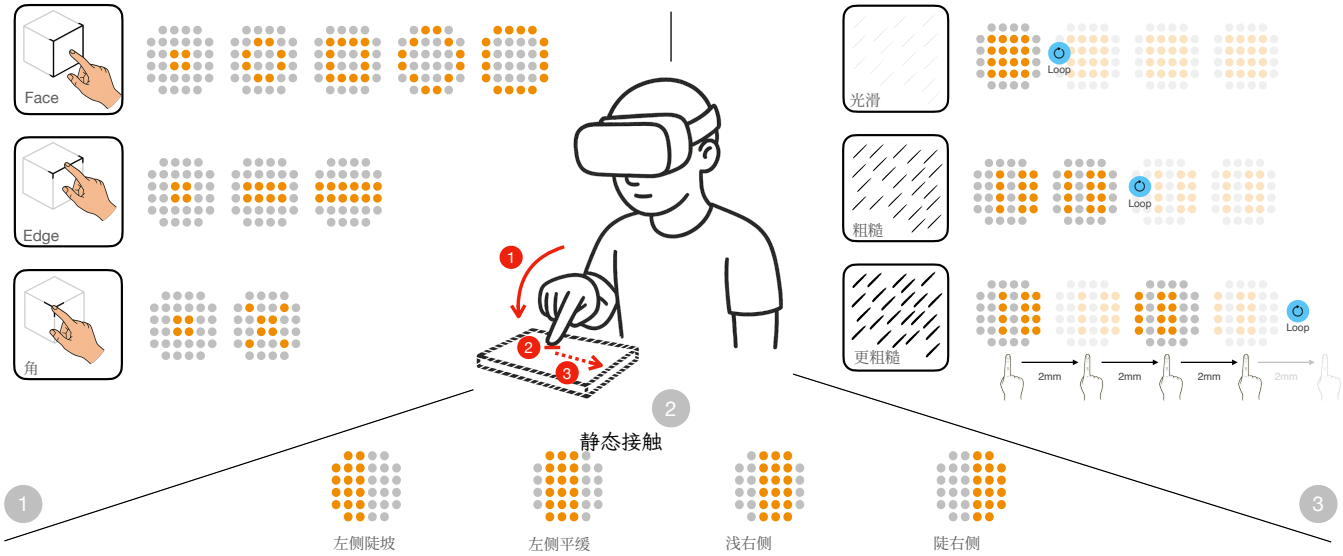

图 1：TactDeform 系统概述。TactDeform 通过双情境方法渲染时空触觉模式，该方法同时适应交互情境（接近、接触、滑动）和几何情境（特征与纹理）。该系统使用32电极阵列模拟自然指腹变形：(1) 接近几何特征时，面会触发扩展模式，边会触发方向性模式，角会触发集中模式；(2) 静态接触会根据手指方向移动刺激区域；(3) 滑过纹理表面会产生与运动同步的参数化模式偏移，光滑表面保持静态模式，粗糙纹理在每个运动周期偏移2-4毫米。

*两位作者对本研究贡献相同。

本作品根据知识共享署名 4.0 国际许可协议授权。*CHI '26*，西班牙巴塞罗那
© 2026 版权所有归所有者/作者所有。ACM ISBN 979-8-4007-2278-3/2026/04 https://doi.org/10.1145/3772318.3791699

摘要

空间触觉反馈能够增强虚拟现实应用中几何探索的真实感。目前的振动触觉方法在呈现不同三维几何体所需的空间和时间分辨率方面往往面临挑战。受探索三维物体时指腹自然变形的启发，以及

表面时，我们提出了 TactDeform，这是一种参数化方法，利用佩戴于手指上的电触觉界面呈现时空触觉模式。系统根据交互情境（接近、接触和滑动）以及几何情境（几何特征和纹理），动态呈现电触觉模式，模拟真实触摸探索过程中产生的变形。用户研究结果（N=24）表明，与基线方法相比，所提出的方法能够实现更高的纹理辨别和几何特征识别。根据自由三维几何探索阶段的结果，我们总结了可为未来触觉界面设计提供参考的见解。

CCS 概念

• **以人为中心的计算 → 触觉设备**。

关键词

触觉反馈、虚拟现实、电触觉

ACM参考文献格式：

YihaoDong、Praneeth BimsaraPerera、Chin-Teng Lin、Craig TJin 和 Anusha Withana。2026。TactDeform：受指腹变形启发的空间触觉反馈，用于虚拟几何探索。载于《*2026*年 *CHI* 人机交互系统中的人为因素大会论文集》（*CHI '26*），*2026*年*4*月*13*日至*17*日，西班牙巴塞罗那。ACM，纽约州纽约，美国，16页。https: //doi.org/10.1145/3772318.3791699

1 引言

虚拟现实（VR）在复现现实世界的感官体验方面取得了显著进展。这使 VR 成为医学培训 [6,47, 74, 76], 仿真 [7, 22, 29, 62, 77], 以及互动娱乐 [27, 37, 73]等应用的有力平台。然而，与视觉和听觉体验的逼真度相比，在探索和操控过程中呈现虚拟几何并实现逼真的触觉体验仍然是一项挑战。这是因为自然的几何交互涉及高分辨率的皮肤（触觉） [19, 20] 和动觉（力） [45, 60, 63] 感觉，而使用单一触觉模态很难在 VR 中令人信服地复现这些感觉。为克服这一问题，Suga 等人 [54] 探索了结合电触觉和动觉反馈的多模态触觉界面，以增强虚拟现实环境中的形状识别。

然而，由于接地式力反馈机制的物理限制，这种方法只能渲染较小的“手指大小”虚拟形状，从而限制了其在虚拟环境中进行自由形态几何探索的实用性。这是外骨骼 [60, 63] 或接地式力反馈臂 [10], 等动觉反馈设备的固有限制，因为它们往往笨重且会对身体活动造成限制。这些因素严重制约了三维虚拟几何体的逼真且实用的触觉渲染。

为解决这一问题，我们提出*TactDeform*，一种利用电触觉反馈呈现 3D 虚拟几何体的参数化方法。电触觉界面无需笨重的机械致动器，因此能够采用轻薄、灵活的外形规格，并可提供快速且局部化的触觉响应 [66, 70]。*TactDeform* 的设计源于一个具体洞见：当我们在现实世界中触摸三维几何体时，指腹会以具有特征性、且取决于几何特征的方式发生变形。*TactDeform* 基于对两种交互情境的理解来调整电触觉刺激模式。

1）用户如何接近表面、与之接触（触摸）或探索表面（例如在表面上滑动）；2）用户交互的几何特征，包括面、棱、角和纹理（见图 1）。根据这两种交互情境，*TactDeform* 通过轻巧的指戴式界面，采用高分辨率、针对具体情境的电触觉刺激来模拟指腹变形。它并非通过机械力反馈使皮肤发生物理变形，而是以参数化方式编码指尖在现实交互中自然产生的形变的空间与时间模式。

我们通过一项分两个阶段、涉及24名参与者的用户研究，评估了*TactDeform*的有效性。在第一阶段，我们使用参数化模式评估用户识别几何特征和纹理的能力。第二阶段是一项自由形态三维几何探索研究，涵盖从简单图元到复杂形状的物体，并将TactDeform与其他触觉渲染方法进行比较。这项研究为用户如何自然地将时空触觉反馈融入物体探索策略提供了定性见解。结果表明，TactDeform在几何特征识别（85.7%）和纹理辨别（95.8%）方面均实现了较高准确率；定性分析还揭示了新兴的触觉引导的3D几何探索行为。总之，本文的贡献如下：

- *TactDeform*：一种参数化方法，通过受自然指腹变形启发的、基于特定情境的时空电触觉反馈模式，为三维物体交互呈现触觉反馈。
- *TactDeform* 的开源实现，以及将电触觉反馈整合到VR应用中的三维几何探索的设计指南 [1]。
- 定性分析结果揭示了由空间触觉反馈驱动的用户探索行为，凸显了电触觉界面增强VR物体交互体验的潜力。

2 相关工作

先前研究已证明，触觉技术对于提升用户与虚拟几何体交互时的用户体验至关重要。本节将回顾与本研究相关的现有文献，重点涉及三个领域：（1）电触觉反馈是呈现空间信息的一种可行触觉反馈方式；（2）VR中的三维几何触觉渲染；（3）基于参数与情境的触觉渲染方法。

2.1 空间渲染的电触觉反馈

电触觉刺激通过皮肤表面电极传递受控电脉冲，直接激活皮肤感觉神经，从而引发触觉感受 [20, 21]。通过调节振幅、频率和波形等参数，这些系统能够引发压力、振动和纹理等感觉 [13, 20, 69],，以及柔软度 [15, 55, 57],、温度 [44], 和味觉 [35] 等复杂感知。与振动触觉和力反馈相比，电触觉接口具备轻薄、轻便、灵活的

[1]https://github.com/aid-lab-org/TactDeform

外形规格 [66, 70]，且响应迅速 [19]。这种多功能性使其非常适用于手部和手指应用 [66, 70]。

尤其是在渲染空间分布的信息时，较高的空间分辨率至关重要。振动触觉致动器受机械串扰限制，力反馈则需要笨重的连杆机构；与之不同，电触觉接口可通过独立控制密集的电极阵列，实现毫米级精度 [50]。通过激活特定的电极子集，这类系统能够生成局部刺激模式，以呈现精细的空间细节，与皮肤天然的空间敏锐度相契合 [50]。近期的实现方案已将这些能力应用于虚拟现实 [39, 53], 无障碍 [2, 59], 和导航 [9] 应用中。

2.2 虚拟现实中的 3D 几何触觉渲染

触觉反馈能够增强虚拟现实中的空间理解，并支持医学培训、计算机辅助设计建模和无障碍界面等应用 [6, 11, 42]。然而，将几何特征编码为具有感知意义的模式，是一项根本性挑战。无论是力反馈 [53, 60], 、振动触觉 [3,33], ，还是电触觉刺激 [25, 41]，当前方法都难以满足一项关键要求：准确表征边和角 [64]。如果无法清晰地区分面、棱和角，用户就无法构建连贯的虚拟物体心理模型。实证研究结果表明，这种编码确实存在问题。例如，Suga 等人 [54]发现，形状辨别准确率从 50%（力反馈 +电触觉）降至 25%（仅电触觉），达到随机水平；这表明，尽管空间分辨率很高，当前的电触觉模式仍无法传递几何信息。Xu 等人 [67] 对简单二维形状的识别率仅达到 56%，这说明问题的根源在于编码不足，而不只是三维复杂性。Osgouei 等人 [38] 证实了这一局限：若没有大量视觉训练，用户无法自然地解读几何触觉模式。即使经过训练，识别过程仍然费力，而非直观，这表明用户必须学习任意的感知映射，而无法利用已有的触觉处理能力。

当前用于几何渲染的电触觉系统主要采用两种策略。均匀激活方法会在手指进入物体边界时激活所有电极 [59], ，提供二元接触反馈。接触区域映射方法则根据手指与虚拟表面的距离激活各个电极 [14], ，从而形成局部刺激模式。这些编码策略侧重于接触位置，却忽略了不同几何特征所产生的独特触觉线索，导致辨别表现较差。此外，电触觉引发的感觉（刺麻感、振动）可能不同于机械刺激引发的自然感觉，从而加剧这一问题。尽管存在这种差异，当电触觉刺激以自然交互情境为依据时，用户仍能直觉地适应人工感觉 [15, 16]。这表明，以自然触觉处理为基础的编码策略或可克服感知不匹配，即使感觉本身存在固有差异，也能实现有效的空间渲染。

2.3 基于参数与情境的触觉渲染

触觉界面从静态反馈向动态反馈的演进，标志着人们对如何编码触觉信息的认识发生了根本转变。运动耦合、力敏感和情境感知系统的最新进展充分体现了这一点，也凸显了自适应渲染的重要性 [15, 26, 30, 43, 51]。早期触觉系统无论用户如何交互，都会生成固定模式；即使经过训练，这种方法的识别率仍不足 60% [38]。表现有限的原因在于静态模式与触觉探索的动态特性不匹配：感觉会随着运动速度、接触压力和表面遍历而变化。

认识到触觉感知本质上是主动的，推动了运动耦合渲染系统的发展。Strohmeier等人 [51] 展示了相同的振动触觉脉冲会因与手指运动的同步方式不同而产生截然不同的纹理感知：同步时感觉光滑，错位时则感觉粗糙。这表明，时间耦合是根本要素，而不仅仅是增强手段。近期的视触觉研究 [8, 43] 拓展了这一原则，证明运动耦合反馈能够增强跨模态的真实感，而不同步则会改变感觉，从而确立了时间同步是实现可信感官模拟的核心原则。

在运动耦合的基础上，研究人员进一步探索了多参数系统，其中的模式会根据多个交互变量同时进行调整 [71, 72, 75]。Jingu等人 [15] 根据接触力调节电触觉脉冲颗粒的数量，以产生能够响应用户压力的柔顺性错觉；Lin等人 [30] 则将力传感与滑动模拟相结合，以传达重量感。类似地，近期的可穿戴触觉系统 [68]表明，参数化渲染——即根据交互参数系统地改变刺激——相比固定模式，能够带来更逼真、更直观的感知体验。

然而，现有的参数化方法只关注单一的交互情境：例如，用运动呈现纹理，用力呈现柔顺性，却未同时考虑几何情境。目前还没有系统能同时根据用户如何触摸（交互参数）以及触摸什么（几何特征）来调整反馈，这限制了它们呈现复杂三维形状的能力，而交互与几何在这些形状中本质上相互耦合。这直接促使我们在 TactDeform 中采用自适应策略，根据交互情境（接近、接触、滑动）和几何情境（特征、纹理）动态调整电触觉反馈，以模拟指尖形变，从而在虚拟现实中呈现三维几何。

3 TactDeform 概念

TactDeform 的基本原理是，不同的交互方式和几何情境会在指腹上产生独特且可重复的变形模式。这些变形模式源于指腹组织的力学特性，主要由四类专门的机械感受器检测，它们分别编码触觉信息的不同方面 [1]。

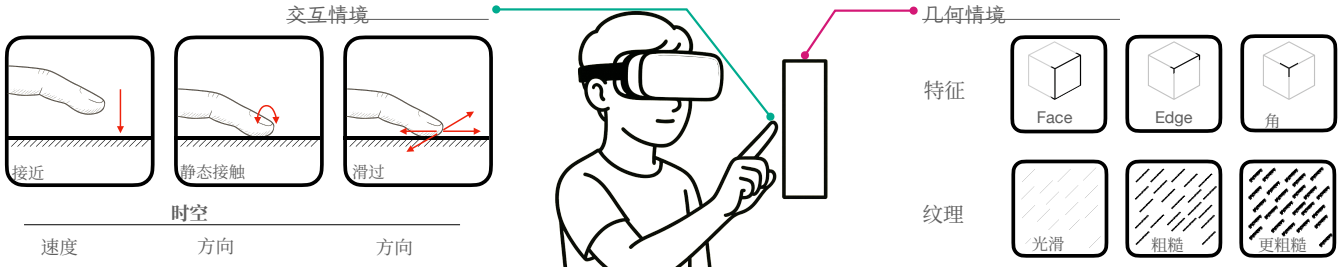

图 2：TactDeform 概念。TactDeform 采用双情境方法，结合交互情境（左）和几何情境（右），生成参数化的时空触觉模式。交互情境包括接近、静态接触以及沿表面滑过，并包含速度、方向和方向等相关参数。几何情境由特征类型（面、边、角）和纹理等级（光滑、粗糙、更粗糙）构成。该方法动态结合这些情境，生成恰当的电触觉模式，以模拟虚拟物体探索过程中自然的指腹变形。

3.1 通过指尖形变模拟电触觉反馈来编码虚拟几何

机械感受器通过皮肤变形的特征模式共同编码形状和纹理，而非借助明确的几何变量 [17]。I型慢适应感受器（SA-I/梅克尔细胞）会对持续的局部变形以及棱和曲率等精细空间特征作出响应，这得益于其密集分布和较小的感受野 [17]。相比之下，快速适应感受器（RA-I/迈斯纳小体）会对接触和滑动过程中皮肤变形的动态变化作出响应，提供与运动和表面过渡相关的时间线索 [4]。在纹理探索过程中，感知到的粗糙度源于压痕的空间模式与皮肤在表面移动时产生的振动时间模式的共同作用 [65]。

受此启发，TactDeform 通过动态扩展模式，生成触觉模式来模拟接近三维物体时形变逐渐增大的特征（RA-I 响应）；通过局部静态模式，模拟静态接触时依赖方向的形变（SA-I 响应）；并通过移动或平移激活模式，模拟滑动交互过程中依赖速度和纹理的形变（RA-I 响应），具体如第 3.4.2 节所述。这种基于形变的策略不同于 Suga 等人 [54], 的方法；后者将视觉几何属性直接映射到强度等级，并需要额外的力反馈才能获得更高的识别准确率，实际上将触觉刺激视为一种符号通道。TactDeform 通过双情境方法实现这一目标：结合交互情境（接近、接触物体或滑过物体）与几何情境（特征或纹理），生成参数化的时空模式，如图 2 所示。

3.2 交互情境：

该系统识别出三种不同的交互情境，分别对应自然的探索行为（图 2，左）。接近：当指腹最初接近并接触虚拟物体时，TactDeform 会呈现时空模式，以模拟初次接触时逐渐发生的变形。这些模式通过扩展的刺激传达物体的主要几何特征（面、边、角），模拟接近过程中压力如何在指腹上扩散。接触：在持续静态接触期间，系统会提供方向特定的模式，模拟指腹如何根据与表面的接触角发生变形。这些模式在适应手指相对于物体几何形状的方向时，仍能保持对接触区域的空间感知。滑动：当手指在虚拟表面上移动时，TactDeform 会生成动态模式，模拟表面探索过程中感受到的剪切变形和摩擦引起的变化。这些模式通过根据表面粗糙度对刺激进行参数调制来传达纹理信息。

3.3 几何情境：

在每种交互情境中，TactDeform 都会对几何特征和纹理进行参数化（图 2，右）。几何特征：系统根据局部几何结构的变形特征，将其分为三类：面：平面或平缓弯曲的表面，会在指腹上产生分布式变形。边：线性边界，会沿特定方向集中变形。角：多个表面汇聚形成的点特征，会产生局部变形。表面纹理：系统呈现三个参数化的粗糙度级别，在滑动交互过程中调节时空电触觉模式，以模拟表面纹理产生不同摩擦和变形动态的方式。

3.4 参数化图案设计

如图 1 所示，TactDeform 采用参数化方法，将指腹变形的物理特性转化为时空电触觉模式，具体做法是将变形特征系统地映射到刺激参数。

3.4.1 形变到刺激的映射：每种几何特征都会产生具有特征性的形变特征（如图 3 所示），TactDeform 将其参数化为相应的电触觉模式，如图 1.1（左上）所示：面形变：当指腹接触平面时，压力会向外呈径向分布

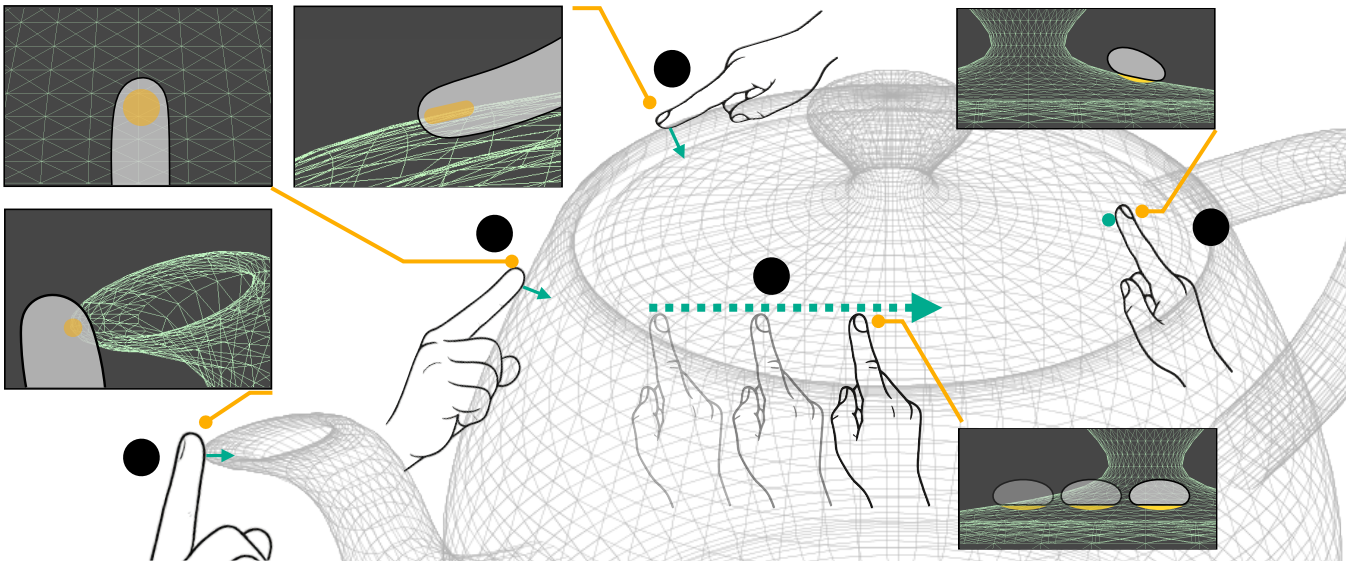

图 3：不同交互情境下的手指垫变形可视化。(A) 指腹靠近茶壶的壶嘴尖端（一个角）。(B) 指腹靠近茶壶的壶身（一个面）。(C) 指腹靠近茶壶壶身与壶盖之间的棱脊（一条棱）。(D) 沿茶壶壶盖移动，展示接触区域内逐渐变化的变形模式。(E) 指腹停留在茶壶壶盖上，稍微偏向左侧，指腹变形反映了这一角度偏置。

，从初始接触点向外扩散。TactDeform 通过从电极阵列中心向外扩展的发散环形图案来模拟这一过程，并可参数化控制扩展速率。边缘变形：线性特征会沿边缘线产生定向压力集中。系统将其渲染为从中心延伸的参数化线性图案，其方向参数与边缘方向相匹配，并通过参数反映边缘形状。角点变形：点接触会在接触点产生高度局部且强烈的形变。TactDeform 通过在阵列中心施加集中刺激来呈现这一效果，并通过参数化衰减控制感觉的空间范围。

3.4.2 时空模式生成：TactDeform 会生成动态电触觉模式，根据交互速度和几何情境进行调整，确保虚拟交互与触觉感受之间的空间对应关系。该系统在所有三种交互情境中均采用依赖速度的参数化，并通过数学公式在探索过程中维持感知一致性。

接近情境：系统生成随时间变化的模式，每一帧代表变形进程推进一个电极间距，与图 1.1（左上）所示的物理电极阵列几何结构相匹配（在我们的实现中，电极中心间距为 2毫米）。扩展速率 r（单位为每秒电极间距数）通过以下公式与接近速度建立参数化关联：

$$r = \alpha \cdot \frac{v_{approach}}{d_{electrode}} \tag{1}$$

其中，$v_{approach}$ 表示指腹朝虚拟表面运动的瞬时速度（毫米/秒），$d_{electrode}$ = 2.0 毫米表示电极的中心间距，α 是通过试点测试（第5.1节）设定为 1.0 的缩放系数，以实现直接的空间对应关系。该公式确保手指运动每跨越一个电极间距，模式就扩展一个电极间距。

连续模式帧之间的时间帧推进间隔 Δt 计算如下：

$$\Delta t = \frac{d_{electrode}}{v_{approach}} \tag{2}$$

这种反比关系确保接近速度越快，模式更新越迅速，而探索速度越慢，模式演变也越渐进。在我们的 Unity 实现中，时间 t 处的模式帧索引 n（t）通过速度积分确定：

$$n(t) = \lfloor \int_0^t \frac{v_{approach}(\tau)}{d_{electrode}} d\tau \rfloor \tag{3}$$

模式选择（面、棱或角）由接触点处的局部几何结构决定。每种几何特征在共享这一统一的依赖速度的扩展机制的同时，都保留其特有的空间模式。

接触上下文：对于静止交互，TactDeform 根据从指垫中心指向接触点的射线与该点处表面切线之间的夹角，对手指方向进行参数化。将其投影到水平面（压平 z轴）后，该角度 θ 被离散为四个朝向等级：

- 陡左：$\theta \in [-90°, -30°)$ - 刺激转移至最左侧电极区域
- 浅左：$\theta \in [-30°, 0°)$ - 刺激移至左中区域

- 浅右侧： $\theta \in [0°, 30°)$ - 刺激移至右侧中央区域
- 陡右侧： $\theta \in [30°, 90°]$ - 刺激移至最右侧电极区域

这种参数映射如图1.2（底部）所示，其灵感来自不同指腹区域如何因接触角不同而承受不同的压力分布，如图3E所示。将方向量化为四个离散级别，可在探索过程中兼顾感知清晰度与平滑过渡。我们着重采用从左至右的方向映射，而非从上至下的变化，因为我们的电极阵列覆盖指尖的主要接触区域，而顶部区域未被覆盖。

方向特定图案通过空间调制与底层几何特征模式结合：

$$P_{contact}(x, y) = P_{base}(x + \Delta x(\theta), y) \tag{4}$$

其中， P_{base} 表示基础几何模式（面、棱或角），而 Δx（θ）表示方向相关的水平位移。这样既能保留几何信息，又能使刺激区域随手指方向调整，从而同时保留形状和接触角信息。

滑动情境：表面纹理通过受摩擦引起的形变启发的模式位移机制进行参数化，如图1.3（右上）和图3D所示。模式位移会根据手指运动的幅度和方向进行调整。运动方向量化为八个方向（前、后、左、右以及四个对角方向），并通过试点测试（第5.1节）确定，以平衡方向敏感度与感知稳定性。位移速率 s（每秒的模式位移次数）遵循相同的速度相关原理：

$$s = \beta \cdot \frac{v_{slide}}{d_{electrode} \cdot k_{texture}} \tag{5}$$

其中， v_{slide} 表示手指在表面上的横向速度（毫米/秒），$k_{texture}$ 表示纹理相关位移倍数， β表示方向系数（反向位移时为$\beta = +1$，同向位移时为$\beta = -1$）。通过试点测试（第5.1节），我们发现反向位移（$\beta = +1$）产生的摩擦感更为逼真。纹理参数定义如下：

- 光滑（级别 *1*）： $k_{texture} = 0$ - 零位移参数，无论手指如何运动，均提供静态刺激
- 粗糙（等级 *2*）： $k_{texture} = 1$ - 一个电极间距位移（2毫米），与手指运动同步
- 更粗糙（等级 *3*）： $k_{texture} = 2$ - 两个电极间距位移（4毫米），空间周期增大

纹理模式的时间位移间隔如下：

$$\Delta t_{shift} = \frac{d_{electrode} \cdot k_{texture}}{v_{slide}} \tag{6}$$

例如，在粗糙表面上以 20 毫米/秒的速度滑动时，模式会以 10 Hz 的频率位移；而在更粗糙的表面上以相同速度滑动时，模式位移频率为 5 Hz，从而产生不同的纹理感觉。

重要的是，这些纹理模式与底层的几何特征模式协同作用。当手指滑过粗糙边缘时，系统会将粗糙滑动模式与边缘模式相结合，同时保留几何与纹理信息

通过统一的参数化框架：

$$P(t) = P_{base} \cdot \lfloor \int_0^t \frac{v_{slide}(\tau)}{d_{electrode} \cdot k_{texture}} d\tau \rfloor \tag{7}$$

其中 P_{base} 表示基础几何模式。根据运动方向，.非平滑模式呈现出方向耦合：手指向右运动会触发模式向左位移，表现出指腹与表面之间的相对运动。

通过试点测试（第5.1节）对参数化映射进行了反复优化，以确保时空模式能够有效传达自然的指腹变形特征，同时保持感知清晰度和用户舒适度。最终的参数集通过第5节所述的正式用户评估进行了验证。

4 实现

为实现 TactDeform 用于模拟指腹变形的参数化方法，我们搭建了模块化软硬件架构，以实现时空模式的实时生成。本节基于图 2 中介绍的双情境方法，阐述如何将交互情境与几何情境转化为电触觉模式的技术实现。

4.1 硬件实现

我们的硬件配置由四个相互连接的组件构成（图 4），可向指腹传递高分辨率的时空模式。

虚拟现实头戴式显示器：Meta Quest 3头戴式显示器（图 4B）通过原生手部追踪（Meta Interaction SDK）捕捉手部位置以及手部与虚拟几何体之间的距离。头戴式显示器在追踪手指朝向和运动的同时提供同步视觉反馈；这对于我们的参数化方法至关重要，可确保将交互情境准确映射为变形模式。

处理单元：头戴式显示器通过 Quest Link 连接到台式电脑（图 4A），电脑运行基于 Unity 的应用程序，以实现参数化模式生成流程。该配置提供了实时参数计算与模式合成所需的计算资源，同时维持沉浸式虚拟现实体验。

指戴式触觉接口：一块带有32个电极的柔性印刷电路板（图4D）使用透气医用胶带（3M Nexcare Gentle Paper）贴附于用户的优势手食指指垫。电极以 6×6 网格布局排列，并排除四个角位置，从而形成32个有源电极，贴合指腹的自然曲率。电极直径为1.4mm，中心间距为2.0mm（图4D1），该阵列提供了渲染参数化变形模式所需的空间分辨率。该间距与电触觉刺激的两点辨别阈值（2-4mm）相符 [49, 56]，并实现高效、精确的空间模式控制。柔性印刷电路板从手掌侧延伸，宽度为4.34mm，并连接至控制电路，从而尽量减少对手部运动和手部追踪的干扰。整个穿戴式系统重46.05克。

电触觉反馈系统：我们使用了一个用于电触觉接口开发的开源工具包 [40]。控制硬件（图4C）安装在固定于用户前臂的3D打印外壳中（尺寸为 $60 \times 40 \times 12$mm），通过USB串行连接以921600波特率与台式电脑通信，并且

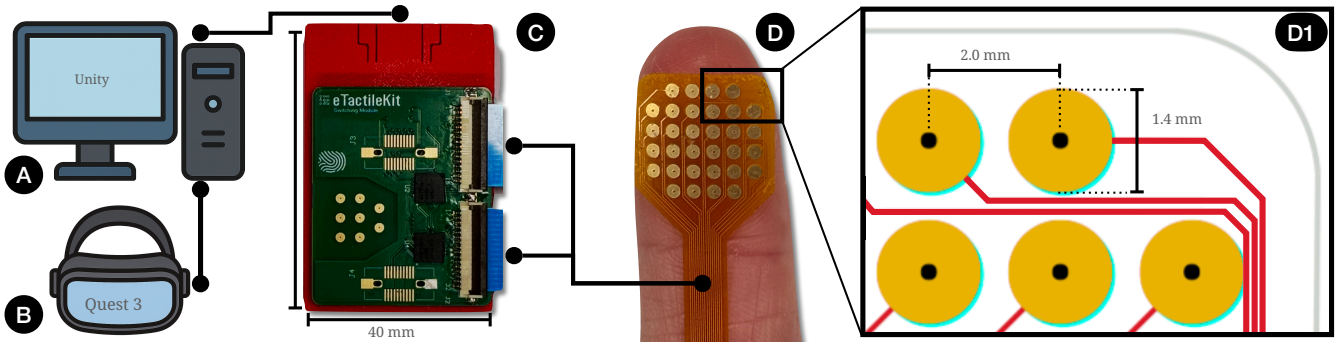

图4：系统由四个部分组成：(A) 运行 Unity应用程序的台式电脑，通过 Quest Link 连接至 (B) Meta Quest 3头戴式显示器，用于手部追踪和视觉渲染；(C) 安装在 3D打印外壳中的控制电路，通过串行连接进行通信；(D) 连接在食指指垫上的柔性PCB触觉接口，包含 32 个电极，采用 6×6 配置；(D1) 放大图展示了电极规格：直径为 1.4mm，中心间距为 2.0mm。柔性PCB从手掌侧延伸，以尽量减少对动作的干扰。为清晰起见，图中未显示用于固定手指的医用胶带。

通过两个16针FPC连接器连接到指戴式触觉接口，每个引脚连接到32个电极。我们利用其电流控制器，以 10μA的步长纳入单相阳极 [19] 受控电流（0-10mA）脉冲。这是为了实现局部刺激，同时消除因阴极刺激而产生的远端（牵涉）感觉 [19]。该硬件可确保在皮肤阻抗变化的情况下仍能输送恒定电流脉冲。快速切换多路复用器（Microchip HV513）电路可实现时分扫描，以便在给定时刻激活每个电极。我们使用 200μs的脉冲宽度、 45μs的通道间放电间隔以及125 Hz的刺激频率。这些参数与文献中的先前工作 [15, 66], 一致，不同之处在于我们将通道间放电间隔缩短了 5μs，以适应我们的32电极阵列，并确保有足够时间完成完整的刺激周期。

4.2 软件架构

软件基于 Unity 2022.3.53f1 构建，通过 USB串行通信与控制硬件交互，以 72Hz 的频率提供与虚拟现实交互同步的实时触觉反馈。TactDeform 的软件管线通过实时处理手部跟踪数据，实现参数化模式生成和双情境方法。

参数化分类流程： 核心分类组件持续分析手部跟踪数据，提取交互情境（接近、接触、滑动）和几何情境（面、边、角、纹理等级）的参数。这些参数被输入模式生成系统，该系统基于双情境方法合成时空模式。分类过程在 Unity 的帧更新周期内运行，确保进行一致的时间采样，以准确提取参数。

模式生成与稳定化： 模式管理器实现了一个包含三种状态的有限状态机：空闲（无接触）、接近（与几何特征参数发生初始接触）和交互（持续接触，并带有方向或纹理参数）；状态转换由接触检测触发（从空闲到接近）、持续接触的稳定性（从接近到交互）以及接触丢失（任何状态到空闲）触发。为确保参数化模式稳定，系统采用时间滤波，以平滑跟踪噪声和手部震颤造成的参数波动。在触发模式更新和状态转换之前，参数必须在较短的时间窗口内保持稳定。这种稳定化在保持对有意参数变化的响应能力的同时，维持了感知连续性，确保模式平滑演变，避免可能干扰形变模拟的突变。

参数化模式合成： 系统通过可配置的参数到模式映射函数，将提取的参数映射为时空模式，从而实现第 3 节详述的参数化公式。在接近过程中，几何参数决定空间模式类型和时间扩展速率（公式 1）：面参数生成从电极阵列中心向外扩展的模式；边参数从四种方向性线状模式中进行选择（水平、垂直和两种对角方向），并根据边的几何方向遵循方向感知阈值 [4], ；角参数则在阵列中心创建集中的点状模式。

接触过程中，基础几何模式保持不变，而方向参数控制刺激区域在电极阵列上的空间偏移（公式 4）。这种方向映射仅限于左右方向，因为电极阵列覆盖主要接触区域，而顶部区域未被覆盖。滑动过程中，基础几何模式通过图案乘法与纹理参数相结合（公式 5–7），其中纹理参数（光滑/粗糙/更粗糙）调节与手指运动同步的图案偏移距离（0/2/4mm）。系统实现了方向耦合，模式会根据运动方向旋转；例如，手指向右运动会触发模式向左偏移，从而模拟指腹与表面之间的相对运动。

时空同步：该软件可确保虚拟几何交互与参数化模式之间精准对齐。图案帧推进与物理电极

间距（2毫米）相挂钩，确保空间模式与硬件分辨率相匹配。当手指运动超过帧间阈值时，系统会对模式参数进行插值，从而即使在快速运动过程中也能保持形变模拟的连续性。

性能优化：所有参数提取与模式合成均在 Unity 的 LateUpdate() 周期内完成，以确保时序一致，并与 72Hz 虚拟现实渲染环路同步。系统采用事件驱动的参数评估，仅在参数发生显著变化时重新计算模式，从而在尽量降低计算开销的同时，使参数变化与模式更新之间保持亚帧延迟（< 14ms）。

5 用户研究

为评估 TactDeform 通过参数化触觉模式渲染几何与纹理信息的有效性，我们开展了一项用户研究，同时考察受控模式识别与自然探索行为。本节首先介绍用于优化参数化模式的先导研究（第5.1节），随后提出我们的研究问题（第5.2节）。接着，我们介绍主要研究设计（第5.3节），并详述两阶段研究：第一阶段通过受控任务验证参数化模式，涵盖几何特征识别、接触模式偏好和纹理辨别（第5.4节）；第二阶段则考察用户在复杂三维几何体上的自由探索行为，并将 TactDeform 与基线方法进行比较（第 5.5 节）。

5.1 通过先导研究迭代完善设计

为验证并完善 TactDeform 的参数化方法，我们针对不同的参与者群体开展了三轮先导研究。这些先导研究为第 3.4.2 节所述的参数化模式设计提供了依据。先导研究 1 确定了几何特征呈现的时间特性，并据此完善了公式 2；先导研究 2 考察了纹理呈现的方向编码，并据此形成了公式 5；先导研究 3 则验证了结合先导研究 1 和 2 中设计的完整系统。

先导研究 1：模式与手指运动同步（N=5）。我们首先考察了在接近交互过程中，模式的时间安排应如何与手指运动同步。参与者比较了两种策略：以固定时间间隔更新模式（0毫秒 [静态],50毫秒、100毫秒、200毫秒），以及使模式与手指位置同步（每移动 0.5×、 1× 或 1.5× 个电极间距时更新；其中 1× 表示移动 2 毫米会推进一帧模式）。所有参与者都更喜欢动态模式而非静态模式，认为前者更自然。在动态方案中，80%（4/5）的参与者更喜欢 1× 同步方式，认为其运动与感觉之间的匹配最理想；较小的数值让人感觉“太快”（P4），而较大的数值则“滞后”（P1）。固定时间间隔则会因速度不同而造成不匹配。由此确定了公式 1 和 2 中的 $\alpha = 1.0$ 参数，确保手指运动与模式推进之间存在直接的空间对应关系。

预实验2：运动方向分辨率（N=5）。基于这些发现，我们考察了编码滑动运动需要多少个方向等级。每位参与者完成了三项比较，测试四方向、八方向或连续方向跟踪相较于静态非方向性模式是否能提升纹理感知。我们发现，八方向量化（向前、向后、向左、向右，外加四个对角线角）在感知质量上取得了平衡：四个方向会在对角线运动中造成“跳跃式”（P1）过渡，连续跟踪会因微小变化产生“嗡嗡声”（P2），静态模式让人感觉“持续触碰”（P5）且“没有移动”（P1），而八个方向则提供了光滑而又稳定的反馈。由此确立了纹理模式的方向编码（公式5和7），其中偏移方向会随手指在表面上的手指运动方向而自适应。

试点 3：完整系统验证（N=7）。正式研究前，我们通过三项主要任务（几何特征识别、接触模式偏好、纹理辨别），以及用于验证试点 1–2 设计选择的比较任务，对完整系统进行了测试。参与者表现出较高的准确率，其定性反馈也证实，速度同步模式（来自试点 1）与 8 方向纹理编码（来自试点 2）相结合，能够产生连贯的触觉体验，并与自然的指腹变形相符。这一验证使我们得以精简正式研究：从第一阶段移除时间参数比较任务，并最终确定第二阶段的实验方案，从而缩短实验时长，同时将重点放在需要更大样本量才能回答的问题上。

5.2 研究问题

我们提出了三个研究问题，以指导正式评估：

- **RQ1**：TactDeform 的参数化模式在不同交互情境中传达几何与纹理信息的效果如何?
- **RQ2**：与其他渲染方法相比，TactDeform 的参数化方法如何影响用户的探索行为和偏好?
- **RQ3**：从简单几何图元到复杂有机形状的物体，如何揭示 TactDeform 的能力与局限?

5.3 研究设计

为回答这些研究问题，我们开展了一项正式用户研究（N=24），包含两个阶段（图 5A）。第一阶段采用受控任务，以验证我们参数化模式的可辨别性与有效性（回应 RQ1）。第二阶段考察了针对复杂三维几何体的自然探索行为，并将 TactDeform 与基线渲染方法进行比较（回应 RQ2 和 RQ3）。

参与者：我们通过口口相传招募了26名参与者（12名女性、14名男性，年龄18-44岁）。参与者接受了资格筛选，排除标准如下：（1）心脏起搏器或其他植入式电子医疗设备，（2）怀孕，（3）癫痫或癫痫发作史，（4）优势手食指存在可能干扰电极放置的皮肤疾病或损伤，（5）周围神经病变或手部触觉敏感度降低，以及（6）可能由虚拟现实诱发的严重晕动症或前庭障碍。这些标准与电触觉刺激 [19] 和虚拟现实研究 [48]既有的安全实验方案一致。参与者的既往经验各不相同：18人曾使用过虚拟现实（13人很少使用，3人每月使用，2人每周使用，主要用于游戏），19人有触觉设备使用经验，6人使用过电触觉设备，

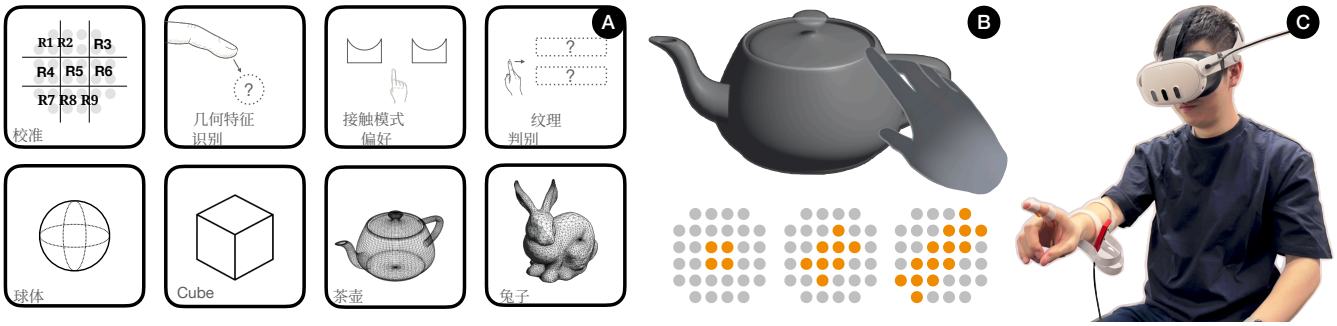

图5：用户研究设计概览。(A) 两阶段研究流程概览，通过受控任务（第一阶段）和自由探索（第二阶段）验证TactDeform的概念。(B) 电极激活模式展示了TactDeform如何通过32电极阵列上的空间刺激呈现不同的几何特征。(C) 一名参与者在研究中体验TactDeform，佩戴Meta Quest 3头戴式显示器，并将指戴式触觉接口固定在其食指上。

仅有1人具有电触觉虚拟现实体验。两名参与者被排除在分析之外：P06因在几何特征识别（0.238对比0.333的随机水平）和纹理辨别（0.5对比0.5的随机水平）中的表现显著低于随机水平，P08因未完成研究。最终纳入分析的参与者为24人（12名女性、12名男性）。本研究已获得大学伦理委员会批准（2024/HE001103）。

装置：本研究采用第4节所述的TactDeform实现，将指戴式界面固定在参与者的优势手食指上（图5C）。研究在受控实验室环境中进行。

流程：完整实验环节持续约2.5小时，包括15分钟的引言、30分钟的校准，其余时间用于实验任务。参与者全程保持坐姿。指导语经过标准化，未就探索策略提供具体指导。与以往需要训练环节的电触觉研究不同，[53, 54], 我们未提供练习试次或训练环节，以评估我们的模式是否可凭直觉理解。参与者可在任务之间请求休息。未提供报酬。

校准：由于不同位置的皮肤特性和神经敏感度存在个体差异，电触觉反馈界面用于空间渲染应用时，需要特别谨慎地进行校准，因为这些差异会导致感知阈值出现变化 [9, 50]。遵循既定方案 [19], ，我们在每次用户研究会话前校准脉冲幅度。脉冲幅度是针对不同参与者进行校准的唯一参数。所有其他电触觉参数，包括脉冲宽度、频率和通道间放电间隔，均按照第4.1 节中的规定，在所有研究中保持不变。为减少校准全部32 个电极位置所需的时间，我们将 32 个电极分为 9 个区域（图 5A1）进行区域校准。从中心区域开始，逐渐增大脉冲幅度，直到参与者感到不适；随后逐渐降低，直到他们感受到清晰且无痛的刺激。其余区域的感知强度均与中心区域匹配，以确保整个指腹上的感觉一致。最后，同时激活所有区域进行全局调整。校准过程中不会透露任何研究模式。

5.4 第一阶段：模式验证

第一阶段包含三个任务（图 5A），用于验证第二阶段自由探索中使用的时空模式。任务按照固定顺序进行，与自然的虚拟现实交互进程相匹配：接近物体、保持接触，然后滑过表面。任务设计和实验流程受到现有触觉感知研究的启发 [4, 18]。

第一阶段专门针对研究问题 RQ1。我们进一步将该研究问题细分为三个方面：接近交互过程中的几何特征判别（RQ1a）、持续接触过程中的模式偏好（RQ1b），以及滑动交互过程中的纹理辨别（RQ1c）。

任务后访谈：每项任务结束后，我们都会进行半结构化访谈，以收集定性反馈。遵循既有做法 [12, 15, 23, 52], ，我们评估了参与者的主观体验；对于探究难以通过其他方法评估的触觉体验而言，这是一种有效的方法 [51]。所有访谈均录音并转录。

5.4.1 任务*1*：几何特征识别。 **目标**：验证用户在接近交互过程中通过参数化变形模式区分几何特征的能力（RQ1a）。**设置**：参与者面对一个不可见的虚拟物体，该物体位于前方45cm、低于视平面20cm处，可在半径为5cm的球体内被触摸。视觉指示器标示其位置，当手指接近至8cm以内时消失，以消除视觉偏差。**流程**：采用三选一强制选择（3AFC），参与者回答“你感知到哪种几何特征？”，选项为：面、棱或角。为体验接近情境，参与者从8cm以外开始，接近该不可见物体。几何特征始终与食指相切，以消除位置混杂因素。参与者可以多次接近且无时间限制，但每次接近之间必须退至8cm以外。**参数化模式**：系统按照第3节所述并如图 1.1所示呈现模拟变形模式：面图案使用从指腹中心向外扩展的发散环，边缘图案采用定向线性刺激，角图案产生集中的点刺激。**条件**：共21个试次，面图案、边缘图案和角图案各重复7次，

随机化。边缘图案包含4种方向（水平、垂直、对角斜率）；为平衡设计，每次实验中三种棱方向各呈现两次，一种方向仅呈现一次，且仅呈现一次的方向在参与者之间随机分配。面图案和角图案采用单一参数化表征。**测量指标**：三选一强迫选择反应、信心评分（5点李克特）、接近次数和试次时长。

5.4.2 任务2：接触模式偏好。**目标**：了解接触交互过程中，参与者对方向特定图案与均匀图案的偏好（RQ1b）。**设置**：将两个可见物体（20×5×5厘米）放置在距离参与者40厘米、低于视平面20厘米处；其中一个位于视线中心左侧20厘米，另一个位于右侧20厘米。一个物体提供根据接触角调整的方向特定图案，另一个物体则提供均匀刺激。**流程**：参与者通过静态接触自由探索两个物体。仅当指腹保持静止时才会产生刺激；一旦移动，刺激便立即停止。探索结束后，参与者回答"哪种触觉反馈感觉更好？"（二选一强迫选择），并给出信心评分。**参数化模式**：如图1.2所示，方向特定物体采用四种参数化等级（陡左、浅左、浅右侧、陡右侧），使刺激在指腹上移动，以模拟不同角度下的自然接触变形。**条件**：共进行14个试次，模式与位置的分配经过平衡，试次顺序随机。**测量指标**：二选一强迫选择的回答、信心评分、交互角度、交互次数/时长以及试次时长。

5.4.3 任务3：纹理辨别。**目标**：评估滑动交互过程中通过参数化位移机制进行纹理辨别的效果（RQ1c）。**设置**：在距离参与者40厘米处放置两个不可见表面，一个位于视平面下方10厘米，另一个位于下方25厘米处，水平延伸范围为30厘米。**流程**：参与者选择一个表面，并从起点向右移动至终点。系统仅在向右移动时提供模式，以便单独评估纹理感知。探索两个表面后，参与者回答"哪个表面感觉更粗糙？"（二选一强迫选择），并给出信心评分。**参数化模式**：如图1.3所示，通过偏移参数设置三个纹理等级：等级1（光滑），位移为零；等级2（粗糙），位移一个电极间距（2毫米）；等级3（更粗糙），位移两个电极间距（4毫米）。**条件**：共24个试次，呈现所有等级组合，并对配对方式和位置进行平衡。**测量指标**：二选一强迫选择的回答、信心评分、交互次数和试次时长。

5.5 阶段2：自由三维几何探索

目标：第二阶段研究用户在无约束探索过程中对 TactDeform 的参数化方法及其他渲染方法的反应，以及用户对不同复杂度物体的反应，考察探索行为和偏好（RQ2），并研究从简单形状到复杂形状的物体如何展现 TactDeform 的能力（RQ3）。

触觉渲染方法：本阶段比较了三种触觉渲染方法，它们在空间和时间反馈方面的复杂程度各不相同：

- **均匀激活（UA）**：手指进入物体边界时，电极统一激活。UA 是最简单的二元反馈方法，常见于振动触觉系统中；无论几何特征或交互情境如何，接触都会触发均匀刺激。

- **接触区域映射（CAM）**：根据局部接触检测，单独激活电极。这一基线代表了当前电触觉界面中采用的直接空间映射方法 [15, 59], ，即刺激直接对应接触区域，不包含时间动态或情境自适应。

- **TactDeform**：完整的参数化系统，采用双重情境方法（交互情境和几何情境）模拟指腹形变。该方法加入时空模式和情境感知自适应，以评估参数化形变模拟的作用。

物体：四种几何复杂度逐渐增加的物体：球体、立方体、茶壶和兔子（包围尺寸为20×20×20厘米），如图5A所示，代表了从简单基本形状到复杂有机形态的演进。

流程：参与者使用每种渲染方式自由探索每个物体（共 12 次试次），顺序经过平衡。鼓励参与者在探索过程中进行出声思维，并且他们可以不受时间限制、自由交互，探索每个虚拟物体。

阶段后访谈：我们进行了半结构化访谈，以了解参与者在不同物体类型和探索策略下使用三种不同触觉反馈方式的体验。第二阶段的探索和阶段后访谈均进行了录音。

6 结果

本节介绍我们对 24 名参与者开展的 TactDeform 两阶段实证评估结果。第一阶段通过三项受控任务验证了基本的参数化模式（RQ1a-c），第二阶段则考察了参与者对复杂三维几何体的自然式探索（RQ2、RQ3）。

所有统计分析均使用 Python（版本 3.13.2）及 statsmodels 和 pingouin 软件包完成。针对被试内比较，我们采用重复测量方差分析，并考虑到每位参与者都体验了所有条件。事后两两比较采用 Tukey HSD 校正，以处理多重比较。统计显著性水平设为 $\alpha = 0.05$，并在适当情况下对多因素比较进行 Bonferroni校正。定性数据采用反思性主题分析 [5], 进行分析，两名研究人员独立编码转录后的访谈内容，以确保可靠性。

6.1 阶段 1：验证参数化模式

第一阶段系统评估了 TactDeform 触觉渲染方法所依据的核心参数化设计原则，涵盖三种交互情境：接近（任务1，第 6.2 节）、接触（任务2，第 6.3 节）和滑动（任务3，第 6.4 节）。围绕 RQ1：TactDeform 的参数化模式能够多有效地在不同交互情境中传达几何与纹理信息？每项任务均呈现定量结果、定性

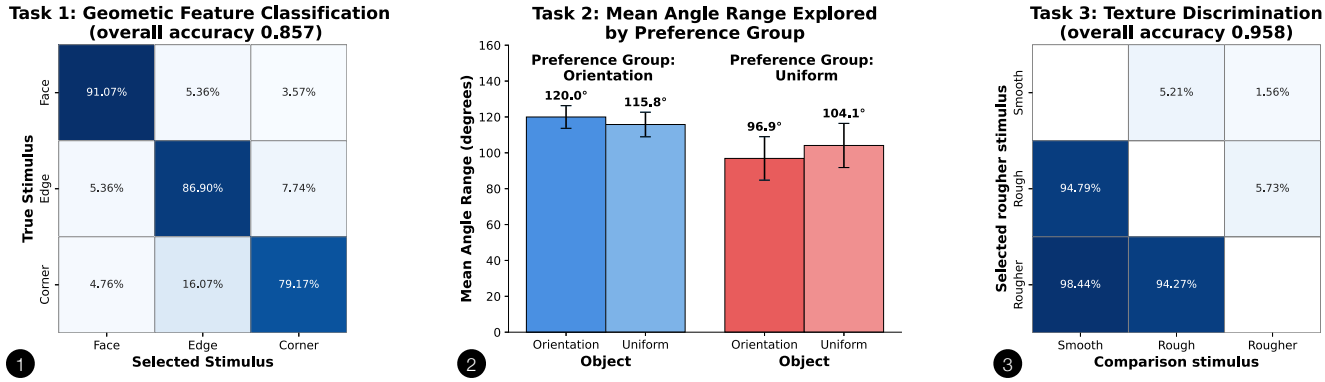

图6：第一阶段结果。（1）任务1几何特征分类的混淆矩阵。参与者将触觉刺激分类为面、棱或角。数值表示真实刺激（行）被分类为所选类别（列）的试次百分比。所有参与者的总体准确率为0.857。（2）任务2中各偏好组探索的平均角度范围。根据参与者偏好的模式，将其分为方向偏好组和均匀偏好组。柱状图显示每个组别—对象组合的平均角度范围（单位：度）及标准误。蓝色柱表示方向组，粉色柱表示均匀组。（3）任务3纹理辨别的成对偏好矩阵。该矩阵显示行刺激被选为比列刺激更粗糙的概率。刺激按粗糙度递增排列：Lv1 光滑、Lv2 粗糙、Lv3 更粗糙。数值表示百分比，总体准确率为0.958。

来自用户访谈的见解，并针对参数化触觉设计的启示展开讨论。

6.2 任务1：几何特征识别（RQ1a）

我们评估了TactDeform在接近交互过程中通过参数化模式传达几何特征（面、边、角）的能力，以回应RQ1a。有关详细实验方案和设置，请参见第5.4.1节。

6.2.1 定量结果：参与者在几何特征识别中取得了较高的总体准确率（$M = 85.71\%$，$SD = 10.41\%$，$N = 24$）。重复测量方差分析发现，特征类型之间存在显著差异（$F(2, 46) = 3.64$, $p = .031$, $\eta_p^2 = .16$）。从描述上看，面的平均准确率最高（$M = 91.07\%$, $SD = 12.51\%$），其次是边（$M = 86.90\%$，$SD = 13.92\%$），然后是角（$M = 79.17\%$，$SD = 19.30\%$），如图6.1所示。角的准确率较低，表明集中点特征的参数化表示仍有改进潜力。

探索行为与准确率的变化趋势一致，并因特征而异：角需要更多次重复体验，即接近交互（$M = 5.12$, $SD = 3.21$），而棱（$M = 4.48$, $SD = 2.87$, $p = .012$）或面（$M = 3.57$, $SD = 2.41$, $p < .001$）所需次数较少。准确率在试次中呈现较弱（$r = .192$）但显著的学习效应（$p < .001$），从早期试次的75.0%提升至后期试次的89.9%。信心评分（$M = 4.04$, $SD = 0.65$，采用5分制）与准确率呈中度相关（$r = .267$, $p < .001$）

6.2.2 定性见解：参与者在访谈中始终自发采用空间分类策略，将边描述为“线”，将角描述为“点”，将面描述为“宽阔区域”。参与者还明确提到了学习过程：“前 *3* 个任务……基本上是在猜……然后我就知道这种模式了”（P03），并且“试了 *5* 到 *6* 次之后，我学会了如何区分”（P12），这表明参数化模式与自然触觉处理策略相契合。

6.3 任务2：接触模式偏好（RQ1b）

本任务评估了哪种接触模式方案（特定方向或统一）更有利于静态交互，并以用户偏好作为衡量指标，从而探讨RQ1b。有关详细流程和设置，请参见第5.4.2节。

6.3.1 定量结果。参与者的偏好分布各不相同：24 位参与者中有 14 位（58.3%）强烈偏好方向特定图案（选择了 ≥ 70% 的方向特定图案），而 41.7%（10/24）强烈偏好均匀图案（选择了 ≥ 70% 的均匀图案）。值得注意的是，没有参与者表现出混合偏好（31–69% 区间），这表明他们采用的是根本不同的触觉处理策略，而非处于某种偏好连续谱上。

对偏好组的分析显示，与偏好均匀图案的参与者相比，偏好方向特定图案的参与者无论面对何种物体类型，都表现出更广的角度探索范围（方向：$M = 120.0°$，均匀：$M = 115.8°$；前者偏好均匀图案的参与者：方向：$M = 96.9°$，均匀：$M = 104.1°$），如图 6.2 所示。这一差异在方向物体上最为显著（差异为 23.1°，$p = .081$, $d = 0.76$）。组内比较显示，偏好并未显著调节探索行为（两者均为 $p > .27$），这表明参与者表达的偏好反映的是感知质量判断，而非行为参与模式。

6.3.2 定性见解。访谈分析进一步验证了这一点，揭示了两种截然不同的判断策略。24 位参与者中有 11 位偏好能带来更强烈感受的物体；他们始终选择“更强烈的那个”以获得清晰度（P03），或寻求“总体上更强的强度”（P09）。相比之下，24 位参与者中有 11 位

参与者看重空间特异性，并将局部激活与真实感联系起来：“只有左侧在振动……更自然”（P02），以及“只让接触到的表面启动，会更真实”（P10）。三位参与者在探索过程中发现了方向特异性系统的功能，并从被动接受转向主动探究。P02 的转变便是一例：起初偏好“强烈刺激”，后来转而偏好“改变刺激 *[，使其]* 更符合表面特性。”定性和定量结果均表明，存在两类具有不同触觉判断方法的用户群体，这说明自适应或可定制的触觉渲染系统或许能更好地适应个体差异，与近期研究的结论一致 [24]。

6.4 任务3：纹理辨别(RQ1c)

任务3评估了TactDeform通过滑动交互中的参数化位移模式呈现可区分纹理等级（光滑、粗糙、更粗糙）的能力，以回应RQ1c。有关详细实验方案和设置，请参见第5.4.3节。

6.4.1 定量结果。 纹理辨别总体上取得了较高准确率（$M = 95.83\%$、$SD = 5.07\%$、$N = 24$）（图6.3）。平均准确率从94.27%（粗糙 vs 更粗糙）到98.44%（光滑 vs 更粗糙）不等，尽管这些描述性差异在统计上并不显著（$F(2, 46) = 1.80$, $p = .174$），表明所有纹理对的表现均接近上限。

参与者对纹理表现出较强的感知意识。信心评分能够有力预测实际表现，无论是在试次层面（正确试次：$M = 4.14$ vs 错误试次：$M = 3.39$; $t(574) = 6.22$, $p < .001$, $d = 1.08$）还是个体层面（$r = .748$, $p < .001$）。这种意识通过适应性采样在行为上得到体现：参与者平均每个试次进行2.41次重复体验，但会根据难度调整其探索。较难的粗糙 vs 更粗糙比较所需的重复体验次数（2.82）显著多于较容易的光滑 vs 更粗糙比较（1.87; $U = 11096.5$, $p < .001$），且重复体验次数与信心呈负相关（$r = -.469$, $p < .001$），表明这是真正的感知理解，而非猜测策略。

6.4.2 定性见解。 参与者自发形成了多维时空探索策略来感知纹理，并通过协调的感知通道自然解码了 TactDeform 的参数化位移机制。大多数参与者同时整合了时间模式（54% 的参与者描述为“交替变化”或“波浪般的模式”）以及空间覆盖范围的变化（50% 的参与者注意到“手指的不同位置”被激活）。参与者以材料隐喻描述所感知的纹理：对于最粗糙的表面，P03 将其描述为“带有细小石子的混凝土”；对于中等粗糙度，P12 描述为“闪烁并爆裂的气泡”；对于光滑纹理，P13 描述为“桌面”。多位参与者独立发现，移动速度会调节感知清晰度（P14：“如果我移动得慢一些，就能感受得更清楚，”），这揭示了用户如何通过我们的参数化位移机制自然优化探索策略。

6.5 第二阶段：复杂几何体的自由探索（RQ2、RQ3）

第二阶段评估了 TactDeform 的参数化方法相较于基线渲染方法如何支持自然探索（均匀激活、接触区域映射），并测试了几何复杂度逐渐增加的物体（球体、立方体、茶壶、兔子）。本阶段探讨了 RQ2（与其他渲染方法相比，TactDeform 的参数化方法如何影响用户的探索行为和偏好）和 RQ3（从简单的几何基元到复杂的有机形状，各类物体如何展现 TactDeform 的能力与局限性）。有关渲染方法的说明、详细实验方案和设置，请参见第 5.5 节。

我们分析了 24 位参与者使用三种渲染方法探索四个物体时产生的 288 次交互，并通过出声思维协议和半结构化访谈来确定他们的偏好和探索策略。

6.5.1 渲染方法比较（*RQ2*）。参与者的偏好呈现出不同渲染方法间的明显模式。没有参与者偏好均匀激活；参与者称其为“笼统的反馈”（P21），认为它“与视觉线索不匹配”（P21）。58% 的参与者（14/24）明确拒绝了这种方法，并将其统一激活的特点描述为“始终开启”、“到处都一样”，且“没有区别”。这表明，缺乏空间特征影响了交互体验。

在具有空间选择性的渲染方法中，三分之二的参与者（16/24）偏好 TactDeform 的表面渲染，其余参与者（8/24）则偏好 CAM 的连续体积反馈。这种分歧揭示了两种截然不同的交互策略。偏好 CAM 的参与者会探索边界处的反馈，反复缓慢地戳入和戳出，进行接近式交互，正如 P03 所述：“只有触碰表面时我才能感觉到……这让我更觉得自己是在触摸一个物体。”相比之下，导航导向型用户重视连续的空间感知，会沿着物体表面滑动以描摹物体，而 TactDeform 会渲染出相应的纹理。

这些偏好体现在不同的探索行为中。超过半数的参与者（58%，14/24）明确表示会根据边缘和角的清晰度评估各系统，并刻意寻找“线状”和“点状”的感觉，以验证渲染质量。TactDeform 一直因其鲜明的特征过渡而受到称赞，P11 指出，它“恰好反映了*[物体的]* 面或角……”；而要感知 CAM 基于区域的变化，则需要更缓慢、更刻意地移动。UA 未能提供任何几何信息：“面、边和角的感觉都一样”（P25）。

6.5.2 物体复杂度效应（*RQ3*）。这四种物体构成了一组逐步递进的诊断工具。球体的均匀曲率提供了一个基准，在此条件下，所有方法都仅能实现基本的接触检测：“对于球体……我感觉三种条件之间没有太大区别”（P01）。

立方体成为检验几何特征敏感性的典型对象，58%的参与者（14/24）会系统地探查边和角。各方法的表现差异十分明显：TactDeform 能呈现鲜明的面/边缘/角过渡，CAM 能提供基于区域的区分，而 UA 则完全失效。

茶壶在精细特征上呈现出差异化表现。在均匀激活条件下，参与者无法感知精细结构：“我感觉不到壶嘴的尖端”（P05），因为均匀激活未提供空间区分。TactDeform与CAM传达了壶口边缘和壶柄等主要边，但整个壶嘴结构在所有方法中仍然具有挑战性。

兔子凭借其带纹理的表面引发了差异最为明显的反应。TactDeform的参数化纹理渲染是唯一具有纹理的物体，被54%的参与者（13/24）识别出来："一只毛茸茸的兔子"（P25），"有那么一刻，我真的感觉自己在触摸一只兔子"（P26）。均匀激活始终统一地无法提供有效信息。

7 讨论

我们对TactDeform的评估揭示了若干更广泛的启示，这些启示超越了直接研究结果，可为触觉界面设计和电触觉反馈系统的未来发展提供参考。

本研究表明，触觉渲染的参数化方法能够成功弥合物理受限的动觉反馈设备与感知保真度之间的差距。通过用电触觉模式编码几何特征和纹理属性，TactDeform验证了一种有原则的触觉设计方法，超越了临时性的模式生成 [3, 61]。参与者普遍采用基于空间情境的分类策略，表明我们的参数化编码与基本感知机制相一致，为未来的触觉渲染系统提供了理论基础 [32, 36]。

几何特征识别结果（任务1，准确率85.71%）验证了我们的参数化模式能够在接近交互过程中有效传达基本空间属性。性能层级为面（91.07%）> 边（86.90%）> 角（79.17%），揭示了一项重要的设计考量：较宽的空间模式可立即直观理解，而集中的点特征则需要更精细的参数化表征。所有参与者自发形成空间分类策略，在未经指导的情况下一致将特征描述为"宽区域"、"线"和"点"，这表明我们的形变到刺激的映射与自然触觉处理机制相一致 [18]。显著的学习效应（各试次从75.0%提升至89.9%）以及中等程度的信心-准确率相关性（$r = .267$）表明，参数化模式支持快速知觉学习，使用户能够形成真正的空间理解，而非记忆任意映射。这一发现对实际应用尤为重要，因为它表明TactDeform的方法在保持可解释性的同时仅需极少训练，这对在虚拟现实环境中的实际部署十分重要。

出色的纹理辨别准确率（95.83%）验证了 TactDeform 的参数化位移机制，证明其是通过电触觉反馈传达表面属性的有效方法。这种方法之所以成功，是因为它利用了包括强度、时间模式和空间覆盖范围在内的多个感知维度，而非单一线索。这与相关研究结果一致：自然纹理感知会整合来自机械感受器群体的空间和时间信息 [65]。

此外，个体差异在各项任务中持续出现，例如不同的接触模式偏好和多样的面部感知特征，这与有效的触觉界面应提供定制化体验的观点相一致 [24]。与其将这些差异视为障碍，我们的研究结果表明，它们代表了系统应通过自适应渲染方法加以适应的设计机遇 [31]。偏好与探索行为之间的强耦合表明这些差异反映了真实的感知策略，从而支持近期对个性化触觉设计的呼吁 [46]。这一见解对该领域具有更广泛的意义，表明未来的触觉系统应优先考虑适应性和用户建模，而非一刀切的方法。

这些发现对扩展现实和无障碍应用具有重要意义。在无需大量训练的情况下即可达到较高准确率（几何识别准确率为85.7%，纹理辨别准确率为 95.8%），这表明其有望用于支持 XR 环境中视障用户的无障碍界面 [48, 59]。参数化模式的直观性已通过通用空间范围映射策略得到验证，这表明此类方法能够为主要依赖触觉反馈进行空间理解的用户提供有效的形状传达。

我们方法对特征的敏感性，以及在不同物体类型中观察到的渐进复杂度效应，也显示出其在医疗和工业培训中的应用前景，因为这些领域对空间特征识别至关重要 [28, 34]。突出边、角和表面过渡的能力，可以加强外科手术操作、制造质量控制或建筑设计评估等方面的培训；在这些场景中，细微的几何特征往往承载着关键信息。

8 局限性与未来方向

我们的实现存在若干技术限制，也由此凸显了未来的发展方向。首先，我们仅探索了单相阳极电流；研究阴极刺激可能会揭示不同的感知特性，或带来更舒适的体验。其次，电极阵列的指尖覆盖范围有限，使方向检测仅限于左右变化，无法实现完整的三维方向相关渲染 [50]。最后，我们的评估聚焦于单指交互，而现实世界中的触觉探索通常涉及多指协调和双手策略，这些策略可能显著提升空间理解和特征检测能力 [16, 45, 58]。

尽管我们的评估系统地考察了从简单图元到有机形态的不同复杂程度，但其几何范围仍仅涵盖现实世界形状和交互场景中的一小部分。未来研究应在更广泛的几何类别中评估性能，包括可变形物体、移动目标以及包含多个同时存在物体的环境。茶壶和兔子等复杂物体揭示了精细细节方面的局限，这表明我们需要更先进的内外分类算法，以有效处理负空间。

对未来发展而言，或许最有前景的是动态渲染系统的潜力：这类系统能够基于实时探索情境进行智能适配。我们关于交互距离与运动的研究结果表明，系统可以监测手指位置、运动速度和接触时长，从而动态优化渲染方法，在恰当的时刻提供恰当类型的反馈，同时兼顾个人探索偏好与特定任务需求。此类系统可以在用户采用指腹接触进行表面探索时的基于接触的渲染，与使用指尖边缘进行边界检测时的基于情境的渲染之间动态切换，同时在边界探索过程中适应进出运动，以便

提供能够同时最大化几何理解与个人用户偏好的最优空间反馈。

最后，未来的工作应研究参数化触觉模式如何在现实应用场景中与其他触觉模态及感官通道进行整合。与力反馈、振动触觉系统以及视觉—听觉信息的跨模态整合仍基本未得到探索，但理解这些交互对于在复杂环境中部署触觉系统至关重要；在此类环境中，触觉反馈会与其他感官模态竞争用户的注意力[47, 73]。

9 结论

我们提出了 TactDeform，这是一种参数化方法，用于渲染时空电触觉模式，以模拟虚拟现实中进行三维几何探索时自然产生的指腹变形。通过根据交互情境（接近、接触、滑动）和几何情境（特征与纹理）动态调整模式，TactDeform 表明，仅凭电触觉反馈即可传达细粒度的空间特征，无需力反馈装置，从而在不受物理限制的情况下实现大范围探索。我们的用户研究（N=24）通过较高的几何特征识别准确率（85.7%）和纹理辨别准确率（95.8%）验证了这一方法，证明对变形特征进行参数化编码能够通过电触觉刺激有效传达丰富的几何与纹理信息。除这些定量结果外，我们的研究还揭示了重要的定性见解：58%的参与者自发形成了棱探测式探索策略，并且个体在触觉处理方面自然呈现出差异，这表明基于变形的编码与自然感知机制相一致，同时也凸显了自适应触觉系统设计的必要性。TactDeform 背后的参数化原则并不局限于电触觉界面，因为变形模拟概念同样适用于其他触觉模态，包括高密度振动触觉阵列和多指界面；在这些界面中，理解具有特征性的变形模式有助于指导渲染策略。TactDeform 对医学培训、无障碍技术和交互式虚拟现实体验等领域均具有广泛影响，推动触觉渲染从统一的接触检测迈向面向特征的空间反馈。我们提供了开源实现，以促进该方法的采用，并支持未来基于这些参数化原则开展研究。TactDeform 为虚拟环境奠定了基础，使其能够提供逼真的物体探索与操控所必需的丰富触觉理解。

致谢

本研究得到澳大利亚政府国家健康与医学研究委员会（NHMRC）2022 年创意资助（资助编号 2021183）的支持。Withana 博士获得了澳大利亚研究理事会探索型职业早期研究人员奖（DECRA）资助，编号为 DE200100479，由澳大利亚政府提供资金。我们衷心感谢所有用户研究参与者付出的宝贵时间和贡献。此外，我们感谢 AID-LAB 成员提供的真知灼见和支持。

参考文献

[1] Albert J. Banes、Mari Tsuzaki、Juro Yamamoto、Brian Brigman、Thomas Fischer、Thomas Brown和Larry Miller。1995。细胞层面的机械感受：对机械信号的检测、解释及响应多样性。《生物化学与细胞生物学》73，7-8（1995年7月），349–365。doi:10.1139/o95-043 出版方：NRC Research Press。[2] Cagatay Basdogan、Frederic Giraud、Vincent Levesque和Seungmoon Choi。2020。表面触觉综述：让触摸表面产生触觉效果。*IEEE Transactions on Haptics* 13，3（2020年7月），450–470。doi:10.1109/TOH.2020. 2990712 会议名称：IEEE Transactions on Haptics。[3] Olivier Bau、Ivan Poupyrev、Ali Israr和Chris Harrison。2010。TeslaTouch：用于触摸表面的电振动。载于第*23*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '10*）。计算机协会，纽约州纽约，283 292 10 1145 1866029 1866074 –。doi: 。/ 。S. [4] J. Bensmaia、Hsiao、S. S.、Denchev、P. V.、Killebrew、J. H.、以及J. C. Craig。2008。刺激方向的触觉感知。《躯体感觉与运动研究》25，1（2008年1月），49–59。doi:10.1080/08990220701830662 出版方：Taylor & Francis _电子版：https://doi.org/10.1080/08990220701830662。[5] Virginia Braun和Victoria Clarke。2006。在心理学中运用主题分析。《心理学定性研究》3，2（2006年1月），77–101。doi:10.1191/1478088706qp063oa 出版方：Routledge _电子版：https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa。[6] Pratheep Kumar Chelladurai、Ziming Li、Maximilian Weber、Tae Oh和Roshan L Peiris。2024。SoundHapticVR：面向虚拟现实中聋人和听力障碍用户的头部空间触觉反馈，用于传达无障碍声音。载于第*26*届国际*ACM SIGACCESS*计算机与无障碍大会论文集（*ASSETS '24*）。计算机协会，纽约州纽约，1–17。doi:10.1145/3663548.3675639[7] Mantas Cibulskis、Difeng Yu、Erik Skjoldan Mortensen、Waseem Hassan、Mark Schram Christensen和Joanna Bergström。2025。利用肌腱振动在虚拟现实中产生运动错觉。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约，1–16。doi:10.1145/3706598.3714003[8] Yihao Dong、Pamuditha Somarathne、Craig T Jin、Juno Kim、Andrea Bianchi和Anusha Withana。2025。即将触碰之前：通过虚拟现实中的主动振动触觉提示操控感知到的触觉感受。载于*2025*年增强人类国际会议论文集（*AHs '25*）。计算机协会，纽约州纽约，79 91 10 1145 3745900 3746097 –。doi: 。/ 。[9] Tim Duente 、 Dennis Stanke 、 Moritz Klose 、 Benjamin Simon 、 Ibraheem Al-Azzawi和Michael Rohs。2024。触动我的方式：智能手表下方的定向电触觉反馈，作为骑行者的导航辅助工具。《*ACM*人机交互论文集》8，MHCI（2024年9月），274:1–274:25。doi:10.1145/3676521[10] Takahiro Endo、Haruhisa Kawasaki、Tetsuya Mouri、Yasuhiko Ishigure、Hisayuki Shimomura、Masato Matsumura和Kazumi Koketsu。2011。五指触觉界面机器人：HIRO III。*IEEE Transactions on Haptics* 4，1（2011），14–27。doi:10.1109/TOH.2010.62[11] Martin Feick、Cihan Biyikli、Kiran Gani、Anton Wittig、Anthony Tang和Anton Krüger。2023。VoxelHap：用于构建可在虚拟现实中提供触觉和动觉触觉反馈的代理物的工具包。载于第*36*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '23*）。计算机协会，纽约州纽约，1–13。doi:10.1145/3586183.3606722[12] Robert M. Friedman、Kim D. Hester、Barry G. Green和Robert H. LaMotte。2008。柔软度的大小估计。《实验脑研究》191，2（2008年11月），133–142。doi:10.1007/s00221-008-1507-5[13] Michele Germani、Maura Mengoni和Margherita Peruzzini。2013。用于材料纹理模拟的电触觉设备。《国际先进制造技术杂志》68（2013），2185–2203。https://doi.org/10.1007/s00170- 013-4832-1[14] Chutian Jiang、Yinan Fan、Junan Xie、Emily Kuang、Kaihao Zhang和Mingming Fan。2024。设计不显眼的指尖边缘调制电触觉反馈，帮助盲人和低视力（BLV）人士理解图表。载于*2024*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '24*）。计算机协会，纽约州纽约，1–20。doi:10.1145/3613904.3642546[15] Arata Jingu、Nihar Sabnis、Paul Strohmeier和Jürgen Steimle。2024。塑造柔顺性：利用电触觉颗粒在不同形状中诱发柔顺性的触觉错觉。载于*CHI*计算机系统人因会议论文集（美国夏威夷州檀香山）（*CHI '24*）。计算机协会，纽约州纽约，文章432，13页。doi:10.1145/3613904. 3641907[16] Arata Jingu、Anusha Withana和Jürgen Steimle。2023。虚拟现实中的双面触觉交互，用于抓握。载于第*36*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '23*）。计算机协会，纽约州纽约，1 11 10 1145 3586183 3606798 –。doi: 。/ 。[17] Roland S. Johansson 和 J. Randall Flanagan。2009。物体操控任务中来自指尖的触觉信号的编码与使用。10，5（2009），345–359。

doi:10.1038/nrn2621 出版方：Nature Publishing Group。[18] Lynette A. Jones和Hong Z. Tan。2013。将心理物理学技术应用于触觉研究。*IEEE Transactions onHaptics* 6，3（2013年7月），268–284。doi:10.1109/TOH.2012.74 会议名称：IEEE Transactions on Haptics。[19] Hiroyuki Kajimoto。2016。电触觉显示器：原理与硬件。载于《普适触觉：科学、设计与应用》，Hiroyuki Kajimoto、Satoshi Saga和Masashi Konyo（编）。Springer Japan，东京，79–96。doi:10.1007/978-4-431-55772-2 5[20] Hiroyuki Kajimoto、Naoki Kawakami、T Maeda和S Tachi。2004。采用触觉原色方法的电触觉显示器。东京大学信息与技术研究生院（2004）。http://www.files.tachilab.org/publications/intconf2000/kajimoto200410IROS.pdf [21] H. Kajimoto、N. Kawakami、S. Tachi和M. Inami。2004。SmartTouch：触摸不可触之物的电皮肤。*IEEE Computer Graphics and Applications* 24，1（ 2004 36 43 10 1109 2004 1255807），–。doi: 。/MCG. 。Christopher [22] Katins、Jannis Strecker、Jan Hinrichs、Pascal Knierim、Bastian Pfleging和Thomas Kosch。2025。广告拦截现实：使用扩展现实评估用户对内容拦截概念的感知。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约， 1 18 10 1145 3706598 3713230 –。doi: 。/ 。[23] Johan Kildal。2010 3 。D-press：按压刚性表面时产生柔顺性的触觉错觉。doi:10.1145/1891903.1891931 页码：文章21 类型：会议论文。[24] Erin Kim和Oliver Schneider。2020。定义触觉体验：理解、沟通和评估触觉体验的基础。载于*2020*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '20*）。计算机协会，纽约州纽约， 1 13 10 1145 3313831 3376280 –。doi: 。/ 。[25] Seung-Chan Kim 、 Ali Israr 和 Ivan Poupyrev。2013 3 。触摸表面上 D 特征的触觉渲染。载于第*26*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '13*）。计算机协会，纽约州纽约， 531 538 10 1145 2501988 2502020 –。doi: 。/ 。[26] Yeonsu Kim、Jisu Yim、Kyunghwan Kim、Yohan Yun和Geehyuk Lee。2024。Pro-Tact：为视野外VR菜单中的免眼动射线指向，分层台成本体感觉与触觉探索。载于第*37*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（*UIST '24*）。计算机协会，纽约州纽约，1–11。doi:10.1145/ 3654777.3676324[27] Jungeun Lee、Minha Jeon、Jinyoung Lee、Seungmoon Choi和Seungjae Oh。2025。SkinHaptics：探索皮肤柔软度感知与虚拟身体具身化技术，以增强自我触觉交互。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约， 1 18 10 1145 3706598 3713891 –。doi: 。/ 。[28] Arnaud Lelevé 、 Troy McDaniel 和 Carlos Rossa。2020 。触觉训练仿真。*Frontiers in Virtual Reality* 1（2020年7月）。doi:10.3389/frvir.2020.00003 出版方：Frontiers。[29] Tinghui Li、Eduardo Velloso、Anusha Withana和Zhanna Sarsenbayeva。2025。评估负重与行走对混合现实交互的影响。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约，1–24。doi:10.1145/3706598.3713492[30] Hongnan Lin、Lei Gao、Shengsheng Jiang、Hongyu Yue、Ziyi Fu、Jinyi Luo、Chengx- iao Wu、Teng Han、Feng Tian和Sriram Subramanian。2025。Slip-Grip：一种模拟重量的电触觉方法。载于*2025*年*CHI*计算机系统人因会议论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约， 1 14 10 1145 3706598 3713361 –。doi: 。/ 。[31] Monica Malvezzi、Francesco Chinello、Domenico Prattichizzo和Claudio Pacchierotti。2021。设计个性化可穿戴触觉界面，以适应指尖大小和形状。*IEEE Transactions on Haptics* 14，2（2021年4月），266–272。doi:10.1109/TOH.2021.3076106[32] Katerina Mania、Shahrul Badariah、Matthew Coxon和Phil Watten。2010。将空间意识状态从沉浸式虚拟环境认知迁移至现实。《*ACM*应用感知学报》7，2（2010年2月），9:1–9:14。doi:10.1145/1670671.1670673[33] Jonatan Martínez、Arturo García、Miguel Oliver、José Pascual Molina和Pascual González。2016。使用振动触觉手套识别虚拟三维几何形状。*IEEE Computer Graphics and Applications* 36，1（2016年1月），42–51。doi:10. 1109/MCG.2014.81 会议名称：IEEE Computer Graphics and Applications。[34] Mohammad Motaharifar、Alireza Norouzzadeh、Parisa Abdi、Arash Iranfar、Faraz Lotfi、Behzad Moshiri、Alireza Lashay、Seyed Farzad Mohammadi和Hamid D. Taghirad。2021。COVID-19疫情期间触觉技术、虚拟现实和人工智能在医学培训中的应用。《*Frontiers*机器人与人工智能》8（2021年8月）。doi:10.3389/frobt.2021.612949 出版方：Frontiers。[35] Dinmukhammed Mukashev、Nimesha Ranasinghe和Aditya Shekhar Nittala。2023。TactTongue：舌头上的电触觉刺激原型设计。载于第*36*届*ACM*用户界面软件与技术年度研讨会论文集（美国加利福尼亚州旧金山）（*UIST '23*）。计算机协会，纽约州纽约，文章105，14页。doi:10.1145/3586183. 3606829

[36] Shogo Okamoto、Hikaru Nagano 和 Yoji Yamada。2013。纹理触觉感知的心理物理维度。*IEEE Transactions on Haptics* 6，1（2013），81–93。doi:10.1109/TOH.2012.32[37] Simone Ooms、Minha Lee、Ekaterina R. Stepanova、Pablo Cesar 和 Abdallah El Ali。2025。触觉生物信号对虚拟现实智能体的人际距离的影响。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会（*CHI '25*）论文集。计算机协会，纽约州纽约市，美国，1–18。doi:10.1145/3706598.3713231[38] Reza Haghighi Osgouei、Jin Ryong Kim 和 Seungmoon Choi。2017。利用静电摩擦显示器提升三维形状识别。*IEEE Transactions on Haptics* 10，4（2017年10月），533–544。doi:10.1109/TOH.2017.2710314 会议名称：IEEE Transactions on Haptics。[39] Daniel Sutopo Pamungkas 和 Koren Ward。2016。用于提升虚拟现实体验的电触觉反馈系统。*International Journal of Computer Theory and Engineering* 8，6（2016），465–470。https://www.ijcte.org/vol8/1090-E007.pdf [40] Praneeth Bimsara Perera、Ravindu Madhushan Pushpakumara、Hiroyuki Kajimoto、Arata Jingu、Jürgen Steimle 和 Anusha Withana。2025。eTactileKit：用于电触觉界面设计探索与快速原型制作的工具包。载于第*38*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集（纽约州纽约市，美国，2025-09-27）（*UIST '25*）。计算机协会， 1 17 10 1145 3746059 3747796 –。doi: . / .[41] Margherita Peruzzini、Michele Germani 和 Maura Mengoni。2012。用于纹理模拟的电触觉设备。载于*2012*年*IEEE/ASME*第*8*届*IEEE/ASME*机电与嵌入式系统及应用国际会议论文集。178–183。doi:10.1109/MESA.2012.6275558[42] Nina Rosa、Wolfgang Hürst、Wouter Vos 和 Peter Werkhoven。2015。视觉线索对多模态沉浸式虚拟环境中被动触觉的影响。载于*2015*年*ACM*多模态交互国际会议论文集（*ICMI '15*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，327–334。doi:10.1145/2818346.2820744[43] Nihar Sabnis、Maëlle Roche、Dennis Wittchen、Donald Degraen 和 Paul Strohmeier。2025。用于虚拟现实伪力渲染的运动耦合非对称振动。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会（*CHI '25*）论文集。计算机协会，纽约州纽约市，美国， 1 22 10 1145 3706598 3713358 –。doi: . / . Taiga Saito、[44] Takumi Hamazaki、Seitaro Kaneko 和 Hiroyuki Kajimoto。2023。使用弹性凝胶和麻醉膏通过电刺激在前臂掌侧呈现冷感。载于*2023*年增强人类国际会议论文集（英国格拉斯哥）（*AHs '23*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，46–54。doi:10.1145/3582700. 3582713[45] Samuel B. Schorr 和 Allison M. Okamura。2017。用于虚拟物体操控与探索的指尖触觉设备。载于*2017*年*CHI*计算机系统人因会议论文集（*CHI '17*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，3115–3119。doi:10.1145/3025453. 3025744[46] Hasti Seifi 和 Karon E. MacLean。2017。利用触觉维度：用户的意义建构模式作为体验设计与个性化的途径。*International Journal of Human-Computer Studies* 107（2017年11月），38–61。doi:10.1016/j.ijhcs. 2017.04.003[47] Aayush Shrestha 和 Joseph Malloch。2025。超越视觉的虚拟世界：为非视觉虚拟现实探索设计并评估视听触觉系统。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，1–19。doi:10.1145/3706598.3713400[48] Alexa F. Siu、Mike Sinclair、Robert Kovacs、Eyal Ofek、Christian Holz 和 Edward Cutrell。2020。无视觉虚拟现实：用于导航复杂虚拟世界的触觉与听觉白手杖。载于*2020*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '20*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国， 1 13 10 1145 3313831 3376353 –。doi: . / .[49] Michiru Sobue、Soma Kato、Izumi Mizoguchi 和 Hiroyuki Kajimoto。2025。测量食指和拇指指尖的触觉敏锐度分布。*IEEE Transactions on Haptics*（ 2025 10 1109 2025 3580707）。doi: . /TOH. . Michiru Sobue、Izumi Mizoguchi 和 Hiroyuki Kajimoto。. 电触觉显示器中电极放置的优化设计，以及面向多指的皮肤感觉呈现。载于*CHI*计算机系统人因会议扩展摘要论文集（*CHI EA '25*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国， 1 5 10 1145 3706599 3721198 –。doi: . / .[50] 2025 2025[51] Paul Strohmeier、Sebastian Boring 和 Kasper Hornbæk。2018 . 从脉冲序列到“用振动着色”：空中触觉纹理的运动映射。载于*2018*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '18*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，1–13。doi:10.1145/3173574.3173639[52] Paul Strohmeier、Seref Güngör、Luis Herres、Dennis Gudea、Bruno Fruchard 和 Jürgen Steimle。2020。bARefoot：利用鞋内运动耦合振动生成虚拟材料。载于第*33*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集（*UIST '20*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，579–593。doi:10.1145/3379337.3415828

[53] Yui Suga、Masahiro Miyakami、Izumi Mizoguchi 和 Hiroyuki Kajimoto。2023。结合力反馈与电触觉刺激呈现三维形状。载于*2023*年*IEEE*世界触觉大会（*WHC*）。361–367。doi:10.1109/ WHC56415.2023.10224481 ISSN：2835-9534。[54] Yui Suga、Izumi Mizoguchi 和 Hiroyuki Kajimoto。2024。结合力反馈与电触觉刺激呈现指尖大小的形状。载于*2024*年*IEEE*虚拟现实与三维用户界面大会（*VR*）。590–597。doi:10. 1109/VR58804.2024.00079 ISSN：2642-5254。[55] Yui Suga、Masahiro Takeuchi、Satoshi Tanaka 和 Hiroyuki Kajimoto。2023。结合电触觉刺激与力反馈呈现柔软度。*Frontiers in Virtual Reality* 4 2023 1133146 10 3389 2023 1133146 ( )，。[56] doi：. /frvir. 。Taiki Takami、Taiga Saito、Takayuki Kameoka 和 Hiroyuki Kajimoto。2023。ExtEdge：通过棱部的电触觉提升智能手机视觉体验。载于*2023*年*ACM*空间用户交互研讨会论文集（澳大利亚新南威尔士州悉尼）（*SUI '23*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，文章7，8页。doi:10.1145/ 3607822.3614543[57] Seiya Takei、Ryo Watanabe、Ryuta Okazaki、Taku Hachisu 和 Hiroyuki Kajimoto。2015。使用薄膜式电触觉显示器和压力分布测量呈现柔软度。Springer Japan，东京，91–96。doi:10.1007/978-4-431- 55690-9 17[58] Yudai Tanaka、Alan Shen、Andy Kong 和 Pedro Lopes。2023。不遮挡手掌侧的全手电触觉反馈。载于*2023*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '23*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，1–15。doi:10.1145/3544548.3581382[59] Shan-Yuan Teng、Gene S-H Kim、Xuanyou Liu 和 Pedro Lopes。2025。用手看见：支持手动交互的感觉替代技术。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集。ACM，日本横滨，1 15 10 1145 3706598 3713419 – 。doi：. / .[60] Shan-Yuan Teng、Tzu-Sheng Kuo、Chi Wang、Chi-huan Chiang、Da-Yuan Huang、Liwei Chan 和 Bing-Yu Chen。2018。PuPoP：虚拟现实中的掌上弹出道具。载于第*31*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集（*UIST '18*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，5 17 10 1145 3242587 3242628 – 。doi：. / . Cesar Torres、Tim Campbell、Neil Kumar 和 Eric Paulos。2015。HapticPrint：为数字制造设计触感美学。载于第*28*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集（*UIST '15*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，583–591。doi:10.1145/2807442. 2807492[62] Uliana Tsimbalistaia、Caroline Berger、Hans Gellersen 和 Pavel Manakhov。2025。身体上的图标：设计用于在增强现实中启动应用程序的三维界面。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集（*CHI '25*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，1–15。doi:10.1145/3706598.3713954[63] Dangxiao Wang、Meng Song、Afzal Naqash、Yukai Zheng、Weiliang Xu 和 Yuru Zhang。2019。迈向全手动觉反馈：力反馈手套综述。*IEEE Transactions on Haptics* 12，2（2019），189–204。doi:10.1109/TOH.2018.2879812[64] John Ware、Elizabeth Cha、Michael A. Peshkin、J. Edward Colgate 和 Roberta L. Klatzky。2014。表面触觉显示器呈现触觉特征的搜索效率。*IEEE Transactions on Haptics* 7，4（2014年10月），545–550。doi:10.1109/ TOH.2014.2323257[65] Alison I. Weber、Hannes P. Saal、Justin D. Lieber、Ju-Wen Cheng、Louise R. Manfredi、John F. Dammann 和 Sliman J. Bensmaia。2013。时空编码介导天然纹理的触觉感知。110，42（2013），17107–17112。doi:10.1073/pnas.1305509110 出版方：美国国家科学院院刊。[66] Anusha Withana、Daniel Groeger 和 Jürgen Steimle。2018。Tacttoo：用于皮肤触觉输出的薄型可透感纹身。载于第*31*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集（*UIST '18*）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，365–378。doi:10. 1145/3242587.3242645[67] Cheng Xu、Ali Israr、Ivan Poupyrev、Olivier Bau 和 Chris Harrison。2011。利用TeslaTouch为视障人士提供触觉显示。载于*CHI '11*计算机系统人因会议扩展摘要。计算机协会，纽约州纽约市，美国，317–322。doi:10.1145/1979742.1979705[68] Kuanming Yao、Jingkun Zhou、Qingyun Huang、Mengge Wu、Chun Ki Yiu、Jian Li、Xingcan Huang、Dengfeng Li、Jingyou Su、Senlin Hou、Yiming Liu、Ya Huang、Ziyan Tian、Jiyu Li、Hu Li、Rui Shi、Binbin Zhang、Jingyi Zhu、Tsz Hung Wong、Huiling Jia、Zhan Gao、Yuyu Gao、Yu Zhou、Wooyoung Park、Enming Song、Mengdi Han、Haixia Zhang、Junsheng Yu、Lidai Wang、Wen Jung Li 和 Xinge Yu。2022。通过集成于皮肤的无线触觉界面对手部触觉信息进行编码。*NatureMachine Intelligence* 4，10（2022年10月），893–903。doi:10. 1038/s42256-022-00543-y 出版方：Nature Publishing Group。[69] Vibol Yem 和 Hiroyuki Kajimoto。2016。电刺激与机械刺激产生的触觉比较评估。*IEEE*触觉学报10，1（2016），130–134。doi:10.1109/TOH.2016.2605084

[70] Vibol Yem 和 Hiroyuki Kajimoto。2017。采用机械和电刺激的可穿戴触觉设备，用于与虚拟世界进行指尖交互。载于*2017 IEEE*虚拟现实（*VR*）。IEEE，99–104。[71] Jiakun Yu、Supun Kuruppu、Biyon Fernando、Praneeth Bimsara Perera、Yuta Sug- iura、Sriram Subramanian 和 Anusha Withana。2024。IrOnTex：利用可熨烫3D打印物体制作并原型化可定制交互式纺织品。*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术学报8，3（2024年9月），138:1–138:26。doi:10.1145/3678543[72] Jiakun Yu、Praneeth Bimsara Perera、Rahal Viddusha Perera、Mohammad Mirkha- laf Valashani 和 Anusha Withana。2024。通过调整填充特性制作可定制的3D打印压力传感器。*IEEE*传感器期刊24，6（3月 2024 7604 7613 10 1109 2024 3358330 ），–。doi: ./JSEN.。[73] 2025 Gyeore Yun 和 Seungmoon Choi。。将声音转换为实时语义化全身触觉反馈，用于虚拟现实游戏。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会（*CHI '25*）论文集。计算机协会，纽约州纽约，美国，1–17。doi:10.1145/ 3706598.3713355[74] Hongyu Zhou、Treshan Ayesh、Chenyu Fan、Zhanna Sarsenbayeva 和 Anusha Withana。2024。CoplayingVR：理解虚拟现实共享控制中的用户体验。*ACM*交互、移动、可穿戴与普适技术学报8，3（ 2024 148 1 148 25 10 1145 3678508 ），: – :。doi: ./[75] Hongyu Zhou 、 Chia-An Fan 、 Yihao Dong 、 Shuto Takashita 、 Masahiko Inami、Zhanna Sarsenbayeva 和 Anusha Withana。2026。SRL Proxemics：近身交互中超额机器人肢体的空间指南。载于*2026*年 *CHI* 人机交互系统中的人为因素大会（*CHI '26*）论文集（西班牙巴塞罗那）。计算机协会。doi:10.1145/3772318. 3790532[76] Hongyu Zhou、Xincheng Huang、Winston Wijaya、Yi Fei Cheng、David Lindlbauer、Eduardo Velloso、Andrea Bianchi、Zhanna Sarsenbayeva 和 Anusha Withana。2026。一具身体，两种思维：远程操控超额肢体时交替切换虚拟现实视角。载于*2026*年 *CHI* 人机交互系统中的人为因素大会（*CHI '26*）论文集（西班牙巴塞罗那）。计算机协会，纽约州纽约，美国。doi:10.1145/3772318.3791433[77] Hongyu Zhou、Tom Kip、Yihao Dong、Andrea Bianchi、Zhanna Sarsenbayeva 和 Anusha Withana。2025。操控额外肢体：识别虚拟现实中超额多臂的控制策略。载于*2025*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会（*CHI '25*）论文集。计算机协会，纽约州纽约，美国，1–16。doi:10.1145/3706598.3713647