TactileWalk：行走时基于指尖交互的动态电触觉模式

Vedika Nimbalkar
vn4032@rit.edu AIR 实验室，信息学院，GCCIS，罗切斯特理工学院，美国纽约州罗切斯特

Roshan Peiris
roshan.peiris@rit.edu AIR 实验室，信息学院，GCCIS，罗切斯特理工学院，美国纽约州罗切斯特

arXiv:2603.01974v1 [cs.HC] 2 Mar 2026

摘要

TactileWalk 评估了用于可穿戴导航的指尖动态电触觉模式。我们开发了一种指尖刺激原型，配备由 ESP32 微控制器和高压驱动器驱动的 10×6 电极阵列，以实现快速、独立的电极激活，用于时空模式呈现。本研究比较了三种动态模式：单线、双线和方框，它们分别在触觉显示器的指尖位置呈现八个方向。研究1（静止状态）表明，简单的线性模式比复杂形状的识别准确率显著更高。研究2（行走状态）证实，这些提示在运动中依然可靠，其中双线模式的准确率最高（90.83%）。参与者始终更偏好具有“强化”效果的双线模式，并且认为行走时垂直运动更直观。我们提出了移动触觉设计方面的启示，建议采用简单且空间冗余的模式，以减少免视觉导航过程中的认知负荷。

CCS 概念

• **以人为中心的计算 → 触觉设备**。

关键词

电触觉、导航、触觉反馈、移动反馈

ACM 参考文献格式：

Vedika Nimbalkar 和 Roshan Peiris。2026。TactileWalk：用于行走过程中基于指尖的交互的动态电触觉模式。载于《*2026 年 ACM 人机交互系统大会（CHI EA '26）扩展摘要集*》，*2026年4月13–17日*，西班牙巴塞罗那。ACM，纽约，纽约州，美国，6 页。https://doi.org/10.1145/3772363.3798818

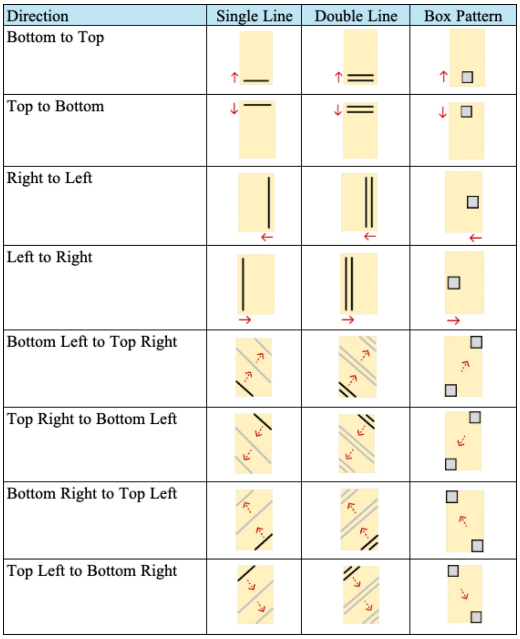


图1：研究1的电触觉模式分类。刺激集包含三种基本空间形状：（A）单线、（B）双线和（C）方框模式。箭头表示研究期间应用于各配置的动态运动模式。

1 引言

触觉反馈是人机交互的重要组成部分，使用户能够通过身体感觉而非视觉或听觉线索来感知信息。在增强现实（AR）、虚拟现实（VR）和可穿戴设备等新兴系统中，触觉反馈的重要性日益凸显。

尤其是电触觉反馈，因其在可穿戴设备和移动应用中的精确性与实用性潜力而日益受到关注 [34]。电触觉刺激是通过施加电流刺激神经，从而产生触觉感受的过程 [29]。该技术通过让电流穿过皮肤，在电极所在位置产生局部感觉 [8]。研究已证明，电触觉刺激用途广泛，可应用于增强现实和虚拟现实[21, 25, 28, 34, 35, 37], 技能训练 [18, 32], 纺织品呈现 [13], 以及辅助技术 [6, 12, 14, 15, 24]。

电触觉反馈已在多种身体部位得到研究，包括足部 [33], 嘴唇 [7], 舌头 [16], 手臂 [2],和手腕 [3]，以支持导航、无障碍、纹理呈现 [13], 材料感知 [1], 和虚拟现实 [25, 34]等应用。其中许多研究采用稀疏或线性电极阵列，探索前臂和指尖上的感知现象，例如似动、滑动错觉和漏斗效应 [17, 26, 27, 31]。

本作品采用知识共享署名-非商业性使用-禁止演绎 4.0 国际许可协议。*CHIEA' 26*，西班牙巴塞罗那 ©2026 版权所有者/作者所有。ACM ISBN 979-8-4007-2281-3/2026/04 https://doi.org/10.1145/3772363.3798818

由于指尖的机械感受器密度较高，因此它特别适合用于提供高分辨率反馈。既有研究已证实，相较于水平或对角线图案，垂直指尖运动更容易被识别 [22], ，但利用高密度阵列传递复杂时空信息，以支持导航等应用，仍有很大潜力。

在移动导航场景中，通过其他感官通道提供反馈，可以减少对视觉或听觉线索的依赖，从而降低认知负荷 [3]。现有导航研究已探索手腕处的振动触觉 [5, 23, 30],、热觉 [19, 20], 和电触觉模态 [3] ，以及足部 [11, 33], 的相关应用。指尖为导航提供电触觉反馈具有独特优势：用户在导航过程中本就会自然地与移动设备交互，因而指尖能够传递精准、动态的导航线索。

为探索这一可能性，我们开展了两项研究，评估不同动态时空模式的可感知性，并考察它们用于导航的适用性。因此，在研究1中，我们设计了三种动态电触觉模式：单线、双线和方框，每种模式都沿八个方向移动（图1），并在静止环境中评估其感知准确率，以回答*RQ1*：指尖能多准确地感知电触觉模式？。基于研究结果，研究2评估了行走时这些模式是否仍然易于解读，以回答*RQ2*：行走如何影响电触觉模式识别的准确率和反应时间？总体而言，这两项研究评估了动态指尖电触觉模式在面向导航的可穿戴与移动交互中的适用性。

2 研究1：指尖动态电触觉模式的感知

原型： 图 2 展示了电触觉反馈系统，该系统采用了根据 Kajimoto 先前研究改造的指尖刺激装置 [9, 10]。我们对原型进行了定制，使其配备一个由直径 1 mm 的圆形电极组成的 10×6 电极阵列，电极间距为 1mm。该阵列由多通道系统驱动，并通过 ESP32 微控制器和高压移位寄存器驱动器（HV513/HV507）控制，从而实现快速、独立的电极寻址。该系统采用电流调节架构，工作电压约为 300 V。

刺激配置为单极模式：在每个刺激帧中，一个电极被激活为阴极（有源电极），而阵列中的所有其他电极则连接至互补参考线，作为共用阳极（回流端）。为呈现空间模式，系统采用顺序扫描而非同时激活的方式；预期模式中的每个电极都会短暂地被赋予相应角色，然后再切换到下一个电极。这种时空呈现方式采用单相、电流控制脉冲，脉宽固定为 100 μs。

包含在研究软件中的控制软件（图2（中））——以 Processing 实现——以一致的 25 ms 刺激间隔（ISI）呈现模式。该数值依据先导测试选定；测试表明，25 ms 能有效平衡似动的要求——确保感觉像一条连续移动的线，而非离散的点——同时避免与更快的刷新率或硬件引起的延迟相关的“时间融合”或不适。我们为每位参与者单独校准刺激幅度，以确保达到

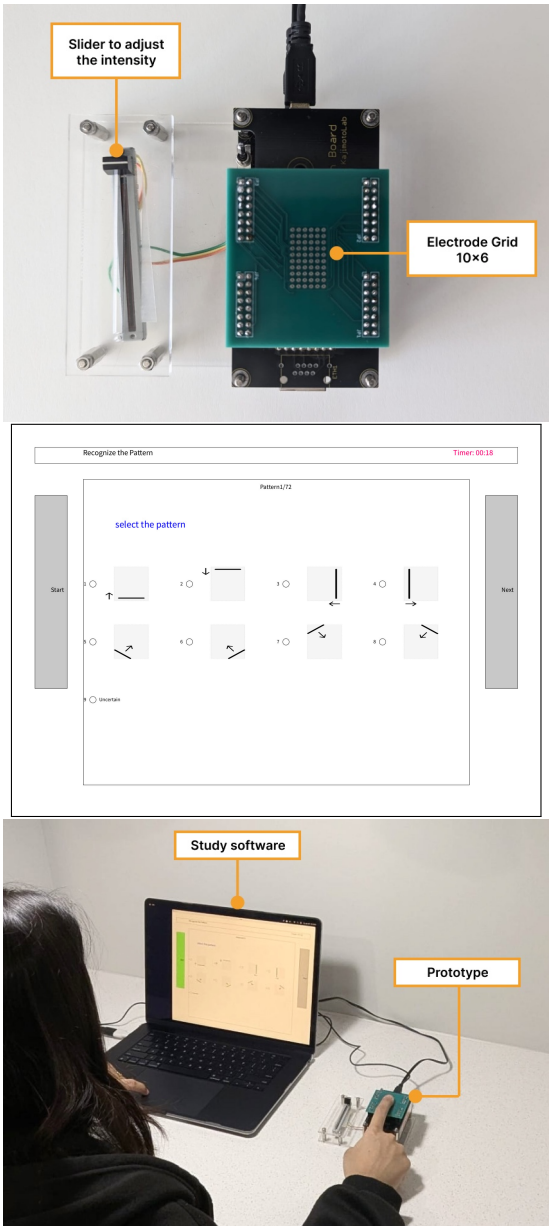


图2：（上）指尖电触觉原型的设置。该界面由一个 10×6 电极阵列和强度控制滑块组成。（中）用于呈现刺激并收集参与者反应的软件界面。点击“开始”按钮会在指尖启动刺激，参与者需选择所感知的模式并点击“下一步”以确认。（下）研究设置，参与者在指尖体验反馈并报告其结果

清晰可感知且舒适的水平，并通过电流调节确保即使皮肤阻抗发生变化，刺激也能保持一致。

模式设计：使用该系统，我们评估了三种动态电触觉模式：单线、双线和方框，每种模式均沿八个运动方向呈现：从下到上、从上到下、从左到右、从右到左、从左下到右上、从右上到左下、从右下到左上，以及从左上到右下。模式的选择参考了先前研究 [22] 和先导测试，以兼顾简洁性和表现力：单线用于呈现最简提示，双线用于考察空间冗余，方框则用于评估对移动实心形状的感知。模式类型作为主要自变量，每个方向重复三次，因此每位参与者共进行72次试验；模式类型和方向顺序均完全随机化。

每个刺激帧中激活的电极数量取决于模式类型和运动方向。对于单线模式，激活区域对应于 10×6 阵列中的一整行或一整列，水平运动每帧激活10个电极，垂直运动每帧激活6个电极。对于对角运动，激活电极的数量会随着线条穿过网格而动态变化：从角落处的单个电极逐渐增加至最大范围，再随着线条移出而对称地减少。双线模式会激活两行或两列紧邻的电极，因此激活电极数量恰好是相应单线模式的两倍。方框模式会激活一个 4×3 矩形轮廓（每帧n个 = 12 电极），且该轮廓在不同运动方向下保持不变。

实验流程： 招募了12名参与者（年龄22–28岁，M = 24.92，SD = 1.73），他们来自该机构，并使用自己惯用的手与原型进行交互。参与者主要将惯用手的食指放在电极阵列上。参与者提供知情同意并接受简短介绍后，完成了一个简短的熟悉阶段，以选择舒适的刺激强度。在实验试次开始前，针对每位参与者单独校准刺激幅度，使其达到清晰可感知且舒适的水平。随后，每位参与者完成72个随机试次（八个方向下的每种模式各重复三次），并根据需要安排休息，以减少疲劳。体验每种模式后，参与者报告信心程度、填写NASA TLX问卷 [4], 并回答简短的体验相关问题。研究结束后进行了访谈，以收集关于可用性和整体体验的定性反馈。

2.1 研究1结果

图3展示了所有图案类型的平均感知准确率。总体而言，单线图案的准确率最高（88.54%），其次是双线模式（86.11%），而方框图案的准确率则明显较低（66.32%）。我们以图案类型（单线、双线、方框）为被试内因素，进行了单因素重复测量方差分析。Mauchly球形检验未通过（$\chi^2(2) = 7.147$, $p < 0.05$）。因此，采用Greenhouse-Geisser校正的重复测量方差分析显示，图案类型对准确率有显著主效应（$F_{(1.35,14.88)} = 8.45$, $p = 0.007$）。事后Bonferroni比较表明，

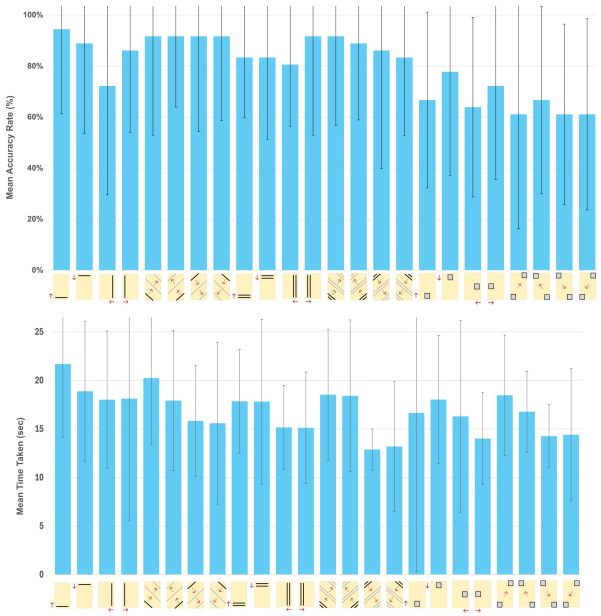


图3：研究1结果，展示感知模式的平均准确率（上）和平均反应时间（下）。误差线表示标准差。

单线图案和双线模式的识别准确率均显著高于方框图案（分别为$p < .003$ 和 $p < .009$），而单线与双线之间没有显著差异（$p = 1.00$）。

所有方向的平均用时如图3所示。尽管单线图案的准确率最高，但其总体完成时间也最长，平均为1828.25毫秒。相比之下，双线和方框模式的完成时间相近，平均分别为1611.56毫秒和1610.73毫秒。针对每种图案类型的用时，在确认满足正态性假设（Shapiro-Wilk检验，$p > .05$）和球形性假设（Mauchly检验，$p > .05$）后，进行了重复测量方差分析。结果显示，图案类型对完成时间没有显著影响，$F_{(2,22)} = 3.422$, $p = 0.051$。

参与者的反馈大体上与定量结果一致。尽管方框图案的准确率最低，参与者的反应却褒贬不一：12名参与者中有3人认为其紧凑的刺激区域有所帮助，而其他人则表示难以辨别运动方向，尤其是对角线图案（例如，“方框图案的方向有点难以分辨”（P14））。相比之下，参与者对单线和双线模式始终给予了积极评价。12名参与者中有2人指出，双线模式提供了更清晰的方向确认，其中一人表示“第二条线就像是对第一次运动的确认”（P5）。参与者还报告称，识别对角运动比识别垂直或水平运动更加困难，对方框图案尤其如此，这表明复杂形状与对角运动相结合会降低感知清晰度。

3 研究2：行走时指尖电触觉模式的感知

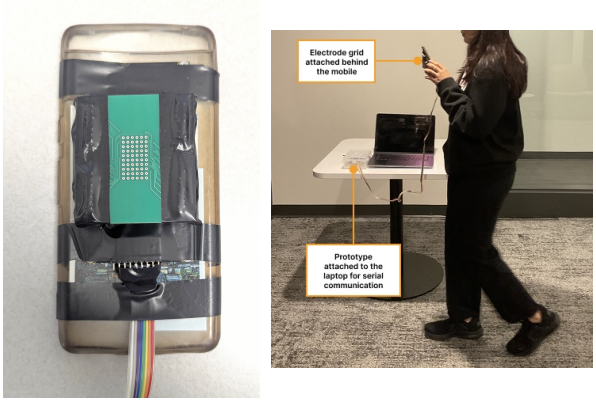


图4：采用移动设备的研究2实验设置。（左）安装在手机背面的电触觉网格。（右）研究设置，展示一名参与者正在执行基于行走的模式识别任务。参与者的移动设备显示了与图2（中）类似的界面，用于报告其反应。

在研究1结果的基础上，研究2通过考察运动状态下准确率和反应时间的变化，评估了行走过程中电触觉模式识别的稳健性。

原型与模式设计。研究2使用了与研究1相同的电触觉硬件，并将 10×6 电极阵列安装在手机背面，以刺激指尖（图4）。基于 Processing 的 Android应用程序控制刺激呈现和反应输入，并通过有线串行连接与电触觉控制器通信，同时自动将反应和反应时间记录到 CSV 文件中。所有模式均以固定时长呈现，步间延迟一致，为 25 ms。在研究1的基础上，模式类型仍为主要自变量，但减少为两个条件：单线和双线。根据先导测试，由于对角方向在行走时难以辨认，因此将其排除，最终保留四个方向（自下而上、自上而下、从左到右、从右到左）。每个方向重复三次，因此每位参与者共完成 24 个随机排序的试次。

流程。 本研究共有 10 名参与者（年龄 24–29 岁，M = 25.1，SD = 1.52），均从所在机构招募。参与者使用惯用手，以舒适且自行选择的速度行走，以支持自然交互。在提供知情同意并接受简短的复习说明后，参与者一边行走，一边完成模式识别任务；受电触觉垫与笔记本电脑之间有线连接长度有限的影响，他们沿着一条 3–4 英尺长的直线路径来回行走。电触觉网格安装在手机背面，参与者以自然姿势握持手机，同时将食指放在电触觉垫上；必要时可用另一只手进行稳定（图 4）。完成每种模式的试次后，参与者报告了信心程度、填写了NASA TLX问卷 [4], 并回答了简短的体验相关问题。研究后访谈收集了参与者对可用性的定性反馈。

3.1 研究2结果

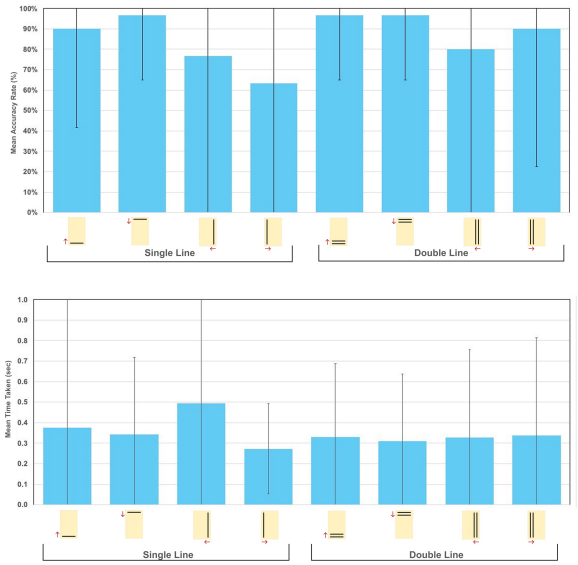


图5：研究2结果，显示行走期间的平均准确率（左）和反应时间（右）。误差线表示标准差。

图5展示了行走时两种图案类型的平均准确率。与单线图案（81.67%）相比，参与者使用双线模式时的平均准确率更高（90.83%）。双线模式在所有方向上的表现始终更好，60%的参与者达到了完美准确率。由于样本量较小（$N = 10$），且双线条件下的数据呈负偏态，因此采用了威尔科克森符号秩检验。分析未发现两种条件之间存在统计学上的显著差异（$Z = 8, p = 0.182$），不过观察到的趋势与参与者偏好双线模式所提供的强化方向线索一致。

图5显示了平均反应时间。单线图案的平均反应时间为351毫秒，而双线模式的平均反应时间略快，为326毫秒。各方向上的反应时间总体稳定，但单线图案的变异性更大。夏皮罗-威尔克检验确认数据不服从正态分布（$p < 0.001$）后，分析采用了威尔科克森符号秩检验。分析未发现两种条件之间存在统计学上的显著差异（$Z = 22, p = 0.625$）。这些结果表明，尽管双线模式的反应略快，但行走期间参与者对两种图案的识别速度相当。

总体而言，参与者对行走时使用电触觉系统给予了积极反馈。10 位参与者中有 7 位表示，他们会考虑在日常生活中使用此类系统

进行导航，一位参与者还建议将其设计为可穿戴设备，并表示“也会把它戴在智能手表后面”（P6）。参与者始终更偏好双线模式，认为它比单线模式更清晰、更容易理解；一位参与者指出，“两条线都产生刺激，让我更清楚地知道它朝哪个方向移动”（P2）。这一偏好也体现在表现上：双线模式下，10 位参与者中有 6 位达到了完美准确率。就方向而言，参与者普遍认为垂直运动（自上而下和自下而上）比水平运动更直观；水平运动常被认为不够明显（例如，“水平运动方向有点难以辨认”（P4））。这一反馈与先前研究结果一致：与水平运动相比，指尖上的垂直电触觉运动更容易被可靠地感知 [22]。

4 讨论

通过两项研究，我们探讨了静止和行走条件下，参与者对指尖动态电触觉模式的感知方式。研究1显示，简单的线性模式——单线和双线——比方框图案的识别准确率显著更高，这表明模式的简洁性和空间连续性对于基于指尖的电触觉感知至关重要。与先前的研究一致 [22], , 对角运动比垂直和水平运动更难识别，这凸显了使模式运动方向与指尖敏感度分布相匹配的重要性。

基于这些发现，研究2考察了行走过程中的模式识别，并发现尽管身体处于运动状态，电触觉提示仍然可以被理解。将模式集简化为两种模式和四个方向，降低了认知负荷，并有助于实现可靠识别。双线模式再次表现出色，带来了更高的准确率、更强的信心和更受用户青睐的评价；参与者认为第二条线强化了方向线索。与水平运动相比，垂直运动被认为更直观，这也将早期发现 [22] 扩展到了移动情境。

总的来说，这些结果与先前的研究相一致，后者表明电触觉反馈在运动过程中具有稳健性，例如骑行时基于手腕的导航 [3], , 并进一步证明指尖是实现高分辨率电触觉反馈的有效部位 [36]。通过评估静止和行走条件下的动态时空模式，本研究拓展了现有研究，并凸显了基于指尖的电触觉反馈在可穿戴设备和导航应用中的潜力。基于两项研究的发现，我们得出结论：面向移动情境的电触觉导航系统应优先采用简单的线性模式，例如单线和双线，而非方框图案等复杂形状，以确保更高的识别准确率。设计者应利用双线等强化模式，提高运动过程中的感知清晰度和用户信心。此外，应尽量精简模式和方向的组合，以降低认知负荷，并确保行走时能够稳定地解读信息。

4.1 局限性与未来工作

本研究在受控的室内环境中开展，样本量相对较小，这可能会限制研究结果对更复杂现实场景的普适性。此外，尽管模式简化提高了行走时的识别率，未来研究仍应进一步探索如何让对角线模式和更复杂的模式更易于感知。

所提出方法的一项关键优势是能够提供非视觉、非听觉引导，从而减少对移动导航过程中常常负荷过重的感官通道的依赖。尽管研究纳入了行走条件，但任务主要关注模式识别，而非真实的导航。现实世界中的导航通常还涉及额外的认知需求，例如避障、路线规划和环境干扰，这些因素可能会影响用户感知和理解触觉提示的能力。因此，目前的研究结果可能高估了该方法在日常环境中的表现。未来工作应在更具生态效度的寻路场景中（例如存在竞争性注意力需求的室内或室外路线）评估该技术，以更好地衡量其在真实环境中的有效性。

5 结论

本研究考察了静止和行走条件下用户对指尖动态电触觉模式的感知情况。两项研究均表明，简单的线性模式始终优于更复杂的形状，其中双线模式的准确率最高、响应速度最快，且用户信心更强。重要的是，行走过程中电触觉提示仍然易于理解，展现出其在移动状态下的稳健性。这些发现表明，指尖是提供定向电触觉反馈的有效部位，并支持在可穿戴与移动导航应用中采用简单且强化的模式。

参考文献

[1] M. Ercan Altinsoy 和 Sebastian Merchel。2012。用于带触摸屏手持设备的电触觉反馈与粗糙感模拟。*IEEE*触觉学汇刊 5, 1 2012 6 13 10 1109 2011 56 ( ), –。[2] 2017 doi：。/TOH.。Shaona Cheng 和 Dingguo Zhang。。用于电触觉刺激的可穿戴臂带“iFeel”。载于*2017*年第*10*届国际人机系统交互会议 *(HSI)*。120 124 10 1109 2017 8005012 –。doi：。/HSI。。Tim [3] Duente、Dennis Stanke、Moritz Klose、Benjamin Simon、Ibraheem Al-Azzawi 和 Michael Rohs。2024。带我去感受：作为骑行者导航辅助工具的智能手表下方定向电触觉反馈。*ACM*人机交互会议论文集 8, 274 2024 25 10 1145 3676521 MHCI，文章（9月），[4] 页码。doi：。/ Sandra G. Hart 和 Lowell E. Staveland。。NASA任务负荷指数（任务负荷指数）的制定：实证与理论研究结果。载于人类心理工作负荷，Peter A. Hancock 和 Najmedin Meshkati（编）。心理学进展，第52卷。北荷兰出版社，139–183。1988 doi:10.1016/S0166-4115(08)62386-9[5] Tomohisa Hirano、Junichi Kanebako、MHD Yamen Saraiji、Roshan Lalintha Peiris 和 Kouta Minamizawa。2019。同步跑步：通过触觉共享为盲人马拉松领跑员提供的跑步支持系统。载于*2019*年*IEEE*世界触觉会议 *(WHC)*。25–30。doi:10.1109/WHC.2019.8816134[6] Chutian Jiang、Yinan Fan、Junan Xie、Emily Kuang、Kaihao Zhang 和 Mingming Fan。2024。设计用于指尖边缘的隐蔽式调制电触觉反馈，帮助盲人及低视力（BLV）人士理解图表。载于*2024*年*CHI*计算系统人因大会论文集 （美国夏威夷州檀香山）（*CHI '24*）。计算机协会，纽约，美国，文章 425, 20 10 1145 3613904 3642546 页码。doi：。/。Arata [7] 2023 Jingu、Yudai Tanaka 和 Pedro Lopes。。LipIO：让嘴唇兼作输入和输出界面。载于*2023*年*CHI*计算系统人因大会论文集 （德国汉堡）（*CHI '23*）。计算机协会，纽约，美国，文章695，共14页。doi:10.1145/ 3544548.3580775

[8] K .A. Kaczmarek, J .G. Webster, P . Bach-y Rita和W J. Tompkins . 1991. 电触觉 - 触觉与振动触觉显示器，用于感觉替代系统。*IEEE*生物医学工程汇刊 38, 1 1991 1 16 10 1109 10 68204 ( ), – . doi: . / .

[9] Hiroyuki Kajimoto. . 2012. 采用脉宽调制的实时阻抗反馈电触觉显示器。*EEE*触觉汇刊 5, 2 (2012年1月), 184–188. doi:10.1109/TOH.2011.39[10] Hiroyuki Kajimoto. 2021. 指尖电触觉显示套件. 载于*2021*年*IEEE*世界触觉会议 *(WHC)*. 587–587. doi:10.1109/WHC49131.2021.9517192[11] Panagiotis Kourtesis、Ferran Argelaguet、Sebastian Vizcay、Maud Marchal与Claudio Pacchierotti. 2022. 手部与手臂交互的电触觉反馈应用：系统综述、荟萃分析与未来方向。*EEE*触觉汇刊 15, 3 2022 479 496 10 1109 2022 3189866 (7月), –. [12] doi: . /TOH. . V. Krishna、Jeonghee Kim、Shuo-Hsiu Chang、Yoonsuck Choe与Hangue Park. 2024. 基于比例摇摆的电触觉反馈改善侧向站立平衡。《神经科学前沿》 18 (2024年3月), 1249783. doi:10.3389/fnins.2024.1249783[13] Hongnan Lin、Xuanyou Liu、Shengsheng Jiang、Qi Wang、Ye Tao、Guanyun Wang、Wei Sun、Teng Han与Feng Tian. 2024. TacTex：一种无缝集成电极、用于高分辨率电触觉刺激的纺织品界面。载于*2024*年*CHI*计算系统人因大会论文集 (美国夏威夷州檀香山) *(CHI '24)*. 计算机协会, 美国纽约州纽约, 文章编号427, 16页. doi:10.1145/3613904.3642873[14] Yanlin Luo、Jianfeng Sun、Qixuan Zeng、Xiaofang Zhang、Liming Tan、Ai Chen、Hengyu Guo与Xue Wang. 2023. 基于摩擦纳米发电机与自激静电致动器的可编程失明辅助触觉反馈系统。《纳米能源》 111 (2023), 108425. doi:10.1016/j.nanoen.2023. 108425[15] Rezylle Milallos、Tae Oh与Roshan L. Peiris. 2024. 探索电触觉反馈用于盲人和视障用户数据可视化的有效性。载于《人机交互中的普遍访问》, Margherita Antona与Constantine Stephanidis (编). 施普林格·自然瑞士, 查姆, 413–428. [16] Dinmukhammed Mukashev、Nimesha Ranasinghe与Aditya Shekhar Nittala. 2023. TactTongue：在舌头上进行电触觉刺激原型设计。载于第*36*届*ACM*用户界面软件与技术研讨会论文集 (美国加利福尼亚州旧金山) *(UIST '23)*. 计算机协会, 美国纽约州纽约, 文章编号105, 14页. doi:10.1145/3586183. 3606829[17] Hiroyuki Okabe、Shogo Fukushima、Michi Sato与Hiroyuki Kajimoto. 2011. 基于电皮肤显示器的指尖滑动错觉。载于国际人工现实与远程存在会议. 10–14. [18] Daniel Sutopo Pamungkas与Arjon Turnip. 2019. 面向触觉多媒体手指运动学习系统的电触觉提示。载于*2019*年可持续工程与创意计算国际会议 *(ICSECC)*. 127–132. doi:10.1109/ICSECC.2019.8906989[19] Roshan Lalitha Peiris、Yuan-Ling Feng、Liwei Chan与Kouta Minamizawa. 2019. ThermalBracelet：探索手腕周围的热触觉反馈。载于*2019*年*CHI*计算系统人因大会论文集 (英国苏格兰格拉斯哥) *(CHI '19)*. 计算机协会, 美国纽约州纽约, 1 11 10 1145 3290605 3300400 – . doi: . / . [20] Roshan Lalintha Peiris、Wei Peng、Zikun Chen与Kouta Minamizawa. 2017. 探索利用前额热触觉反馈定位空间提示的提示方法。载于*2017*年*IEEE*世界触觉会议 *(WHC)*. 400–405. doi:10.1109/WHC.2017.7989935[21] Praneeth Bimsara Perera、Hansa Marasinghe、Taiki Takami、Hiroyuki Kajimoto与Anusha Withana. 2024. 在3D打印触觉界面中集成力感测与电触觉反馈。载于*2024*年*ACM*可穿戴计算国际研讨会论文集 (澳大利亚维多利亚州墨尔本) *(ISWC '24)*. 计算机协会, 美国纽约州纽约, 48–54. doi:10.1145/3675095.3676612[22] Mehdi Rahimi、Fang Jiang、Cang Ye与Yantao Shen. 2019. 使用指尖式电触觉显示阵列进行动态时空模式识别与分析。载于*2019*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议 *(IROS)* (中国澳门). IEEE出版社, 8132–8137. doi:10.1109/IROS40897. 2019.8967906[23] Stefanie Schaack、George Chernyshov、Kirill Ragozin、Benjamin Tag、Roshan Peiris与Kai Kunze. 2019. 触觉项圈：用于引导应用的颈部周围振动触觉反馈。载于*2019*年第*10*届增强人类国际会议论文集 (法国兰斯) *(AH2019)*. 计算机协会, 美国纽约州纽约, 文章编号 12, 4 10 1145 3311823 3311840 页. doi: . / . [24] Ahmed W Shehata、Erik J Scheme与Jonathon W Sensinger. 2018. 听觉反馈改善肌电假肢控制的内部模型强度与表现。《科学报告》 8, 1 (2018年6月), 8541.[25] Yuxiang Shi、Fan Wang、Jingwen Tian、Shuyao Li、Engang Fu、Jinhui Nie、Rui Lei、Yafei Ding、Xiangyu Chen与Zhong Lin Wang. 2021. 用于虚拟触觉体验的自供电电触觉系统。《科学进展》 7, 6 (2021), eabe2943. arXiv:https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.abe2943 doi:10.1126/sciadv.abe2943

[26] Benjamin Simon、Dennis Stanke 和 Michael Rohs。2025。Funnelectro：前臂上的电触觉汇聚错觉与定位性能。载于第*24*届国际移动与泛在多媒体会议论文集（*MUM '25*）。计算机协会，纽约，美国纽约州，78–89。doi:10.1145/3771882.3771890[27] David W Sparks。1979。沿线性多刺激器阵列识别皮肤电刺激方向。知觉与心理物理学 25，2（1979），80–87。[28] 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*世界触觉会议（*WHC*）。361–367。doi:10.1109/ WHC56415.2023.10224481[29] Yudai Tanaka、Alan Shen、Andy Kong 和 Pedro Lopes。2023。在不遮挡手掌侧的情况下展示全手电触觉反馈。载于*2023*年*CHI*计算机系统中的人为因素会议扩展摘要（德国汉堡）（*CHI EA '23*）。计算机协会，纽约，美国纽约州，文章 435, 5 10 1145 3544549 3583919 页码。doi: . / . [30] Jo-Hsi Tang、Giuseppe Raffa 和 Liwei Chan。2020。。用于三维空间引导的手腕振动触觉方向反馈设计。载于跨文化设计：产品、服务与智能环境的用户体验，Pei-Luen Patrick Rau（编）。施普林格国际出版，查姆，169–182。[31] Mayuko Tezuka、Norihide Kitamura、Kohei Tanaka 和 Norihisa Miki。2016。使用微针电触觉显示器呈现各种触觉感受。*PLOS ONE* 11, 2 02 2016 1 14 10 1371 0148410 ( )，– 。[32] doi: . /journal.pone。Jonathan Tirado、Vladislav Panov、Vibol Yem、Dzmitry Tsetserukou 和 Hiroyuki Kajimoto。2020。ElectroAR：用于触觉传递的分布式电触觉刺激。载于触觉：科学、技术与应用：第*12*届国际会议 *EuroHaptics 2020*，荷兰莱顿，*2020*年*9*月*6*日至*9*日，论文集（荷兰莱顿）。施普林格出版社，柏林，海德堡，442–450。doi: 10 1007 978 3 030 58147 3_49 . / - - - - Keigo Ushiyama 和 Pedro Lopes。[33] 2023。FeetThrough：保留真实世界感觉的足部电触觉界面。载于第*36*届*ACM*用户界面软件与技术研讨会论文集（美国加利福尼亚州旧金山）（*UIST '23*）。计算机协会，纽约，美国纽约州，文章10，11页。doi:10.1145/3586183.3606808[34] Sebastian Vizcay、Panagiotis Kourtesis、Ferran Argelaguet、Claudio Pacchierotti 和 Maud Marchal。2021。用于增强虚拟现实中接触信息的电触觉反馈。*arXiv*预印本 *arXiv:2102.00259*（2021）。[35] Sebastian Vizcay、Panagiotis Kourtesis、Ferran Argelaguet、Claudio Pacchierotti 和 Maud Marchal。2023。用于增强虚拟现实中接触信息的可穿戴电触觉界面的设计、评估与校准。计算机图形学 111, 2023 199 212 10 1016 2023 01 013 C（4月），– 。doi: . / . [36] j.cag. . . Anusha Withana、Daniel Groeger 和 Jürgen Steimle。2018。。Tacttoo：用于皮肤触觉输出的轻薄、可感知触摸的纹身。载于第*31*届*ACM*用户界面软件与技术研讨会论文集（德国柏林）（*UIST '18*）。计算机协会，纽约，美国纽约州，365–378。doi:10.1145/3242587.3242645[37] Kuanming Yao、Jingkun Zhou、Qingyun Huang、Mengge Wu、Chun Yiu、Jian Li、Xingcan Huang、Dengfeng Li、Su Su、Senlin Hou、Yiming Liu、Ya Huang、Ziyan Tian、Jiyu Li、Hu Li、Binbin Zhang、Jingyi Zhu、Tsz Wong 和 Xinge Yu。2022。通过皮肤集成无线触觉接口编码手部触觉信息。自然·机器智能 4（2022年10月），1–11。doi:10.1038/s42256-022-00543-y