arXiv:2601.04596v1 [cs.HC] 8 Jan 2026

# 感受临场感：触觉对基于虚拟现实的人机交互的影响

Xinyan Yu[1], Marius Hoggenm¨uller[1],Tram Thi Minh Tran[1] and Martin Tomitsch[2]

**摘要—虚拟现实（VR）凭借能够实现快速、灵活的原型设计，已日益广泛地用作人机交互（HRI）研究的仿真工具。尽管研究者努力提高虚拟现实研究的效度，但作为感知的重要感觉模态、提升虚拟现实真实感的关键因素，触觉却常常缺席于这些实验。我们以机器人互动求助场景为研究对象，采用配备触觉手套的虚拟现实仿真系统；这些手套能够提供高度逼真的触觉和力反馈，用以考察触觉对基于虚拟现实的人机交互的影响。我们将参与者的临场感及其对机器人的评价，与采用传统手持控制器的设置进行了比较。结果表明，触觉增强了参与者在虚拟现实中的社交临场感和自我临场感，并促成了更多样、更自然的身体参与。此外，触觉显著影响了参与者对机器人的情感相关感知。本研究为人机交互研究者提供了见解，帮助他们构建更契合研究情境与目标的虚拟现实仿真。**

## 一、引言

将机器人融入日常生活，需要开发有效的交互策略，这也要求采用恰当的方法进行原型设计和评估 [1], [2], [3]。然而，与真实机器人进行原型设计和评估交互面临诸多挑战，包括开发成本高、参与者可能面临风险，以及难以复现真实世界的情境。为应对这些挑战，研究人员日益借助虚拟现实（VR）作为原型设计工具，在受控实验室环境中模拟人机交互（HRI） [4], [5], [6]。

尽管虚拟现实研究具有潜力，但确保研究效度对于获得可靠且可应用于真实世界的结果至关重要 [7]。当前用于人机交互实验的仿真方法力求重现逼真的视觉和听觉体验 [6], ，但触觉——最重要的感官模态之一，能够增强感知 [8] 并提升虚拟现实真实感 [9]——往往缺失于体验之中。在大多数人机交互研究中，即使测试的是基于接触的身体交互策略，研究设置通常也依赖手持控制器或手部追踪来实现这些交互 [10], [11], ，却无法让参与者在模拟与机器人进行具身交互时体验触觉和力反馈。

研究表明，触觉在塑造人们于社交互动中 [12], [13], 与虚拟现实中的虚拟人类化身互动的行为方式方面发挥着至关重要的作用 [14],

[1]悉尼大学悉尼建筑、设计与规划学院 Design Lab，澳大利亚 通讯作者：xinyan.yu@sydney.edu.au[2] 悉尼科技大学跨学科学院，澳大利亚

[15], [16], [17] (例如，影响人际距离行为 [15],增强情感投入 [16], [18])。然而，由于能动性、具身性和社交预期方面的差异，与机器人的互动与和人类的互动存在根本区别 [19]。因此，触觉如何影响人们对机器人的感知，以及他们在虚拟现实中与机器人互动的方式，仍然未知。除社会感知与互动之外，缺乏逼真的触觉仿真也会极大限制虚拟现实在评估产品可用性和用户体验方面的效果 [20]。这进一步凸显了研究复现触觉感受对人们在基于虚拟现实的研究中评估机器人的影响的重要性。

触觉技术的进步，使人们能够直接触摸和操控虚拟现实中的计算机生成物体，营造出令人信服的触觉真实感 [21], [22], [23]。HaptX 手套[1] 等工业级工具可借助微流控技术提供高质量的触觉反馈，模拟力反馈（例如硬度、重量和阻力）及触觉反馈（例如质地、光滑度和摩擦力），从而增强虚拟交互的真实感。HaptX 手套已集成到大众汽车的车辆设计与培训虚拟现实平台中，以支持车内原型设计和评估 [24]。此外，种类日益丰富、价格亲民的商用智能手套也让研究人员能够更便捷地使用触觉技术 [22]。

基于这些进展，我们将 HaptX 手套融入虚拟现实设置，探索高度逼真的触觉反馈在增强基于虚拟现实的人机交互实验方面的潜力，使参与者能够与机器人的虚拟呈现及其周围环境进行身体互动。为考察使用触觉手套进行触觉仿真对参与者临场感以及他们对机器人的评估所产生的影响，我们重复了此前开展的一项机器人求助研究 [25]。在本文介绍的重复研究中，我们比较了两种设置：一种是触觉手套设置，可为参与者提供触觉和力反馈，并允许他们直接用手与虚拟机器人互动；另一种是最初采用手持控制器进行互动的设置。我们的工作作出以下贡献：（1）我们提出了一种融入高度逼真触觉手套的基于虚拟现实的人机交互研究设置，使参与者能够在与虚拟机器人进行身体互动时感受到触觉；（2）我们提供实证证据，说明这种设置如何影响参与者的临场感、身体参与和对

[1]https://haptx.com/

机器人的情感感知，并为开展基于虚拟现实的人机交互研究的研究人员提供实践指导。

## II. 相关工作

### A. 虚拟现实作为人机交互的原型设计工具

虚拟现实作为人机交互的原型设计工具，已展现出有效模拟现实世界人机交互的能力。例如，Villani 等人 [26]发现，在人机协作任务情境下，将与真实机器人进行的交互与在虚拟现实中的交互进行比较时，两者在任务表现和评估方面的结果具有可比性。同样，Sadka 等人 [27] 观察到，在虚拟现实中对非人形机器人的手势进行的社交解读与现实世界中的情况十分相似。

然而，与现实世界的情境相比，参与者在虚拟现实中与机器人交互及评估机器人的方式仍存在显著差异。例如，Wijnen 等人 [7] 在虚拟现实中复现了 Kahn 等人 [28]关于人们对机器人和人类导游保守秘密行为的研究。复现实验的虚拟现实研究发现，参与者更倾向于向非社交型机器人保守秘密，这与原始研究的结果相矛盾。在一项人机协作建造任务研究中，Higgins 等人 [11] 报告称，参与者每次尝试完成任务所需的时间在虚拟现实中都显著更长。尽管该研究并未直接考察触觉的影响，但作者将表现差异归因于虚拟现实中深度知觉方面的困难，而触觉在这种知觉中发挥着关键作用 [29]。尽管人们已认识到触觉对于增强虚拟现实真实感的重要性，但基于虚拟现实的人机交互研究，即使是涉及接触式交互的研究，也依赖手持控制器或手部追踪 [10], [11] 作为参与者的交互方式，从而限制了参与者体验虚拟机器人所提供的触觉和力反馈。然而，关于支持真实触觉感受的虚拟现实设置如何影响参与者在基于虚拟现实的人机交互研究中的行为及其对机器人的评估，目前仍缺乏足够研究。

### B. 触觉技术在虚拟现实中的重要性

触觉对于增强虚拟现实环境中的沉浸感和真实感至关重要 [30], [31]。为了实现触摸交互，人们开发了各种设备来模拟触觉感受，使用户在与虚拟物体互动时能够感知触觉和力反馈，其中大多数设备都将手部作为主要交互方式 [32], [33], [34]。将触觉反馈融入虚拟现实模拟已被证明能在多个领域带来益处，包括提升虚拟现实外科训练中的表现 [35], 、提高绘画等精细操作任务的精度 [36], 、缩短投掷和堆叠等任务的执行时间 [37], ，或改善对机器人的远程操控 [38], [39]。除了任务表现之外，研究还表明，触觉反馈会影响虚拟现实中的社交互动，进而影响人们与虚拟人类化身的互动方式 [14], [15], [40], [17], [16]。例如，Jeremy 等人 [15] 发现，与现实世界相比，参与者在虚拟现实中会与虚拟化身保持更远的人际距离互动，这是因为与虚拟表征之间缺乏触觉接触。研究还表明，在共享虚拟环境中与另一人类化身互动时，触觉能够增强社会临场感 [17]。虽然这些研究关注的是任务表现，或与代表另一人的虚拟化身之间的互动，但鉴于虚拟机器人具有独特的能动性、具身性和社交预期 [19],, 触觉对人们感知虚拟机器人并与之互动时行为的影响仍不得而知。

### C. 基于虚拟现实的原型设计与评估中的触觉

虚拟现实已被广泛用作原型设计工具，用于研究人们与机器人 [4], 自动驾驶汽车 [5], [6] 和智能设备 [41], 等交互式系统之间的交互，从而降低开发与评估过程中的复杂性、成本和风险。先前研究表明，触觉在促进基于虚拟现实的原型设计与评估中有效开展评估方面发挥着关键作用。Sch¨olkopf 等人 [42]指出，缺少触觉反馈会严重降低用户体验评分，凸显了触觉对于在虚拟现实中进行有意义的用户体验评估的重要性。同样，Stamer 等人 [24] 研究了用户车内体验评估中的高保真触觉反馈，发现与缺少触觉反馈相比，参与者在有触觉反馈时能够显著更快、更准确地识别交互。尽管这些研究证明了逼真触觉仿真在采用传统用户界面的基于虚拟现实的原型设计中的价值，但其在支持评估具身于身体和社交层面的机器人方面的作用，仍鲜有探索。

## III. 方法

### A. 研究设计

本研究复现了我们先前关于受困城市机器人如何向旁观者求助的研究 [25]。在保留原研究相同研究流程和数据收集方法的基础上，我们将原实验设置中的手持控制器替换为触觉手套，以探究触觉仿真的影响。交互设备（即手持控制器或触觉手套）构成被试间因素，也是本文研究的主要重点。为确保与原研究在方法上的一致性，每组参与者均体验了多种机器人求助方式（即语音、情绪表达和游戏化求助，见图 1），构成被试内因素。对于语音求助，机器人会发出语音提示，例如“请帮我按一下交通信号灯按钮，我要迟到了。”对于情绪求助，机器人会呈现悲伤的面部表情。对于游戏化求助，机器人使用受游戏启发的交互式地面投影来引发助人行为[2]。虽然这些被试内条件并非本研究的主要关注点，但纳入这些条件可确保本研究与原研究的设计和范围保持一致。

[2]关于这些求助方法的更多详情，请参阅原始研究 [25]。

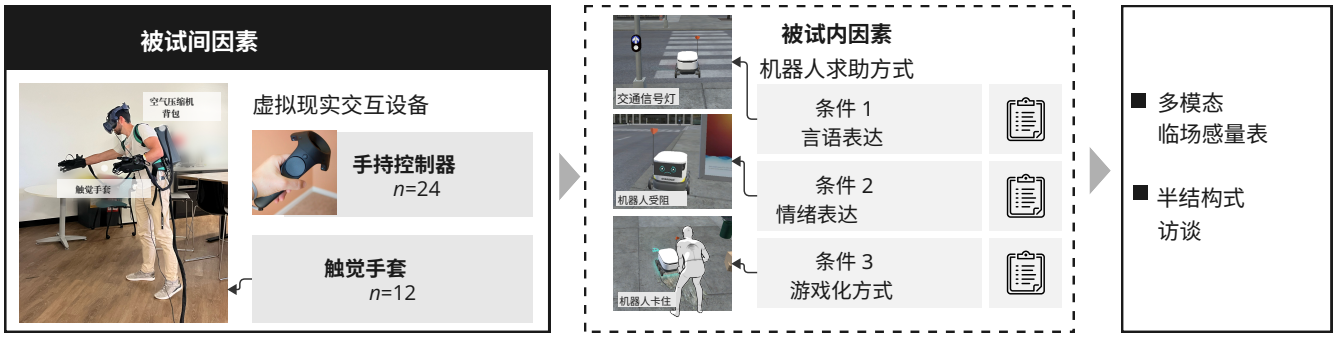


图 1. 研究设计

原始研究中的 24 名参与者组成了手持控制器 组（A1-A24，年龄为 18 至 74 岁，其中大多数（n=17）年龄在 25 至 34 岁之间）；另有 12 名参与者使用触觉手套完成了我们的研究，组成触觉手套组（B1-B12，年龄为 18 至 34 岁，其中大多数（n=8）同样年龄在 25 至 34 岁之间。由于本研究的重点是组间效应，而非比较不同的求助方法，因此将求助方法作为重复测量，从而以较小的样本量达到足够的统计功效。

### *B.* 研究程序

参与者抵达后，研究人员简要介绍了研究背景和流程，随后说明了虚拟现实设备的使用方法。实验开始前，参与者先进行熟悉练习，使用手持控制器或触觉手套在虚拟现实中练习行走及与虚拟物体互动（例如，推动带轮子的架子）。实验期间，参与者按照原研究的相同流程，依次体验三种被试内条件：机器人的求助方式分别为语音、情绪表达和游戏化求助，顺序经过平衡安排。研究在虚拟城市环境中进行，机器人会向随机遇到的行人寻求帮助。参与者在三个场景中多次体验每种机器人的求助方式（见图 1）：机器人受阻，机器人被挡住，需要参与者让开；交通信号灯，机器人需要参与者为其按下交通信号灯按钮；以及机器人卡住，机器人动弹不得，需要参与者帮助它脱困。参与者事先并未获知机器人有求助意图，并被要求根据机器人的提示自然回应。每种求助条件结束后，参与者取下头戴设备，填写若干标准化问卷，以评估他们对机器人的感知。完成所有试次后，他们还填写了一份关于虚拟现实临场感的补充问卷。此外，我们还进行了研究后的半结构化访谈，以深入了解参与者的体验。每次实验约需 60 分钟。

### *C.* 研究装置与实施

虚拟现实模拟环境使用 Unity3D[3] 开发，并部署在 HTC Vive 头戴设备[4]上。实验在一处 5×5 米的开放场地进行，参与者可以在模拟的城市空间中实际行走。原研究中的参与者使用 HTC Vive 默认控制器，而我们 *HaptX* 手套组的参与者则直接使用 HaptX 手套与虚拟环境互动（见图 1）。本研究使用的 HaptX 手套通过微流体致动器，为手指和手掌提供高保真触觉反馈。致动器通过充气和放气产生局部压力，从而模拟虚拟物体的纹理细节。手套还通过机械阻力系统提供力反馈，该系统限制手指运动，以呈现不同程度的刚度，使参与者能够感知虚拟现实中物体的重量和坚硬程度。HaptX 系统采用压缩空气驱动装置，由一个约重 9 千克的空气压缩机背包和一副手套组成（见图 1 左侧）。背包通过气动管路输送压缩空气，驱动手套中的致动器提供实时触觉反馈。参与者穿戴背包和手套后，便能直接用手操纵虚拟物体，并感受到仿佛触碰实体物体般的触感。这套装置支持参与者与其可触及范围内的所有虚拟现实物体进行逼真的互动，包括机器人（例如推机器人）和环境元素（例如按下交通信号灯按钮）。

### *D.* 数据收集

临场感：使用与原研究相同的多模态临场感量表（MPS） [43] 评估参与者在虚拟现实中的临场感，该量表涵盖三个维度：身体临场感、社交临场感和自我临场感。

对机器人的感知：为考察触觉感受如何影响参与者对虚拟现实中机器人的评价，我们依据原研究，从多个维度评估了他们的感知。机器人社会属性量表（RoSAS） [44]评估了参与者对机器人的感知，包括温暖感、能力和不适感。

[3]https://unity.com/ [4] https://www.vive.com/

系统接受度量表 [45]测量了参与者对机器人的接受度，而Godspeed问卷 [46]中的可喜爱性分量表则评估了感知到的可喜爱性。信任通过信任量表 [47],进行测量，该量表由两个分量表组成：认知信任和情感信任。最后，用户体验问卷（UEQ-S）简版 [48]捕捉了参与者的整体用户体验。所有测量均采用7点李克特量表。

定性数据：我们记录了研究期间参与者的行为观察笔记。此外，在参与者完成所有实验任务后，我们对其进行了半结构化访谈，询问了他们在虚拟现实中的整体体验以及对机器人的感知。

### *E.* 数据分析

定量分析：我们首先通过计算 Cronbach α系数，评估所有多题项量表的内部可靠性。对于 MPS，身体临场感表现出可接受的可靠性（$\alpha = 0.747$），自我临场感表现出极佳的可靠性（$\alpha = 0.892$）。社会临场感分量表的可靠性存在疑问（$\alpha = 0.674$）。根据 [49]，中关于 Cronbach α系数的建议，我们移除了相关性低于 0.25 的题项，以用于后续分析，从而将可靠性提升至可接受水平（$\alpha = 0.710$）。可喜爱性量表的可靠性极佳（$\alpha$=0.923）。信任量表显示，情感信任的可靠性极佳（$\alpha$=0.930），认知信任的可靠性良好（$\alpha$=0.823）。系统接受度量表的可靠性良好（$\alpha$=0.887）。对于 RoSAS，能力和温暖感的可靠性分别为良好（$\alpha$=0.867）和极佳（$\alpha$=0.900），而不适感的可靠性为可接受水平（$\alpha$=0.761）。最后，UEQ-S 量表显示，实用性质量的可靠性良好（$\alpha$=0.806），享乐质量的可靠性极佳（$\alpha$=0.904）。

为比较组别（手持控制器与触觉手套）之间的临场感，我们针对每个MPS分量表进行了独立样本t检验。鉴于组别间样本量不等，我们使用Levene检验评估方差齐性。当方差齐性不成立（p ¡ 0.05）时，则采用Welch t 检验以应对方差异质性。此外，我们计算了效应量（Cohen's $d$），以了解组别差异的实际意义。

对于参与者对机器人的评估，我们采用线性混合模型（LMM），以处理被试内因素（条件，即机器人寻求帮助的方式）中的重复测量。被试间因素（组别，即手持控制器与触觉手套）被设定为主要关注的固定效应。我们纳入组别与条件之间的交互效应，以考察条件的影响是否因组别而异。我们将参与者作为随机效应，以控制个体间差异。LMM计算了固定效应的估计边际均值，同时考虑了样本量不均等的情况，并使用复合对称协方差结构对重复测量之间的相关性进行建模。我们计算了效应量（Cohen's $d$），以评估实际显著性。

访谈：我们采用归纳式语义分析 [50] ，识别参与者评论中的模式，以补充我们对定量结果的理解。第一作者对访谈内容进行了转录和分析。

## IV. 结果

本节首先介绍对参与者行为的观察及相关访谈评论。随后，我们呈现组别之间临场感的差异，并结合访谈见解对结果加以阐释。最后，我们报告参与者对机器人的评价的统计结果，包括组别主效应和交互效应。

### *A.* 总体观察

机器人在两组中的受助率相近。在触觉手套 组（3 × 3 × 12 次试验）中，有104次试验（96.3%）提供了帮助。在手持控制器组（3 × 3 × 24 次试验）中，有209次试验（96.8%）提供了帮助。尽管参与者做出帮助决定的情况相近，但研究期间，触觉手套组的参与者表现出更加自然且多样的全身参与行为，包括用手拍打机器人（n=4）、用脚与机器人互动（n=3）、拖拽机器人的旗杆（n=2），或与机器人击掌（n=1）。相比之下，在手持控制器 组中，这些自发且多样的身体参与行为很少出现，仅观察到一次拍打机器人的情况。

研究后的访谈揭示了这些行为差异。五名参与者将其更频繁且多样的身体参与归因于不存在控制器限制，并提及他们此前在其他虚拟现实环境中使用手持控制器的经历。他们指出，触觉手套无需手持控制器即可实现徒手交互，从而能够进行更加直接、自然且与现实生活中的互动更为接近的动作。B5和B9表示，如果使用手持控制器，他们不会做出此类动作，并明确提到了这一限制，解释说手持控制器限制了他们进行这些互动的能力："我觉得我不会（和机器人击掌），因为我做不到。使用控制器时，你必须一直拿着它"（B9）。相比之下，B2将其行为特别归因于机器人在虚拟现实中的触感增强，这得益于触觉手套提供的触觉和力反馈。这增强了机器人的身体临场感，也使参与者投入了更多情感，最终促使B2在机器人没有回应时踢了它。

此外，由于沉浸感较强，B2 和 B4 表现出更强的全身参与感，B2 将其描述为"我的整个身体都被激活了"。相比之下，手持控制器组的 A8 和 A11 表示想用脚与机器人互动（例如帮它脱困），但由于不确定这样的行为是否

“被允许。”此外，手持控制器组的六名参与者报告了在虚拟现实中进行距离感知时遇到困难，而触觉手套组仅有一人提及这一挑战。这一局限可能妨碍了手持控制器组的参与者进行更多具身探索行为。

### *B.* 临场感

*MPS*：描述性分析结果表明，与手持控制器组相比，触觉手套组的参与者在所有分量表上的临场感均较高（见图2）。独立样本 t 检验显示，两组在身体临场感方面没有显著差异（$t(34) = -1.662,\ p = 0.106$），但触觉手套组在社会临场感（$t(34) = -3.601,\ p < 0.001$）和自我临场感（ $t(34) = -2.094,\ p = 0.044$）方面的得分显著更高。社会临场感的效应量（Cohen’s $d = 0.86$）和自我临场感的效应量（ $d = 1.13$ ）均表明效应较大，这说明尽管两组样本量不相等，观察到的差异在实践中仍具有重要意义。

定性反馈：触觉手套组的所有参与者都认为，触觉反馈增强了他们的临场感；其中八人指出，触觉体验与现实世界之间不可避免地存在差异，例如手套无法模拟触摸物体时的摩擦力，以及推动机器人时的力阻抗不足，因而无法准确反映机器人在现实世界中的重量。此外，五位参与者指出，设备本身较重且通过线缆连接，限制了他们的行动自由。这些局限性或许导致两组在身体临场感方面未出现显著差异。

尽管存在这些局限性，四位参与者表示，与此前在没有触觉手套的虚拟现实体验相比，触觉手套所带来的自然交互让他们在虚拟场景中投入得更多。有些人将这种投入归因于使用触觉手套时需要付出更多实际的身体努力（n=2）。B2 还指出，由于这些感觉更接近现实生活，这种体验在情感上更能引发投入。相比之下，来自手持控制器组的 A2 将握着控制器推动机器人比作“使用魔法棒”，这表明与触觉手套体验相比，这种方式的投入度和严肃性较低。

访谈也反映出，能够通过身体感知机器人如何影响参与者对机器人临场感的感知。B4 指出，亲手触摸机器人让他“更加确信机器人确实存在”，并将其描述为“一个真实存在于我面前的东西。”相反，来自手持控制器组的 A2 和 A5 表示，缺乏触觉反馈让交互感觉像是“在推空气，”（A5），进而让他们意识到“机器人并不真实。”

《触觉手套》组的四位参与者指出，手套让他们感觉自己能更好地控制身体。B12 表示：“我可以控制我的手或我的身体。”B11 则描述道：“我的手和我的虚拟手合二为一了。”相比之下，手持控制器组的三位参与者表示，感觉自己的身体与虚拟身体彼此脱节，并称“那些手感觉真的不像是我的手。”（A18）。这些具身性体验上的差异，可能与《触觉手套》组观察到的较高自我临场感评分有关。

### *C.* 参与者对机器人的评估

可喜爱性：触觉手套组报告的可喜爱性得分高于手持控制器组，且均值差异显著（$M_{diff} = 0.814,\ SE = 0.259,\ p = .004$，95% 置信区间为 [0.287, 1.341]）（图2，右侧）。效应量（Cohen’s$d = 0.75$）表明实际效应为中到大。组别与条件的交互效应不显著，$F(2,\ 68) = 0.537,\ p = .587$，这表明不同条件下的可喜爱性得分差异在各组之间是一致的。

接受度：与手持控制器组相比，触觉手套组报告了更高的机器人平均接受度，但这一差异并不显著（$M_{diff} = 0.554,\ SE = 0.291,\ p = .067$，95% 置信区间为 $[-0.036, 1.144]$）。组别与条件的交互效应也不显著（$F(2,\ 68) = 0.416,\ p = .661$）。

信任：在情感信任方面，触觉手套组的评分高于手持控制器组，且均值差异显著（$M_{diff} = 1.011,\ SE = 0.485,\ p = .037$，95% CI $[0.064, 1.958]$）。效应量（Cohen’s $d = 0.67$）为中等。在认知信任方面，触觉手套组的评分也较高，但差异不显著（$M_{diff} = 0.623,\ SE = 0.375,\ p = .107$，95% CI$[-0.139, 1.385]$）。对于情感信任（$F(2,\ 68) = 0.627,\ p =$。537）和认知信任（$F(2,\ 68) = 1.850,\ p = .165$），组别 × 条件交互效应均不显著，表明不同条件下的信任评分差异在各组之间保持一致。

机器人社会属性：尽管触觉手套组的能力评分略高于手持控制器组，但差异不显著，$M_{diff} =$0.647, $SE = 0.309, p = .069$, 95% CI $[-0.024, 1.317]$。同样，触觉手套组的温暖度评分略高，但差异不显著（$M_{diff} =$0.613, $SE = 0.378, p = .119$, 95% CI $[-0.154,\ 1.380]$）。两组的不适感评分相近，组别的主效应不显著（$M_{diff} =$0.140, $SE = 0.257, p = .590$, 95% CI $[-0.380,\ 0.660]$）。在所有三个分量表中，均未发现显著的组别 ×条件交互效应：能力，$F(2, 68) =$ 0.592, $p = .556$；温暖感，$F(2, 68) = 0.236, p = .790$；不适感，$F(2, 68) = 0.238, p = .789$。

用户体验：与手持控制器组相比，触觉手套组的实用体验质量评分略高，但差异不显著（$M_{diff} = 0.451,\ SE = 0.341,\ p = .195$，95% CI$[-0.242, 1.144]$）。然而，触觉手套组的享乐体验质量显著更高（$M_{diff} =$

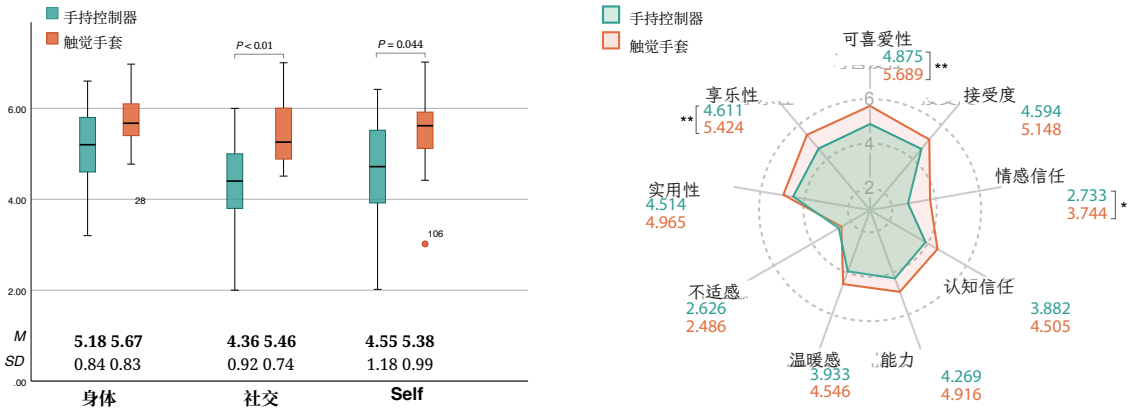


图2。定量结果。左：多模态临场感量表的箱线图（M：均值，SD：标准差）。右：参与者基于估计边际均值对机器人的评价（*：$p < 0.05$，**：$p < 0.01$，***：$p < 0.001$）。

0。813，$SE = 0.267$，$p = .004$，95% CI [0.275，1.351]），效应量为中到大（Cohen's $d = 0.75$）。在实用质量和享乐质量这两个分量表上，均未发现组别×条件的交互效应——实用质量：$F(2, 68) = 0.227$，$p = .798$；享乐质量：$F(2, 68) = 0.120$，$p = .887$。

## V. 讨论

### A. 触觉仿真促进自发的身体参与

我们的研究结果表明，在使用触觉手套开展基于虚拟现实的人机交互研究时，引入触觉交互能够显著增强参与者的自我临场感，即与其虚拟身体、情绪和身份产生联结的感觉 [51]。使用触觉设备的参与者表现出更加频繁且多样的自然身体参与，这进一步表明，增强的自我临场感能够促进超越任务导向行为的、更自然且更加丰富的身体交互。随着机器人从静态、受控的实验室环境逐渐进入日常环境 [52], [53], ，自发的身体参与在基于虚拟现实的人机交互研究中的重要性日益凸显；在这些环境中，交互对象不仅包括执行预定义任务的人类协作者，也包括普通旁观者。这一转变使人机交互变得更难以预测，也更加依赖具体情境并具有涌现性 [54], [55], ，凸显出基于虚拟现实的人机交互实验有必要超越精心设计的任务，转而在动态且情境多样的环境中捕捉自发交互。在此背景下，在虚拟现实中模拟触觉感受，对于营造更逼真的具身性感受发挥着关键作用，而这种具身性感受是有效研究这些涌现性人机交互所必需的。

### B. 触觉仿真对情感相关评估的重要性

在任何评估中，我们都未发现组别与条件之间存在显著的交互效应，这表明机器人求助方法之间观察到的差异是一致的，并且不受所使用的虚拟现实交互设备类型影响。相比之下，Voit等人 [41]的研究探讨了比较用于评估智能制品的研究方法，发现评估方法与所研究制品之间存在显著的交互效应，这表明当采用不同的评估方法时，制品比较结果可能存在矛盾。我们的研究中未出现交互效应，可能是因为加入触觉感受并未从根本上改变评估方法，因为该研究仍处于虚拟现实设置中。这验证了虚拟现实即使不加入触觉感受，也可作为人机交互实验中进行比较研究的可靠工具，确保无论是否加入触觉感受，概念比较结果都能保持一致。

然而，在与情感感知关系更密切的量表上，组别确实产生了主效应，包括可喜爱性和情感信任。能够与机器人进行直接身体互动，使这些情感维度的评估得分更高（见图2右侧）。这可能归因于两个因素。首先，我们的结果表明，使用触觉手套的参与者在虚拟现实中体验到了更强的社会临场感，即感到自己与他人共同存在于虚拟环境中 [56]。这与先前的研究一致：触觉反馈能够增强虚拟现实中与人类化身互动时的社会临场感 [17]。更强的社会临场感有助于促成真实而细腻的社交互动 [57]，并可能影响参与者对机器人的社会感知。其次，这也可能是因为触觉能够借助触觉手套实现逼真的身体接触，从而增强机器人所感知到的社会临场感；直接触摸会使人更强烈地感知到机器人具有社会意识且乐于互动 [58]，[51]。研究还表明，这种身体真实感会加强社交虚拟现实场景中的情感投入 [16]，可能使参与者以更真实的情感方式回应机器人，进而影响他们对机器人的情感评估。因此，在评估涉及直接身体接触的虚拟现实人机社交互动时，缺少触觉反馈可能会损害情感相关评估的效度。

### C. 局限性

我们的研究初步探索了如何将高度逼真的触觉仿真引入基于虚拟现实的人机交互研究；本研究的样本量相对较小，且组别分布不均。尽管进行了审慎的统计处理，这一局限仍可能影响研究结果的可推广性。其次，虽然我们比较了两种设备配置——触觉手套和手持控制器，但触觉的影响无法与其他设备差异完全分离，例如设备重量以及手部活动自由度的不同；后者可能会增强虚拟现实中的临场感和自然参与 [14], [15]。未来研究应考虑加入更多控制条件，以便更好地区分这些因素。最后，虽然我们的研究结果提供了有价值的见解，但本研究是在城市公共空间中的特定机器人求助场景下开展的。未来还需将这些研究扩展至范围更广的人机交互情境，纳入多样化的场景和交互实例。

## VI. 结论

通过比较使用手持控制器和触觉手套进行的基于虚拟现实的人机交互，我们发现，启用触觉后，自我临场感和社交临场感均有所增强。提供触觉（包括触觉反馈和力反馈）时，参与者与机器人的身体互动也表现得更加多样、自然。此外，触觉显著影响了参与者对机器人的情感相关感知。这些发现凸显了在基于虚拟现实的人机交互研究中融入触觉感受的重要性，尤其是在考察对机器人的自发反应，以及评估涉及直接身体接触的社交互动时。

## 参考文献


[1] S. N. Woods, M. L. Walters, K. L. Koay, and K. Dautenhahn, “人机交互中的方法学问题：在机器人接近人类的方向测试中，对现场方法与基于视频的方法进行比较”，载于*ROMAN 2006 - 第15届电气电子工程师学会机器人与人类交互通信国际研讨会*，2006年，第51–58页。[2] L. D. Riek，“人机交互中的绿野仙踪研究：系统综述与新的报告准则”，《人机交互杂志》，第1卷，第1期，第119–136页，2012年7月。[3] J. Zamfirescu-Pereira, D. Sirkin, D. Goedicke, R. LC, N. Fried- man, I. Mandel, N. Martelaro, and W. Ju，“以假乱真：人机交互中的探索性原型设计”，载于*2021年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集*，丛书：HRI ’21 Companion。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2021年，第19–28页。[4] N. Miner and S. Stansfield，“用于机器人控制和操作员培训的交互式虚拟现实仿真系统”，载于*1994年电气电子工程师学会机器人与自动化国际会议论文集*，1994年，第1428–1435页，第2卷。[5] S. Khastgir, S. Birrell, G. Dhadyalla, and P. Jennings，“用于汽车系统虚拟验证的驾驶员在环全沉浸式驾驶模拟器的开发”，载于*2015年电气电子工程师学会第81届车辆技术会议（春季）*，2015年，第1–4页。[6] M. Hoggenm¨uller, M. Tomitsch, L. Hespanhol, T. T. M. Tran, S. Worrall, and E. Nebot，“基于情境的界面原型设计：理解原型呈现方式对用户反馈的影响”，载于*2021年CHI人机交互系统中的人为因素会议论文集*，丛书：CHI ’21。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2021年。

[7] L. Wijnen、S. Lemaignan 和 P. Bremner，“探索利用虚拟现实复现人机交互研究”，载于《2020年ACM/IEEE人机交互国际会议伴会论文集》，丛书：HRI ’20。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2020年，第514–516页。[8] M. A. Srinivasan 和 C. Basdogan，“虚拟环境中的触觉技术：分类体系、研究现状与挑战”，《Computers & Graphics》，第21卷，第4期，第393–404页，1997年，虚拟环境中的触觉显示与韩国计算机图形学。[9] H. Hoffman，“通过触觉增强来实际触摸虚拟物体，可提升虚拟环境的真实感”，载于《论文集：IEEE 1998年虚拟现实年度国际研讨会（目录号98CB36180）》，1998年，第59–63页。[10] V. Ortenzi、M. Filipovica、D. Abdlkarim、T. Pardi、C. Takahashi、A. M. Wing、M. Di Luca 和 K. J. Kuchenbecker，“机器人，把工具递给我：手柄可见性有助于面向任务的交接”，载于《2022年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，丛书：HRI ’22。IEEE出版社，2022年，第256–264页。[11] P. Higgins、R. Barron、S. Lukin、D. Engel 和 C. Matuszek，“虚拟现实与现实中的协作建造任务”，载于《实验机器人学》，M. H. Ang Jr 和 O. Khatib 编。瑞士查姆：施普林格·自然瑞士，2024年，第11–21页。[12] E. Ebrahimi、S. V. Babu、C. C. Pagano 和 S. J¨org，“对真实和沉浸式虚拟环境中三维交互期间实体伸手行为的视觉-触觉反馈进行实证评估”，《ACM应用感知汇刊》，第13卷，第4期，2016年7月。[13] G. Jacucci、A. Bellucci、I. Ahmed 等，“虚拟现实中与智能体和虚拟化身进行社交互动时的触觉技术：系统综述”，《虚拟现实》，第28卷，第170页，2024年。[在线]。网址：https://doi.org/10 1007 10055 024 01060 6 。/s - - - L. Krogmeier、[14] C. Mousas 和 D. M. Whittinghill，“人与虚拟角色交互：探究触觉反馈的影响”，《计算机动画与虚拟世界》，第34卷，第5–6期，第e1883页，2023年。[在线]。网址：https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10 1002 1883 。/cav。J. N. [15] Bailenson、J. Blascovich、A. C. Beall 和 J. M. Loomis，“沉浸式虚拟环境中的人际距离”，《人格与社会心理学通报》，第29卷，第7期，第819–833页，2003年。[16] R. K. Venkatesan、D. Banakou、M. Slater 和 M. M.，“虚拟人群场景中的触觉反馈可增强情绪反应”，《虚拟现实前沿》，第4卷，2023年。[17] E. Giannopoulos、M. Slater、B. Spanlang、V. Caggiano 和 M. Avraamides，“触觉反馈对共享虚拟环境中基本社交互动的影响”，载于《触觉技术：感知、设备与场景》。欧洲触觉技术会议2008，丛书：《计算机科学讲义》，M. Ferre 编。施普林格，柏林、海德堡，2008年，第5024卷，第331–336页。[18] I. Ahmed、V. Harjunen、G. Jacucci、E. Hoggan、N. Ravaja 和 M. M. Spap´e，“伸手触碰我：四种不同触觉技术对虚拟现实中情感触摸的影响”，载于《第18届ACM多模态交互国际会议论文集》，丛书：ICMI ’16。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2016年，第341–348页。 [在线]。网址：https://doi.org/10 1145 2993148 2993171 。/ 。T. Fong、I. [19] Nourbakhsh 和 K. Dautenhahn，“社交型交互机器人的综述”，《机器人与自主系统》，第42卷，第3期，第143–166页，2003年，社交型交互机器人。[20] F. Bruno、F. Cosco、A. Angilica 和 M. Muzzupappa，“用于产品可用性评估的混合原型制作”，第3卷：第30届计算机与信息工程会议A、B部分，第1381–1390页，2010年8月。[21] M. Sreelakshmi 和 T. Subash，“触觉技术：应用与未来前景的综合综述”，《今日材料：会议录》，第4卷，第2期，B部分，第4182–4187页，2017年，计算、通信、纳米光子学、纳米科学、纳米材料与纳米技术国际会议。[22] M. Caeiro-Rodr´ıguez、I. Otero-Gonz´alez、F. A. Mikic-Fonte 和 M. Llamas-Nistal，“商用智能手套的系统综述：现状与应用”，《传感器》，第21卷，第8期，2021年。[23] M. Al-Sada、K. Jiang、S. Ranade、X. Piao、T. H¨oglund 和 T. Nakajima，“Hapticserpent：用于虚拟现实的可穿戴触觉反馈机器人”，载于《2018年CHI人机交互系统中的人为因素会议扩展摘要》，丛书：CHI EA ’18。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2018年，第1–6页。 [在线]。网址：https://doi.org/10.1145/3170427.3188518

[24] M. Stamer、J. Michaels 和 J. T¨umler，“研究虚拟现实中车内交互的触觉反馈益处”，载于《移动、交通与汽车系统中的人机交互：自动驾驶与车内体验设计》，H. Kr¨omker 编。瑞士查姆：施普林格国际出版，2020年，第404–416页。[25] X. Yu、M. Hoggenm¨uller 和 M. Tomitsch，“鼓励旁观者协助城市机器人：将趣味性机器人求助作为一种策略”，载于《2024年ACM交互系统设计会议论文集》，丛书：DIS ’24。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2024年，第2514–2529页。[26] V. Villani、B. Capelli 和 L. Sabattini，“利用虚拟现实评估复杂场景中的人机交互系统”，载于《2018年第27届电气电子工程师学会机器人与人机交互通信国际研讨会（RO-MAN）》。IEEE出版社，2018年，第422–427页。[27] O. Sadka、J. Giron、D. Friedman、O. Zuckerman 和 H. Erel，“将虚拟现实用作非人形社交机器人的仿真工具”，载于《2020年CHI人机交互系统中的人为因素会议扩展摘要》，丛书：CHI EA ’20。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2020年，第1–9页。[28] P. H. Kahn、T. Kanda、H. Ishiguro、B. T. Gill、S. Shen、H. E. Gary 和 J. H. Ruckert，“人们会保守人形机器人的秘密吗？人机交互中的心理亲密感”，载于《第十届ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，丛书：HRI ’15。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2015年，第173–180页。[29] L. Makin、G. Barnaby 和 A. Roudaut，“触觉与动觉反馈可改善虚拟现实中的距离感知”，载于《第31届人机交互大会论文集》，丛书：IHM ’19。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2019年。[30] K.-E. Bystrom、W. Barfield 和 C. Hendrix，“虚拟环境临场感的概念模型”，《临场感》，第8卷，第2期，第241–244页，1999年。[31] W. A. IJsselsteijn、H. de Ridder、J. Freeman 和 S. E. Avons，“临场感：概念、决定因素与测量”，载于《人类视觉与电子成像V》，B. E. Rogowitz 和 T. N. Pappas 编，第3959卷，国际光学与光子学学会。SPIE，2000年，第 520 529 [ ] 10 1117 12 387188 – 页。[32] 在线。网址：https://doi.org/ 。/ 。J. Perret 和 E. Vander Poorten，“触摸虚拟现实：触觉手套综述”，载于ACTUATOR 2018；第16届新型执行器国际会议，2018年，第1–5页。[33] H. Culbertson、S. B. Schorr 和 A. M. Okamura，“触觉技术：人工触觉的现状与未来”，《控制、机器人与自主系统年度评论》，第1卷，409，2018年，385页。– 。[34] C. Pacchierotti、S. Sinclair、M. Solazzi、A. Frisoli、V. Hayward 和 D. Prattichizzo，“用于指尖和手部的可穿戴触觉系统：分类体系、综述与展望”，《IEEE触觉学汇刊》，第10卷，第4期，第580–600页，2017年。[35] A. Gani、O. Pickering、C. Ellis、O. Sabri 和 P. Pucher，“触觉反馈对外科训练结果的影响：触觉与非触觉沉浸式虚拟现实训练的随机对照试验”，《医学与外科年鉴》，第83卷，第104734页，2022年。[36] G. Richard、T. Pietrzak、F. Argelaguet、A. L´ecuyer 和 G. Casiez，“研究触觉反馈在绘图任务中对虚拟具身的作用”，《虚拟现实前沿》，第1卷，2021年。[37] J. Kreimeier、S. Hammer、D. Friedmann、P. Karg、C. B¨uhner、L. Bankel 和 T. G¨otzelmann，“评估不同类型的触觉反馈对虚拟现实中基于任务的临场感与表现的影响”，载于《第12届ACM辅助环境相关普适技术国际会议论文集》，丛书：PETRA ’19。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2019年，第289–298页。[38] B. Brogi、G. Cortigiani、A. Villani、N. D’Aurizio、D. Prattichizzo 和 T. L. Baldi，“Avatarm：通过机器人技术、减损现实与触觉技术在物理元宇宙中进行交互”，《IEEE Access》，第12卷，第90 750–90 767页，2024年。[39]D. Ni、A. W. W. Yew、S. K. Ong 等，“用于编程焊接机器人的触觉与视觉增强现实界面”，《先进制造》，第5卷，第191–198页，2017年。 [在线]。网址：https://doi.org/ 10 1007 40436 017 0184 7 。/ s - - - J. N. Bailenson 和 N. Yee，“虚拟人际触摸：协作式虚拟环境中的触觉交互与共同临场感”，《多媒体工具与应用》，第37卷，第1期，第5–14页，2008年。[40]

[41] A. Voit、S. Mayer、V. Schwind 和 N. Henze，“在线、虚拟现实、增强现实、实验室及现场：评估智能制品的研究方法比较”，载于《2019年CHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》，CHI ’19系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2019年，第1–12页。[42] L. Sch¨olkopf、M. Lorenz、M. Stamer、L. Albrecht、P. Klimant、N. Hammer 和 J. T¨umler，“对于车载人机界面的用户体验评估，触觉反馈比虚拟现实体验更重要”，Procedia CIRP，第100卷，606，2021，31 601 2021 2021页。– 第st届CIRP设计会议（CIRP Design）。[43] G. Makransky、L. Lilleholt 和 A. Aaby，“虚拟现实环境多模态临场感量表的开发与验证：验证性因子分析和项目反应理论方法”，《人类行为中的计算机》，第72卷，第276–285页，2017年。[44] C. M. Carpinella、A. B. Wyman、M. A. Perez 和 S. J. Stroessner，“机器人社会属性量表（RoSAS）：开发与验证”，载于《2017年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，HRI ’17系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2017年，第254–262页。[45] J. D. Van Der Laan、A. Heino 和 D. De Waard，“评估先进交通远程信息系统接受度的简易程序”，《交通研究C辑：新兴技术》，第5卷，第1期，第1–10页，1997年。[46] C. Bartneck、D. Kuli´c、E. Croft 和 S. Zoghbi，“测量机器人拟人化、生命感、可喜爱性、感知智能和感知安全性的工具”，《国际社会机器人学杂志》，第1卷，第71–81页，2009年。[47] D. J. McAllister，“情感与认知型信任：组织中人际合作的基础”，《管理学会杂志》，第38卷，第24–59页，1995年。[48] M. Schrepp、A. Hinderks 和 J. Thomaschewski，“用户体验问卷（UEQ-S）简版的设计与评估”，《国际交互式多媒体与人工智能杂志》，第4卷，第6期，第103–108页，12/2017 2017。[49] M. Tavakol 和 R. Dennick，“理解Cronbach α系数”，《国际医学教育杂志》，第2卷，第53页，2011年。[50] V. Braun 和 V. Clarke，“在心理学中运用主题分析”，《心理学定性研究》，第3卷，第2期，第77–101页，2006年。[51] K. M. Lee、Y. Jung、J. Kim 和 S. R. Kim，“具身社会代理是否优于非具身社会代理？物理具身、触觉交互和人们的孤独感对人机交互的影响”，《国际人机研究杂志》，第64卷，第10期，第962–973页，2006年10月。[52] B. Brown、F. Bu、I. Mandel 和 W. Ju，“运动中的垃圾：与机器人垃圾桶产生的新兴交互”，载于《2024年CHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》，CHI ’24系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2024年。[53] X. Yu、T. T. M. Tran、Y. Wang、K. Mah、Y. Cao、S. S. Johansen、W. Johal、M. L. Lupetti、M. Rose、M. Rittenbruch、R. G. Zsolczay 和 M. Hoggenm¨uller，“格格不入的野外机器人：通过设计探针探究城市机器人情境适应性面临的挑战”，载于《CHI人机交互系统中的人为因素会议扩展摘要集》，CHI EA ’24系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2024年。[54] A. Rosenthal-von der P¨utten、D. Sirkin、A. Abrams 和 L. Platte，“人机交互中被遗忘的一环：在公共空间与机器人的偶遇”，载于《2020年ACM/IEEE人机交互国际会议伴随论文集》，HRI ’20系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2020年，第656–657页。[55] X. Yu、M. Hoggenm¨uller 和 M. Tomitsch，“从代理自主性到非正式协作：对寻求帮助的城市机器人的设计探究”，载于《2024年CHI人机交互系统中的人为因素会议论文集》，CHI ’24系列。美国纽约州纽约市：美国计算机协会，2024年。[56] F. Biocca、C. Harms 和 J. K. Burgoon，“迈向更稳健的社会临场感理论与测量：综述及建议标准”，《临场感：远程操作与虚拟环境》，第12卷，第5期，第456–480页，2003年10月。[57] C. S. Oh、J. N. Bailenson 和 G. F. Welch，“社会临场感系统综述：定义、前因与影响”，《机器人学与人工智能前沿》，第5卷，2018年。[58] W. A. Bainbridge、J. W. Hart、E. S. Kim 和 B. Scassellati，“与实体在场机器人互动相较于与视频显示代理互动的益处”，《国际社会机器人学杂志》，第3卷，第1期，第41–52页，2011年。