arXiv:2601.19294v1 [cs.GR] 27 Jan 2026

文字具有重量：比较压力和重量作为虚拟现实用户界面隐喻的使用

Joffrey Guilmet、Suzanne Sorli 和 Diego Monteiro [1]

I. 引言

虚拟现实（VR）支持新型交互形式，通常利用触觉技术传达故事或游戏相关信息。然而，触觉反馈也能增强用户界面，提供不直接关联叙事的提示。

虽然振动反馈在控制器和移动设备中十分常见，但在用户界面中使用重量作为反馈的研究还相对较少。尽管重量已在虚拟现实领域得到研究——尤其涉及随时间变化的感知和影响因素——但其在用户界面中的作用仍需更多关注。

本项目研究重量如何提高虚拟现实中通知的感知紧迫性，以及基于压力的触觉技术是否能够调节这种感知。

II. 相关工作

在虚拟现实中模拟无支撑的重量颇具挑战。Thor's Hammer 是一种锤形装置，内部装有风扇[1]，；Aero-Plane 则通过控制器上朝下的螺旋桨产生力 [2]。其他装置（如 Stroe）则使用电机拉动一根连接虚拟现实控制器与用户双脚的绳子 [3]。其他系统 [4]–[6] 则采用液体质量的位移与定位方式，例如 GravityCup [7],和 VibroWeight [8]。

一种常见的无支撑系统是使用气压，相关实例很多，例如 PneuHaptic，它通过气动控制的硅胶腔室产生不同的触觉感受 [9]；还有 [10] 的研究，该研究提出了一套设计和制造可变形充气物的流程，利用可编程弯曲机构实现交互式应用，例如可穿戴设备和玩具。然而，我们显然可以从 [11],[12], 的研究中汲取灵感，该研究使用气动系统模拟通知。因此，我们提出这个问题：能否利用重量和压力来辅助传达通知?

III. 我们的系统

我们的触觉系统采用一个闭环回路，由两个步进电机控制，驱动两支以 45 度角固定的注射器；它们通过蓝牙由 Unity 应用程序管理。该系统可以用水和空气填充两个柔性容器，这两个容器放置在一个刚性支架中，并固定在用户右手手背上，如图 1a、b 所示。启动注射器时，我们先注入水，随后再注入空气，使同一容器内产生压力，从而带来压缩感作用于手部周围。这种配置使我们能够在不施加压力的情况下增加重量，并探究之后施加的压力如何影响对重量的感知。

在手上，系统空载时重量约为119克，注满水后增至264克。注射器注满耗时15.15秒。注入系统的空气量为100毫升；计入空气压力后测得的重量为350克，环境条件为19°C、海拔70米。

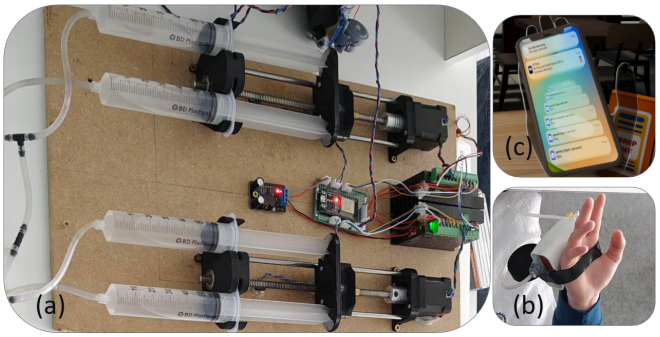

图1. 我们系统的概览。(a) 步进电机启动，压缩最初装有水的注射器，将液体推入两个柔性容器中；这两个容器置于刚性支架内，并固定在用户右手背上。(b) 两个容器逐渐充满，产生重量不断增加的感觉。此外，我们还向同一容器内注入空气，对手施加压力。(c) 同时，用户通过虚拟现实头显观看智能手机屏幕，屏幕上播放的视频模拟了大量通知同时涌入的情景。

IV. 假设

鉴于重量的皮肤感觉成分也可以被感知为压力，我们假设，在重量传递系统中加入压力成分会增加感知到的重量（H1）。

此外，我们假设，重量的增加会让参与者觉得，与之相连的用户界面中的任何通知都更加紧迫（H2）。

V. 方法

为推进该项目，我们介绍一项正在进行的初步评估，旨在评估将压力用作重量调节因素、并进一步将其应用于用户界面的可行性。为此，我们在三种实验条件下使用了我们的系统：A——对照组（无水、无压力）；B——完整重量、无压力；C——完整重量、完整压力。在 Unity 虚拟现实手部追踪应用中，用户的右手上持有一部虚拟智能手机。我们在智能手机上播放了一段与系统注水过程同步的视频，每隔 40 毫秒就会显示一条消息和一则通知。

*LII团队在EsieaLAB开展的研究[1]通讯作者电子邮件：diego.vilelamonteiro@esiea.fr

A. 测量

为了获得主观反馈，我们使用了一系列自编问题：1——“估计手上物体的重量（克）”；以及三个“请用 0 到 10 的量表评分，0 为最低”问题：2——“手上的感觉与视觉呈现有多连贯”；3——“这些消息让你觉得有多紧迫”；4——“这些消息让你感觉有多重”。之后，我们请用户根据重量、偏好和连贯性对所有版本进行排序。

B. 实验流程

我们招募了 8 名参与者（2 名女性），年龄在 20 至 32 岁之间，手掌周长平均约为 20.5 cm （ SD = 1.24 ）。除 1 人外，其余参与者都有虚拟现实使用经验。只有 2 人有触觉技术使用经验。实验中使用了一台虚拟现实就绪电脑 MSI Katana 15 B13VGK- 1685FR Dragon Station、一台作为头戴式显示器的 Meta Quest 3S、我们的触觉系统以及一把卷尺。实验流程从获取知情同意和人口统计信息开始，随后向参与者介绍实验。接着让参与者就位，并启动第一个版本；实验顺序经过平衡化。系统完全启用后，通过口头交流填写问卷。完成后，指导参与者开始下一个实验条件。所有实验条件完成后，移除系统，填写实验后问卷，并向参与者说明实验情况。

VI. 结果

弗里德曼检验（自由度=2）显示，各模式在归一化重量（$\chi^2 = 14.25$，$p < 0.05$）、感知重量（$\chi^2 = 9.75$，$p < 0.05$）和视觉—触觉连贯性（$\chi^2 = 6.05$，$p < 0.05$）方面存在显著差异，但在感知紧迫性（$\chi^2 = 0.67$，$p = 0.1$）方面没有显著差异。肯德尔相关系数 W 显示，参与者对重量感知（$W = 0.89$）具有较强的一致性，对偏好（$W = 0.77$）和连贯性（$W = 0.75$）具有较好的一致性。

模式A在重量和偏好方面始终排名最低。8名参与者中有7名认为模式C最重，5名最偏好模式C。模式B在重量和偏好方面均介于模式A与模式C之间。

威尔科克森符号秩检验证实，模式A在归一化重量和感知重量方面与模式B和模式C均存在显著差异（均为 $p < 0.05$）。然而，模式B与模式C在感知重量方面没有显著差异（$p = 0.1$）。在连贯性方面，模式C优于模式A（$p < 0.05$），但不优于模式B（$p = 0.1$）。各模式之间的紧迫性评分均无显著差异（均为 $p = 0.1$）。

VII. 讨论与未来工作

在本研究中，我们验证了 H1，但未能验证 H2。结果表明，在我们的研究情境中，压力会影响重量感，但二者之间的具体关系及其边界仍有待探索。未来的工作应测试不同的压力系统，以加深对这一问题的理解。

许多参与者将非重量系统的通知评为最高紧迫性，几乎没有为触觉调制留下空间。下一步，我们计划尝试不同的紧迫性级别，或探索其他类型的信息，以更好地评估基于重量的反馈所产生的影响。

参考文献

[1] S. Heo、C. Chung、G. Lee 和 D. Wigdor，“Thor’s hammer：一种利用螺旋桨诱导推进力的无接地力反馈设备”，载于 *2018*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集，CHI ’18，（美国纽约州纽约市），第 1–11 页，计算机协会，2018 年。[2] S. Je、M. J. Kim、W. Lee、B. Lee、X.-D. Yang、P. Lopes 和 A. Bianchi，“Aero-plane：一种可在虚拟二维平面上呈现重量运动错觉的手持式力反馈设备”，载于 第*32*届*ACM*用户界面软件与技术年会论文集，UIST ’19，（美国纽约州纽约市），第 763–775 页，计算机协会，2019 年。[3] A. Achberger、P. Arulrajah、M. Sedlmair 和 K. Vidackovic，“Stroe：一种无接地的基于绳索的重量模拟设备”，载于 *2022*年*IEEE*虚拟现实与三维用户界面会议（*VR*），第 112–120 页，2022 年。[4] D. Monteiro、H.-N. Liang、X. Wang、W. Xu 和 H. Tu，“用于虚拟现实中重量和重心模拟的低成本设备的设计与开发”，载于 *2021*年国际多模态交互会议论文集，ICMI ’21，（美国纽约州纽约市），第 453–460 页，计算机协会，2021 年。[5] A. Kalus、M. Kocur、J. Klein、M. Mayer 和 N. Henze，“Pumpvr：通过虚拟现实中的液体质量转移呈现物体和虚拟化身的重量”，载于*2023*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集，CHI ’23，（美国纽约州纽约市），计算机协会，2023 年。[6] A. Kalus、J. Klein、T.-J. Ho 和 N. Henze，“虚拟现实中的物体重量模拟：绝对质量和重量分布的作用”，载于 第*30*届*ACM*虚拟现实软件与技术研讨会论文集，VRST ’24，（美国纽约州纽约市），计算机协会，2024 年。[7] C.-H. Cheng、C.-C. Chang、Y.-H. Chen、Y.-L. Lin、J.-Y. Huang、P.-H. Han、J.-C. Ko 和 L.-C. Lee，“Gravitycup：一种用于模拟虚拟现实中动态重量的基于液体的触觉技术”，载于 第*24*届*ACM*虚拟现实软件与技术研讨会论文集，VRST ’18，（美国纽约州纽约市），计算机协会，2018 年。[8] X. Wang、D. Monteiro、L.-H. Lee、P. Hui 和 H.-N. Liang，“Vibroweight：在虚拟现实中模拟物体的重量和重心变化，以增强现实感”，载于 *2022*年*IEEE*触觉研讨会（*HAPTICS*），第 1–7 页，2022 年。[9] L. He、C. Xu、D. Xu 和 R. Brill，“Pneuhaptic：通过气动臂带传递触觉提示”，载于 *2015*年*ACM*可穿戴计算国际研讨会论文集，ISWC ’15，（美国纽约州纽约市），第 47–48 页，计算机协会，2015 年。[10] J. Ou、M. Skouras、N. Vlavianos、F. Heibeck、C.-Y. Cheng、J. Peters 和 H. Ishii，“aeromorph——用于交互设计的热封可充气形变材料”，载于第*29*届用户界面软件与技术年会论文集，UIST ’16，（美国纽约州纽约市），第 121–132 页，计算机协会，2016 年。[11] H. Pohl、F. Hoheisel 和 M. Rohs，“通过压缩反馈限制行动自由”，载于 *2017*年*CHI*计算机系统中的人为因素扩展摘要大会论文集，CHI EA ’17，（美国纽约州纽约市），第 1962–1969 页，计算机协会，2017 年。[12] H. Pohl、P. Brandes、H. Ngo Quang 和 M. Rohs，“Squeezeback：用于通知的气动压缩”，载于*2017*年*CHI*计算机系统中的人为因素大会论文集，CHI ’17，（美国纽约州纽约市），第 5318–5330 页，计算机协会，2017 年。