探索触觉和视觉线索的跨模态交互对虚拟现实中的温度感知的影响：初步研究

Helfenstein-Didier，CD，Clémentine 里昂大学、ENISE、LTDS、CNRS第5513联合研究组，Jean Parot街58号，法国圣艾蒂安42023 Cedex 2，clementine.didier@enise.fr

Dhouib，AD，Amira

国立工程师学校（ENISE），Jean Parot街58号，法国圣艾蒂安42023 Cedex 2，amiradhouib@live.fr

Favre，FF，Florent

国立工程师学校（ENISE），Jean Parot街58号，法国圣艾蒂安42023 Cedex 2

Pascal，JP，Jonathan

N国立高等工程师学校（ENISE），Jean Parot 街58号，42023 圣艾蒂安 CEDEX 2，法国 e

Baert，PB，Patrick

N国立高等工程师学校（ENISE），Jean Parot 街58号，42023 圣艾蒂安 CEDEX 2，法国 e，patrick.baert@enise.fr

得益于数字革命，虚拟现实（VR）凭借其让用户沉浸于虚拟环境（VE）中的能力而日益普及。虚拟环境通常仅提供视觉和听觉线索；然而，近期结果表明，多种感官模态能够增强用户的沉浸感。在本研究中，我们提出了一套实验方案，用于在虚拟现实中重现多种触觉感受，尤其是温度感受。本研究有两个目标：（1）研究不同设备在产生冷热感觉方面的表现，并评估其效率和声学干扰；（2）探究视觉和触觉刺激在温度感知中的相互依赖关系。14名参与者完成了两项实验研究。结果表明，所用材料不会造成声学干扰。点式投影仪比暖风机更有效地营造温暖感；风扇喷水比单独使用风扇更有效地营造冷感。此外，除极冷模拟（雪景可视化与通过风扇喷水进行的热刺激）外，未发现视觉线索对温度知觉有显著影响。

CCS 概念 • 以人为中心的计算~交互设计 • 综合与参考~跨计算工具与技术

附加关键词和短语：虚拟环境、热感觉、虚拟现实

美国计算机学会参考格式：
Helfenstein-Didier, CD, Clémentine, Dhouib, AD, Amira, Favre, FF, Florent, Pascal, JP, Jonathan, Baert, PB, Patrick。2021。《探索虚拟现实中触觉和视觉线索对温度感知的跨模态交互：初步研究》。载于 SensoryX '21：多感官体验研讨会，与 IMX 2021：ACM 交互媒体体验国际会议同期举行。2021 年 6 月 21—23 日。美国纽约。

本作品依据《知识共享署名 4.0 国际公共许可协议》（CC BY 4.0）的条款发布。在适当注明原作品来源，且不暗示作者或巴西计算机学会对使用者予以认可的前提下，任何人均可免费复制或传播本作品的全部或部分内容，包括原样转载、改编或混编。2021 巴西计算机学会

1 引言

近年来，人们对虚拟现实（VR）的兴趣日益浓厚。这种兴趣体现在该技术在教育、工业维护、医疗保健等多个领域的应用中。[1-3]。随着 VR 应用的不断增长，企业和研究人员不再只关注视觉线索，以使虚拟环境（VE）更加逼真或增强用户在虚拟环境中的沉浸感。事实上，刺激虚拟现实中的不同人类感官，是实现这些目标的一种可能途径。Obrist 等人 [4] 强调，设计多感官体验具有潜力，可促成新产品和新体验的诞生。研究人员探讨多感官刺激对不同参数（体验质量、临场感、沉浸感、记忆等）的影响 [5-7]。Melo 等人 [3] 分析的研究中，84.8% 显示多感官虚拟现实体验具有积极影响。据他们所述，触觉是多感官虚拟现实系统中最常用的刺激方式（86.6%）。

触觉线索包括皮肤感觉线索，使我们能够感知触摸、振动和温度等刺激 [8]。一些研究旨在虚拟现实中实现热觉线索。现有多种非接触式热反馈 [6, 9]。由于风扇通常用于模拟风，而非冷感，因此冷觉线索的研究较少 [10-12]。接触式热刺激也在不断发展 [5, 13-14]。另一些则非常复杂 [7, 15-16]。

尽管这些设备的应用日益广泛，但相关研究主要关注多感官线索对体验质量或临场感等参数的影响 [5, 7, 13]。关于评估新型设备产生冷热感觉效果的研究很少，且研究结论并不一致 [15-16]。据我们所知，目前尚无研究评估使用这些设备时产生的声学干扰。针对这一不足，本研究旨在进一步了解声学干扰对热感觉的影响。最后，我们将本研究提出的方法与现有研究进行比较

2 方法

我们探讨以下研究问题：

Q1. 不同设备在营造冷热感觉方面的效率和声学干扰表现如何？

Q2. 温度感知中的视觉和触觉刺激之间是否存在相互依赖关系？

2.1 参与者

14 名志愿者（7 男、7 女），年龄为 24 至 68 岁（平均年龄=37.5±10.97），身穿 T 恤和长裤，参与了我们的实验。他们对虚拟环境都没有或仅有有限的使用经验。志愿者在提供知情同意后参与实验，且未获得任何金钱报酬。

2.2 实验设计

每位参与者的研究时长约为30分钟（从到达到离开）。研究包含2种场景：场景1为无视觉线索的热刺激（头戴式显示器中显示黑屏）；场景2为有视觉线索的热刺激（温暖感对应烟囱，冷感对应雪山，可在 Steam VR 上获取）。在每种场景中，均使用相同的冷、热刺激。测试区域使用了不同设备，以营造中等/强冷感和中等/强温暖感（见表1）。每次实验开始前，均测量初始室温（22.88±1.09°C）、湿度（36.14±9.03%）和声级（38.9±0.2dBA）。所有设备均由实验人员手动启动。

表 1：实验中所用设备的特性

设备		特性	实验所用设置 实验	声级 （dBA）	风速 m/s
Heat 系统	暖风机	- 1000 瓦（1 级） - 2000 瓦（2 级）	设备位置： 骨盆高度	48.9 – 50.5	0 – 0.3
	点式投影仪	- 1200 瓦 - 产生辐射	距此处 0.5 米 参与者	39.0	-
Cold 系统	电风扇	- 50 瓦 - 两个档位	设备位置： 骨盆高度 距参与者 1 米	43.5 – 44.8（1 级） 51.5 – 53.8（2 级）	0.7 – 1.6（1 级） 1.5 – 3（2 级）
	电风扇 + 依云喷雾器	- 50 W - 两个档位 - 产生湿度		43.7 – 45.5（1 级） 51.0 – 53.9（2 级）	0.7 – 1.6（1 级） 1.5 – 3（2 级）

{冷区}。为产生冷刺激，测试了两种布置：一台电风扇（设有两个档位），以及同一台风扇搭配喷水装置。风扇和喷雾器放置在距离参与者1米处时，1档对应的风速为0.7至1.6米/秒；2 级对应的风速为1.5至3米/秒。使用声级计记录瞬时声级（见表1）。

{暖区}。使用电加热器和点式投影仪。所有设备均放置在志愿者的骨盆高度处。调节加热器的功率。加热器距离参与者 0.5 米时，1 级和 2 级对应的吹风速度为 0 至 0.3 米/秒。使用声级计记录瞬时声级（见表1）。

每次刺激暴露后，参与者都需要回答有关热感觉和噪声干扰的问题。开始前，我们展示了 0 至 5 的热感觉量表（0 表示极冷，5 表示极暖），以说明评分方式。参与者回答了以下问题：

您如何评 价热感觉？{rate from 0 to 5}。噪声是否让您感到困扰？{answer yes or no} .

3 结果

我们考察了不同设备在产生冷热感觉方面的效果，包括其效率和声学干扰；同时也探究了温度感知中的视觉和触觉刺激是否存在相互依赖关系。我们采用威尔科克森配对检验，根据所使用的设备比较寒冷感觉、风感或热感。

3.1 噪声干扰

实验期间的声级见表1。100%的参与者表示在场景1中没有受到声音干扰。大多数参与者没有受到不同设备产生的噪声干扰（表2）。加热器比其他设备噪声更大。28.57%的志愿者受到其噪声干扰。

表2：问卷调查结果：问题"噪声是否打扰了你？"{回答是或否} 在场景2中

	加热器级别1	加热器级别2	点式投影仪	风扇级别1	风扇级别2
Yes	28.57%	28.57%	0%	0%	7.14%
No	71.43%	71.43%	100%	100%	92.86%

3.2 不同设备的性能

冷感设备。图1a展示了两个场景中各风扇档位对应的温度感知平均值和标准差。风扇强度（档位）越高，冷感越强（评分越低）。例如，在场景1中，1档时冷感为2.18±0.32，2 级时为1.82±0.42（场景2中则分别为2.07±0.27和1.82±0.32）。两个档位之间存在统计学差异（检验1的 p=0.005，检验2的 p=0.01）。

图1b展示了两个场景中各个风扇+喷雾档位下，对问题"您如何评价热感觉？"的平均评分。随着风扇强度（档位）增加，冷感程度也随之增强。例如，场景1中，1级和2级分别为1.64±0.41和1.36±0.53（场景2中相应为1.36±0.41和1.07±0.43）。两个档位之间存在统计学差异（检验1的 p=0.015，检验2的 p=0.025）。

热感设备。图2展示了两个场景中对问题"您感受到多少热感？"的平均评分。与加热器相比，投影仪带来的温暖感更强。例如，在没有虚拟环境（相应地，有虚拟环境）时，聚光灯的热感评分为4.25±0.43（相应为4.36±0.53），而加热器1级和2级的评分分别为3.68±0.32和4.21±0.32（相应为3.71±0.26和4.32±0.37）。这些差异具有统计学意义（检验1中加热器1级的 p=0.002，检验2中加热器1级的 p=0.005）。

在两种场景中，与加热器级别1相比，其他设备产生的热感觉均显著增强。

在两种场景中，加热器2级与点式投影仪之间均未发现差异（p>0.05）。由于点式投影仪已被证明不会造成噪声干扰，而2级暖风机则会，因此这些结果表明，点式投影仪是产生热感的推荐设备。

3.3 视觉刺激的影响

冷感模拟。如图1所示，仅使用风扇设备时，两种场景（有或无视觉刺激）之间未发现显著差异。然而，在场景2（有视觉刺激）中加入喷雾会增强冷感。尤其在2级时，差异显著（p=0.025）。

温暖模拟。随着视觉刺激的加入，温暖感略有增强，场景2的平均评分高于场景1。不过，结果显示两个场景之间没有统计学差异（p>0.48）。

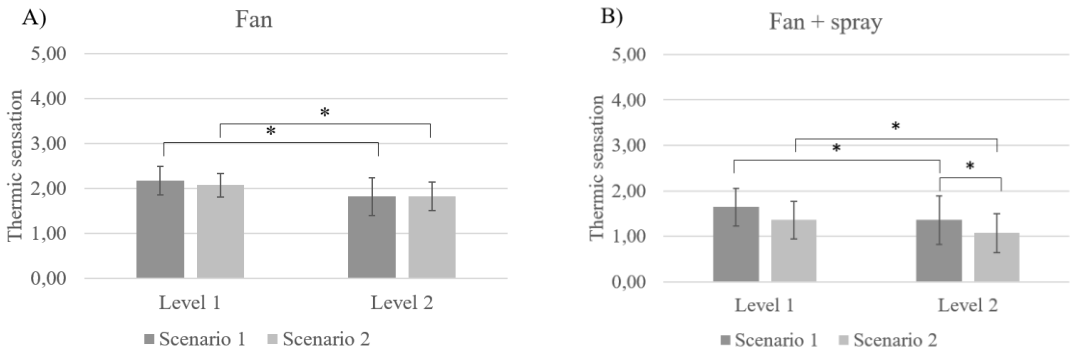


图1：两种场景下冷感模拟的热感觉知觉结果（n=14）；场景1使用黑色显示屏，场景2使用视觉显示屏。0表示"极冷"，5表示"极暖"。

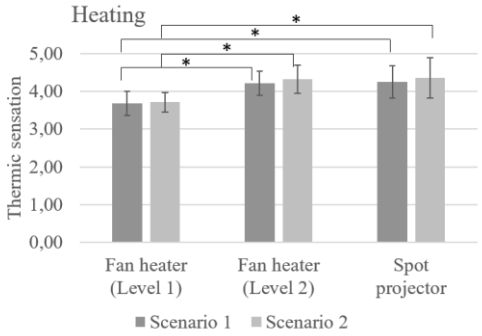


图2：两种场景下温暖模拟的热感觉结果（n=14）

4 讨论

本研究使我们得以强调以下重要方面：1）不同设备在产生冷热感觉方面的性能，包括其效率和声学干扰；2）温度感知中视觉和触觉刺激之间的相互依赖性有限。

本研究的主要发现是，产生冷感的方式会影响温度感知。观察到显著结果：场景1中，风扇处于 1 级时 p=0.003，处于 2 级时 p=0.004；场景2中，风扇处于 1 级和 2 级时 p=0.001。只有当加热器处于 1 级时，产生热感的方式才会影响两种场景下的感知温度（场景1中 p=0.002，场景2中 p=0.005）。加热器处于 2 级与点式投影仪之间未观察到显著差异。不过，有些设备噪声较大，可能会干扰志愿者的沉浸感。对于热感，投影仪比加热器更安静；在场景2中，28.57%的志愿者表示受到噪声干扰。对于冷感，报告的噪声干扰总体较低；一种可能的解释是，志愿者将风扇产生的噪声融入为下雪环境中的风声。志愿者不太容易将加热器的噪声与烟囱环境联系起来，因此觉得它更令人烦扰。

除此之外，深入研究产生热感的方式所带来的影响也会很有意义。尽管 2 级加热器与投影仪之间没有显著差异，我们还是决定事后测量温度。温度计放置在距设备 0.5 米处，与我们的实验场景一致。投影仪的温度升高速度更快、幅度也更大（30 秒后超过 30°C），而加热器在 30 秒后为 24.7°C。此时，加热器测得的温度已趋于稳定，而投影仪测得的温度仍在上升。在我们的实验场景中，我们不允许投影仪达到稳定状态。综合测得的温度、噪声干扰和暖感来看，投影仪似乎比加热器更有效。这可能与产生热感的方式有关：投影仪通过辐射散发热量，而加热器则吹出暖空气。关于冷刺激，风扇加喷水比单独使用风扇更有效。

与预期相反，我们的结果表明，除了与雪景视觉相对应、通过风扇+水进行皮肤刺激的极冷刺激外，视觉线索对热感觉没有显著影响。这一结果与 Günther 等人[15] 的研究相反；他们发现，在考虑 32.5°C 的中性热刺激时，视觉刺激会影响感知到的温度。

为了将我们的结果与 Günther 等人获得的结果进行比较，[15], 我们将所有热感觉（均值）统一换算到 0 到 5 的同一量表上（0 表示极冷，5 表示极暖），而 Günther 等人使用的是 0 到 8 的量表 [15]。尽管我们的装置不那么复杂，但它仍然

与 Günther 等人描述的“therminator”一样高效，[15], 因为我们的装置具有相同的热感觉范围，但极冷感觉（22.5°C）除外。

5 结论与未来工作

在虚拟现实中生成不同的皮肤感觉是一项具有挑战性的任务。本文介绍了一套实验方案，旨在评估声学干扰的影响以及视觉刺激对温度知觉的作用。我们开展了两项实验，并使用不同设备模拟冷感和暖感。未来的工作将探索纳入其他多感官线索。

致谢

作者谨向 Verène Tilly Djuigui Fotso 致谢，她是最早参与该项目的学生；也感谢 Guillaume Lavoué 对这一主题提出的新颖、专业且善意的见解。

参考文献

[1] Yasin Farmani 和 Robert J. Teather。2018年。通过视点吸附减少虚拟现实晕动症。载于《图形界面会议论文集》。加拿大人机通信学会，滑铁卢，加拿大，168–175。https://doi.org/10.20380/GI2018.23[2] Weina Jin、Jianyu Fan、Diane Gromala 和 Philippe Pasquier。2018年。虚拟现实游戏中的晕动症自动预测。载于《IEEE游戏、娱乐与媒体会议》。电气与电子工程师学会，戈尔韦，爱尔兰，1–9。https://doi.org/10.1109/GEM.2018.8516469[3] Miguel Melo、Guilherme Gonçalves、Pedro Monteiro、Hugo Coelho、José Vasconcelos-Raposo 和 Maximino Bessa。2020年。多感官刺激是否有益于虚拟现实体验？系统综述。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》。https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3010088[4] Marianna Obrist、Elia Gatti、Emanuela Maggioni、Chi Thanh Vi 和 Carlos Velasco。2017年。人机交互中的多感官体验。《IEEE多媒体》24。https://doi.org/10.1109/MMUL.2017.33[5] Felix Hülsmann、Julia Fröhlich、Nikita Mattar 和 Ipke Wachsmuth。2014年。虚拟现实中的风与温暖：实现与评估。载于《虚拟现实国际会议论文集》。美国计算机学会，纽约，1-8。https://doi.org/10.1145/2617841.2620712[6] Daisuke Iwai、Mei Aoki 和 Kosuke Sato。2019年。通过红外与RGB投影实现非接触式温度与视觉增强。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》25卷4期（2019年），1707–1716。https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2820121[7] Nimesha Ranasinghe、Pravar Jain、Shienny Karwita、David Tolley 和 Ellen Yi- Luen Do。2017年。Ambiotherm：通过模拟真实世界环境条件增强虚拟现实中的临场感。载于《CHI'17论文集》。美国计算机学会，纽约，1731–1742。https://doi.org/10.1145/3025453.3025723[8] Francis McGlone 和 David Reilly。2009年。皮肤感觉系统。《神经科学与生物行为评论》34（2009年）。https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.08.004[9] Ping-Hsuan Han、Yang-Sheng Chen、Kong-Chang Lee、Hao-Cheng Wang、Chiao-En Hsieh、Jui-Chun Hsiao、Chien-Hsing Chou 和 Yi- Ping Hung。2018年。Haptic around：面向沉浸式环境及虚拟现实交互的多种触觉。载于《虚拟现实软件与技术研讨会论文集》。美国计算机学会，纽约，1–10。https://doi.org/10.1145/3281505.3281507[10] Mitsuru Minakuchi 和 Satoshi Nakamura。2007年。通过吹气显示装置实现协作式环境系统。载于《有形与嵌入式交互国际会议论文集》。美国计算机学会，纽约，105–108。https://doi.org/10.1145/1226969.1226992[11] Taeyong Moon 和 Gerard J. Kim。2004年。虚拟现实风感显示装置的设计与评估。载于《虚拟现实软件与技术论文集》。美国计算机学会，纽约，122–128。https://doi.org/10.1145/1077534.1077558[12] Jouke C. Verlinden、Fabian A. Mulder、Joris S. Vergeest、Anna de Jonge、Darina Krutiy、Zsuzsa Nagy、Bob J. Logeman 和 Paul Schouten。2013年。通过局部风模拟增强虚拟帆船航行环境中的临场感。《工程学论文集》60（2013年）。https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.050[13] Dhruv Jain、Misha Sra、Jingru Guo、Rodrigo Marques、Raymond Wu、Justin Chiu 和 Chris Schmandt。2016年。使用虚拟现实进行沉浸式陆地水肺潜水。载于《CHI'16。 美国计算机学会，纽约，1563–1569。https://doi.org/10.1145/2851581.2892503[14] Roshan Lalitha Peiris、Yuan-Ling Feng、Liwei Chan 和 Kouta Minamizawa。2019年。ThermalBracelet：探索手腕周围的温度触觉反馈。载于《CHI'19论文集》。美国计算机学会，纽约，1–11。[15] Sebastian Günther、Florian Müller、Dominik Schön、Omar Elmoghazy、Max Mühlhäuser 和 Martin Schmitz。2020年。Therminator：理解虚拟现实中视觉反馈与身体佩戴式热反馈之间的相互依赖关系。载于《CHI'20论文集》。美国计算机学会，纽约，1–14。https://doi.org/10.1145/3313831.3376195[16] Roshan Lalintha Peiris、Wei Peng、Zikun Chen、Liwei Chan 和 Kouta Minamizawa。2017年。ThermoVR：探索与头戴式显示器集成的温度触觉反馈。载于《CHI'17论文集》。美国计算机学会，纽约，5452–5456。https://doi.org/10.1145/3025453.3025824