# Tangible Web：一款穿梭于现实之间的交互式沉浸式虚拟现实创意系统

Simin Yang*香港科技大学，中国香港特别行政区
syangcj@connect.ust.hk

Ze Gao*香港科技大学与香港科技大学（广州），中国香港特别行政区和广州
zgaoap@connect.ust.hk

Reza Hadi Mogavi 香港科技大学与滑铁卢大学，中国香港特别行政区和滑铁卢，中国和加拿大
rhadimogavi@acm.org

Pan Hui 香港科技大学（广州），中国广州 panhui@ust.hk

Tristan Braud†香港科技大学，中国香港特别行政区
braudt@ust.hk

arXiv:2304.02274v1 [cs.HC] 5 Apr 2023

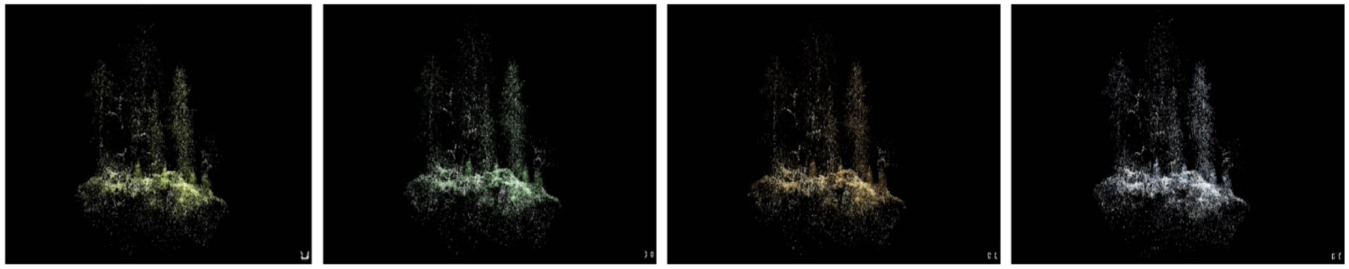


**图 1：通过连接到VR设备的传感器测得的四季及其对应温度（10°C 至 30°C）。从左到右：春季（浅绿色）、夏季（深绿色）、秋季（深黄色）和冬季（白色）。**

## 摘要

随着虚拟现实（VR）技术的发展，虚拟显示已成为博物馆、画廊及其他旅游目的地向公众展示其藏品不可或缺的方式。然而，当前虚拟现实显示所缺乏的沉浸感，限制了用户体验和欣赏其美学价值的能力。本文介绍了一项案例研究，探讨某旅游景点在开发实体网络系统时所采用的创新方法。该系统能够根据外部传感器采集的环境参数，帮助访客提升虚拟现实的美学表现。我们的系统通过与十二个对艺术和展览感兴趣的利益相关者群体开展访谈和交流活动，共同协作开发而成。本文展示了我们的交互技术进步如何，沉浸感和视觉吸引力均超越了早期几代虚拟显示。通过多模态交互，我们旨在鼓励万维网上的创新，并打造更具视觉吸引力、更引人入胜的虚拟显示。我们希望，这项工作能让更广泛的在线艺术社区深入了解人们与虚拟世界互动的方式。

## CCS 概念

• **以人为中心的计算** → **人机交互（人机交互）**；交互式系统和工具；人机交互中的实证研究；**虚拟现实**。

## 关键词

Web 虚拟现实、基于 Web 的应用程序、沉浸感、用户参与度、人机交互、以人为中心的设计、用户体验设计、数字叙事、创造力

**ACM 参考格式：**
Simin Yang、Ze Gao、Reza Hadi Mogavi、Pan Hui 和 Tristan Braud。2023 年。TangibleWeb：一种跨越现实的交互式沉浸感虚拟现实创造力系统。载于《*2023* 年 *ACM Web* 会议论文集》（*WWW '23*），*2023*年*4*月*30*日至*5*月*4*日，美国得克萨斯州奥斯汀。ACM，美国纽约州纽约市，8 页。
https://doi.org/10.1145/3543507.3587432

*两位作者对本研究的贡献相同。†Tristan Braud 是通讯作者。

特此授权免费制作本作品部分或全部内容的数字副本或纸质副本，供个人或课堂使用，但不得为营利或商业利益制作或分发副本，且副本首页必须附上本声明和完整引文。必须尊重本作品中第三方组件的版权。其他用途请联系所有者/作者。*WWW '23*，*2023*年*4*月*30*日至*5*月*4*日，美国得克萨斯州奥斯汀 © 2023年版权归所有者/作者所有。ACM ISBN 978-1-4503-9416-1/23/04。
https://doi.org/10.1145/3543507.3587432

## 1 引言

自 20 世纪 90 年代初诞生以来，万维网不断集成更加丰富的媒体。早期网页主要以文本和图像为基础。随后，得益于网络带宽的提升，视频变得更加普及。近年来，WebGL [32]支持了万维网上的交互式 3D 体验，随后 WebXR 也为虚拟世界和增强现实（VR/AR）中的沉浸式体验提供了支持。然而，尽管技术取得了这些进步，沉浸式网页体验往往主要依靠新奇感来吸引用户，似乎并不能带来持久的兴趣。

WebXR [34] 让用户无需在设备上安装应用程序，即可通过网页浏览器快速体验新的XR体验。开发统一且具备互操作性的标准，能让开发者专注于应用程序的内容，而无需考虑多个平台的具体细节。然而，这种灵活性是以性能显著低于原生XR应用程序为代价的。因此，与原生应用程序相比，Web XR应用程序的图形效果不够吸引人，导致沉浸感降低。为弥补这些技术问题，我们提出让WebXR应用程序与其他传感器交互，向应用程序传递更广泛的数据。这些数据可能包括温度和湿度等外部环境信息、更先进的用户动作感知，以及与实体物品和实体交互界面的交互。通过整合有关用户及其所处环境的更多数据，WebXR可以进一步模糊物理世界与数字世界之间的界限，增强沉浸感并带来更好的用户体验。

本文提出了一项基于创新型物理交互系统“TangibleWeb”的全新艺术作品创作。这一物理交互系统能够将现实世界数据传输至虚拟现实世界，为 Web 虚拟现实赋予新的功能，并使用户能够脱离控制器与彼此进行交互。“Tangible Web”是一种虚拟现实交互设备，可连接各种传感器（如温度、湿度、火焰等），并通过传感器数据影响 VR设备中的内容呈现方式。通过这种方式，用户与虚拟艺术作品之间的交互将变得更加多样化。例如，当用户逐渐用手温暖传感器时，VR设备中的场景也会随着温度的变化而发生改变。

通过这种以计算机编程方式穿梭于虚拟世界与现实之间的方法即可实现这一效果。具体而言，首先，通过温度传感器感知外部温度的变化（例如，展示现场准备的火柴）；其次，通过 Arduino 接收多种传感器数据，并通过串行端口将数据发送至计算机；最后，接收指令的设备中的虚拟场景逐渐从银装素裹的冬季转变为绿意盎然的夏季场景。

本项目旨在通过交互技术探索物理与虚拟世界之间的联系。虚拟现实交互装置可被视为虚拟世界与现实之间的桥梁，观众能够通过该系统影响虚拟环境。在当今虚拟现实技术蓬勃发展的背景下，越来越多的研究开始关注虚拟环境中的身体体验。例如，根据 Suh 和 Prophet 关于当前沉浸式虚拟现实的研究 [28]，他们提出，主要关注领域是刺激（即，感知与知觉）、有机体（即认知与情感）、反应（即积极与消极结果）以及虚拟现实使用中的个体差异（即寻求个人认知）。然而，很少有研究和创作呈现并探讨现实对虚拟环境的影响 [2]。这可能是由于头戴式设备和控制器的局限性限制了交互方式的多样性。

我们将利用这一交互式装置，引发人们对媒体对城市和当代人类生活的过度侵入这一现象的讨论 [15]。公众正在思考虚拟现实技术。该项目将以交互式装置的形式呈现，为观众创造一种全新的体验，使其能够穿梭于现实与虚拟世界之间。理想情况下，鉴于元宇宙技术的日益普及，该项目将为艺术家、研究人员和媒体研究者提供值得长期思考的议题。例如，虚拟现实究竟应该更加接近真实世界，还是应该弥补现实世界中无法实现的事物？

我们的贡献是：

- 我们提出了一种物理交互系统，通过将现实世界中产生的数据（如温度、湿度、压力等）传输到虚拟世界中，实现现实世界与虚拟世界之间的数据交互。我们展示了一种物理交互系统，该系统利用来自现实世界的数据改变虚拟世界的环境，从而实现虚拟世界与现实世界之间的关联。
- 更多人可以通过数据接口扩展该物理系统的界面功能，在万维网上创造创意体验，而不仅仅局限于构建基于按钮的交互。

## 2 形成性分析与设计决策

在获得本校机构审查委员会（IRB）的批准后，我们对来自不同国家和地区的十二名参与者进行了半开放式 Zoom访谈，其中包括七名普通游客、三名艺术家和两名景点管理人员。参与者包括三名女性和四名年龄在25至35岁之间的男性。通过对访谈内容的分析，我们得出了以下结论：

- 几位游客提到，新冠肺炎疫情让他们三年来无法出行。他们承认虚拟现实导览是一种替代方案，但更愿意亲自前往真实地点。
- 根据景点管理部门的陈述，在疫情暴发期间，他们投入了大量资金用于三维重建和虚拟现实（VR）导览的建设。他们希望确保这笔投资不会白费。
- 两位女性参与者表示，她们非常有兴趣与模拟各种季节和天气状况的现实世界虚拟现实场景进行互动并观看这些场景。
- 与前一点一致，一位艺术家建议，互动体验会对观众产生深远的影响。

基于上述发现，我们确立了后疫情时代开展本研究的动机。实际旅游景点日益开放，虚拟场景持续得到使用，这些现象促使

我们探究现实与虚拟世界之间的联系，包括虚拟世界能否取代现实，还是只能对现实加以增强。

本研究探讨了旨在提升虚拟现实导览用户体验的设计方案，着重强调参与度、艺术价值和真挚情感。

- 参与：用户参与对于提升用户体验和鼓励重复访问至关重要。通过融入交互元素，用户可以更深入地与网站互动，从而获得更令人难忘、更愉悦的体验。

- 虚拟场景的艺术价值：虚拟场景不必与真实场景完全一致，但艺术化处理可以增强场景的视觉效果。经过慎重考虑，我们采用一种算法创建了符合艺术标准、并捕捉真实场景精髓的点云场景。

- 真挚情感：为了营造真实的体验，我们首先精心挑选了温度传感器和湿度传感器。用户可以通过操作水杯和打火机图像传感器来调整虚拟场景，从而模拟环境变化并唤起真挚情感。

通过探索原始虚拟场景和生成的虚拟场景，本研究旨在改善后疫情时代虚拟现实导览的用户体验（不使用BIM建筑信息模型），并鼓励消费者思考现实世界与虚拟世界之间的交互方式。我们的项目将以交互式虚拟现实装置的形式呈现，并以浏览器作为主要平台（利用AFrame实现WebVR）。显示设备将采用经过改装的Oculus Quest 2，并配备多种传感器，以实现温度、声音和湿度的交互式触觉机制。我们将虚拟现实头显设备与传感器及Arduino连接，以创建最终装置。用户的行为将影响传感器的适配参数，随后这些参数将被传输至虚拟现实头显，从而改变虚拟场景。例如，如果用户将湿度传感器放入面前的一杯水中，虚拟场景将从下雨逐渐转变为暴雨，再变为下雪。同样，使用打火机加热温度传感器，将使虚拟场景逐渐从雪天转变为春季和夏季，如图1所示。

## 3 相关工作

本节概述三个领域的相关文献：1）虚拟现实与网络；2）交互式网页与艺术作品；3）实体化网站。通过对这三个方向的文献进行回顾，我们得以更深入地理解虚拟现实中的实体网络，从而创作出更具沉浸感、令用户更愉悦的交互式网络艺术。

### 3.1 虚拟现实与网络

“虚拟现实” [24] 是指一种模拟或人工环境，让用户能够体验自然世界之外的环境。近年来，虚拟现实技术的硬件和软件都取得了迅速发展。例如，Facebook 最近更名为 Meta [21]，推动元宇宙概念走到聚光灯下；与此同时，全球虚拟现实市场的硬件销量预计将达到 960 万台 2022 [4]。因此，虚拟现实技术正日益应用于各行各业，例如教育、医疗和艺术领域，越来越多的艺术家考虑利用虚拟空间展示艺术作品，并为观众提供沉浸式体验。

随着人们对虚拟现实的关注日益增加，数以万计的开发者开始投入研究，进而催生了虚拟现实的三种主要实现方式：（1）基于安卓平台开发虚拟现实软件，涉及许多底层技术，入门门槛高，跨平台兼容性较差；（2）基于 Unity [30] 和虚幻引擎[6],等游戏引擎进行开发，大幅降低了游戏引擎开发的门槛，但仍面临平台兼容性挑战；（3）2016年 WebVR [33] 标准的出现，为开发者带来了新思路。网站的平台兼容性引起了开发者对这一开发方式的兴趣。经过数年发展，2019年 WebXR [34] 问世，使开发者不仅能够基于万维网开发虚拟现实应用，还能开发增强现实应用。万维网上已有许多优秀的应用案例，例如由两人开发的 MoonRider [20], , 这是一款音乐可视化节奏游戏；以及 A-Painter [1], , 这是一款允许用户在虚拟空间中涂鸦的游戏。

### 3.2 交互式网络与艺术作品

创建网页时，采用以用户为中心的设计方法来增强交互性十分重要。交互内容能够鼓励用户主动参与其中，并与网页建立更深层的联系 [3]。网站上的传统交互功能通常包括投票、评价、评论和社交对话 [3]。交互内容让用户主动探索信息，从而促进理解，其效果优于传统方法 [18, 26, 27]。它还让用户能够参与其中，并熟悉陌生的主题 [22]。例如，Gelman 等人 [8] 探讨了静态图形在交互内容中的作用。此外，研究表明，在网页中加入游戏机制，营造有趣的环境，可以让网页对用户更具吸引力 [17]。网络技术的发展使网站得以采用二维和三维交互内容，例如三维地图和游戏，为用户带来令人兴奋的新颖体验。与普通的静态内容相比，交互内容具有诸多优势。

然而，尽管交互内容具有诸多优势，大多数在线艺术作品仍局限于静态图像或视频，交互性极为有限，通常只涉及鼠标点击等基本操作。这可能导致艺术作品与观众之间的互动略显乏味。随着疫情的到来以及新一代网络技术的兴起，越来越多的艺术家开始在互联网上展示自己的艺术作品。然而，交互性的缺乏可能会妨碍观众获得真正引人入胜的体验。

### 3.3 实体化网站

实体万维网为网页设计提供了全新的视角，将万维网这一无形世界带入物理领域，从而加强了两者之间的联系。在 Jorge Garza 等人开展的研究中， [7], 网页上的交互元素（例如按钮）被转化为现实世界中的实体按钮。

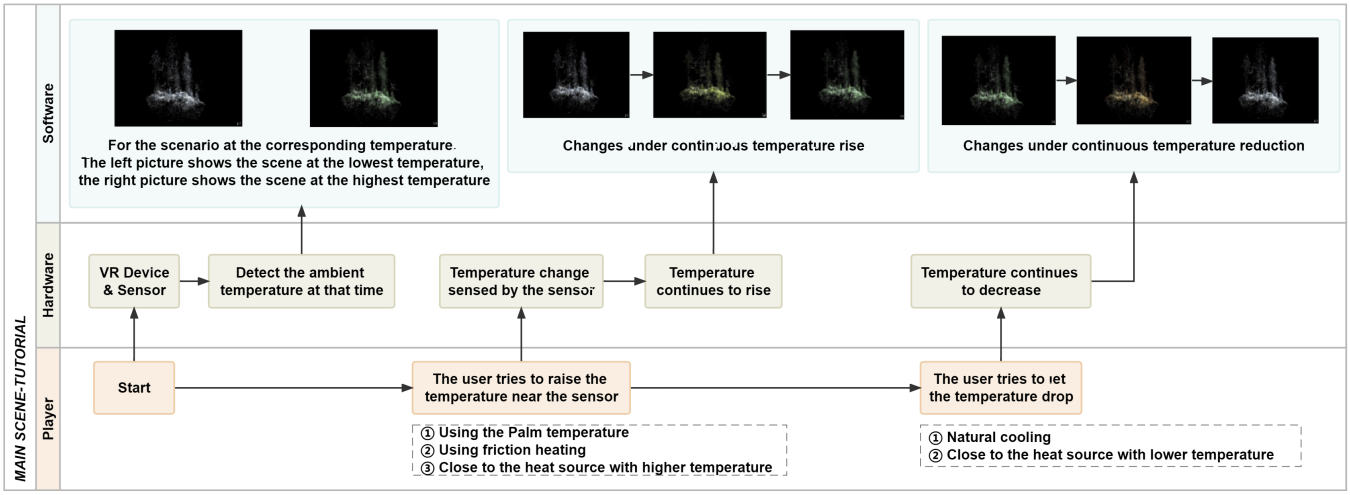



**图 2：系统流程图。用户、硬件与场景之间的逻辑关系。初始化时，如果环境温度小于或等于最低温度（15 °C），系统将显示冬季场景。如果温度超过最高温度（25 °C），系统将显示夏季场景。温度在 15°C 至 25°C 之间时，系统会随机显示秋季或春季场景。初始化后，如果温度从低变高，系统会呈现冬季到春季或秋季到夏季的变化。如果温度从高变低，系统则会呈现夏季到秋季或春季到冬季的变化。**

类似地，Ashrith Shetty 等人 [25] 创建了一个可触摸的网页，让视障人士能够用手感受网页的布局。Jiasheng Li 等人 [16] 提出了一种设备，可提供实时触觉反馈，帮助视障用户了解网页的布局。

Tangible Web 提供了一种独特的方式，让用户可以通过两种方式与网页交互。首先，它将无形的万维网具象化，使用户能够亲手触摸。其次，现实世界中的物理交互可以影响网页内容。这为在万维网上展示艺术作品带来了新的交互与创造力可能。通过利用物理系统，物理世界中的变化可以影响网页内容，从而带来更动态、更具吸引力的交互。这种方法可用于在万维网上展示艺术作品，使其对用户而言更具互动性，视觉效果也更吸引人。

## 4 系统设计与实现

所提出的艺术作品利用温度感测和 WebVR，为用户带来一种独特体验：物理世界会直接影响网络环境。本节详细介绍其背后的总体架构

### 4.1 系统设计

所提出的艺术作品旨在打造一种沉浸式体验，以响应传感器检测到的环境变化（见图 2）。用户须佩戴配有传感器的 VR设备参与体验。这些传感器会在设定时段内记录温度并计算平均值。系统根据记录的温度显示相应场景（见图 3）。作为概念验证系统，我们实现了分别对应最低温度和最高温度的两个场景，

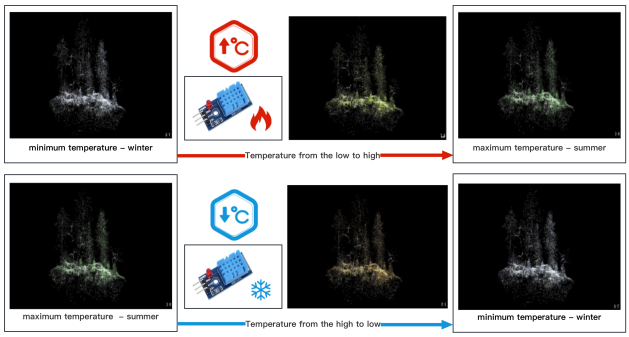



**图 3：场景设计。场景从高温向低温以及从低温向高温的转换。**

分别设置了两个温度阈值，以触发相应场景的显示。低于较低阈值时，系统显示低温场景；高于较高阈值时，系统显示高温场景。若温度介于两个阈值之间，系统则随机选择一个场景。用户可以通过多种方式改变传感器周围的温度，包括利用手掌温度升温、产生摩擦热，或将传感器移近热源（见图 3）。这会使场景从低温转变为高温。用户也可以通过自然冷却，或将传感器放在冷源附近来降低温度，使场景从高温转变为低温。

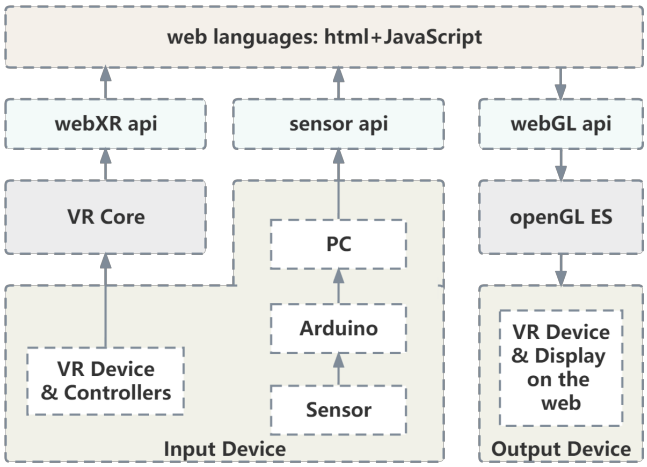



**图 4：技术架构。该图描述了输入信号如何被编译为 Web语言，并显示在 VR设备的网页中。我们通过 WebXR API 和传感器API将 VR 和传感器应用转换为 Web语言，然后通过 WebGL API 在万维网上呈现三维场景，让用户在 VR设备中体验万维网。**

## 4.2 实现

该系统以 WebVR 体验的形式实现，通过采集用户附近温度探头的数据来运行。我们使用 Arduino微控制器接收并处理来自探头的数据，然后通过串行端口将数据发送至个人电脑。个人电脑对数据进行处理，以控制 VR设备的显示（如图 4 所示）。我们对两种传感器进行了实验：湿度传感器（DHT11）和火焰传感器（红外接收模块）。DHT11 是一种数字温湿度传感器，测量范围为 0 °C 至 50 °C，适用于大多数场景。我们将 DTH11 的输出端连接到 Arduino 的数字输入输出端口。此外，火焰传感器（红外接收模块）通过其独特的红外接收管检测火焰，并将火焰的亮度转换为数字或模拟信号输出。虽然它无法检测温度变化，但这一特性为系统交互开辟了新的可能性。不过，我们提醒用户不要在危险环境中使用明火。

Arduino 通过串行端口与计算机进行通信。我们编写代码，以 9600 的波特率和 8 个数据位持续接收串行端口数据。数据处理完成后，通过有线或无线连接控制 VR设备的显示。系统连接成功后，用户便可以通过传感器体验虚拟世界中的变化。

我们使用 Unity 实现了该系统，Unity 通过 Emscripten编译工具链将运行时代码编译为 JavaScript 文件。.NET 游戏代码首先通过 IL2CPP 编译为 C++ 文件，然后再使用 Emscripten编译工具链将其编译为 JavaScript 文件（如图 5 所示）。

随着温度传感器向计算机传输不同的数值，用户在 VR设备中看到的场景也会随之发生变化（见图2和图1）。当温度降至最低时，用户将看到雪林场景；随着温度升高，

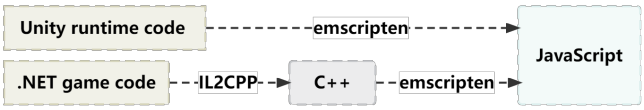



**图 5：Unity 中的工作流程。该图展示了 Unity 如何将运行时代码和 .NFT 游戏代码交叉编译为 Web语言。**



**图 6：用户与我们的系统进行交互。用户可以同时控制控制器和传感器，并观察场景变化。**

用户看到的场景将从白色变为绿色，象征着冰雪消融的过程。温度最高时，用户将看到翡翠森林。然而，随着温度降低，翡翠森林将逐渐变成黄色和白色，象征着从盛夏到冬季的过渡。

## 5 用户反馈

我们向不同受众展示了我们的工作，包括艺术家和设计师（分别标记为 A1、A2 和 A3）、策展人（分别标记为 C1、C2 和 C3）以及普通受众（分别标记为 G1、G2、G3、G4、G5 和 G6）。这些交流使我们获得了来自具有多元视角和专业知识的人员的宝贵反馈与见解。此外，我们还获得了相关机构伦理委员会对研究的批准。

### 5.1 受众对创新虚拟环境反响积极

大多数观众认为我们的虚拟环境富有创新性且美观宜人。然而，少数观众，尤其是 C1 和 A3，起初难以在虚拟环境中进行导航，并产生了迷失感。在我们解释设计过程并提供示例后，他们更加欣赏该环境的美学特质。包括 C1、C3、G2、G3 和 A1 在内的几位观众尤其对虚拟环境中的场景变化印象深刻，并称赞其鲜艳的色彩以及

神奇的变换过程是其中的亮点。尤其是 G1 和 C1 认为冬季环境在视觉上令人感到舒适和放松。C1 甚至提出，可以根据场景中的视觉元素设计纪念品。最后，C5 表达了对环境中能够触发场景变化的交互元素的赞赏。

### 5.2 互动艺术装置

观众欣赏由点云生成的虚拟场景，这帮助他们更好地理解场景背后的新故事。例如，G4 评论说，场景中的温度变化导致季节更替，这很合理。它在虚拟环境中映照了现实生活中的行为，让探索过程充满乐趣。同样，G2 也很欣赏虚拟场景的互动性，而此前他并未充分意识到这一点。这种互动方式激发了他的兴趣，让他迫不及待地想进一步探索。

艺术家 A1 和 A2 称赞这种新型交互形式，让他们能够创作新的艺术作品。他们指出，可以利用这一系统开发互动艺术装置，让访客深入参与作品并体验到联结感。这一系统无疑将有助于他们未来的艺术创作。

### 5.3 创作回应个人行为的艺术

交互艺术已成为当今艺术的主流形式，探索现实与虚拟世界之间的交互对于艺术家和设计师具有重要意义。使用该系统的体验为他们在创作过程中提供了新的思路。然而，仍需通过引入动作捕捉系统来增强手势交互。

策展人对能够吸引玩家的新颖艺术形式更感兴趣，但他们也优先考虑设备管理的便利性。因此，他们需要一个集成且易于管理的系统。

对于普通观众而言，通过个人行为影响艺术作品变化的机会是一种新颖而令人兴奋的体验，让他们感到自己拥有如同神明般的力量和掌控感。然而，如果传感器过于简单或受限，他们可能会逐渐失去兴趣，因此需要持续的刺激来保持参与度。因此，强烈建议融入更多随机元素，以提升体验。

## 6 讨论

本文提出了一种创新方法，通过将温度和湿度等物理世界传感器与 Web XR 应用相结合，改善沉浸式网页体验。交互式虚拟现实系统“Tangible Web”帮助我们将现实世界数据传输到虚拟现实世界，为 Web 虚拟现实赋予了更多功能，并使用户能够以更加深入且真实可感的方式与虚拟现实环境进行交互。

通过用户反馈，我们深入了解到系统如何满足不同相关方的需求。艺术家对我们的系统反响良好，他们认可该系统为创作带来新机遇的潜力。这与以往的研究一致，这些研究强调了在创作过程中融入新技术的重要性 [14, 23]。策展人也给予了积极反馈，称赞系统的新颖性，并强调系统集成、存储便捷性和管理的重要性。这与此前的研究相符，凸显了博物馆和展览环境中用户友好型技术的重要性 [5, 13]。最后，观众对系统的可玩性以及他们参与艺术作品的能力反应积极。不过，一些观众表示希望系统更加开放，让他们能够与预设作品互动，并参与创作新的艺术作品。因此，我们的系统有望进一步完善，以满足更广泛利益相关方的需求和期待，同时为艺术家在各自领域探索和创新开辟新的机遇。

我们的研究参与者强调了在互动艺术装置中融入惊喜元素的重要性。这一观点与一项关于不确定性对积极事件影响的研究结果一致 [35], , 该研究发现，积极事件发生后的不确定性能够延长其带来的愉悦感。通过融入随机元素，在数字世界与物理世界之间建立意想不到的新颖联系，可以显著提升整体用户体验。

### 6.1 不同的应用领域

Tangible Web 的潜在应用远不止博物馆和展览，还涵盖游戏、教育和医疗保健等多个领域。

例如，在游戏场景中，融入物理传感器可以增加风和温度等真实元素，从而提升游戏体验，为玩家营造更加宏大且富有情感冲击力的场景。在冒险游戏中，一些艺术家和设计师提出的动作捕捉系统可用于创造更加逼真、响应更加灵敏的角色动作，进一步增强游戏的沉浸感。此外，设计师和艺术家可以运用广为人知的人格特质理论，例如大五人格理论，以及 Brain Hex 等模型，根据受众的人格特征和偏好，量身定制互动艺术装置，以满足他们的期望 [19]。通过这种方式，他们能够创造出更具沉浸感、能够引发受众深层共鸣的内容，使其更令人难忘，并产生更深远的影响。

在教育情境中，Tangible Web 通过响应实体传感器，提供了一种互动性强、引人入胜的学习方式。例如，关于植物生长的《科学》课程可以使用传感器监测温度、湿度和光照强度，并据此调整虚拟花园中显示的插图。学生可以与花园互动，观察环境变化如何影响植物生长，并了解其背后的科学原理。这种方法鼓励主动学习，帮助学生加深对科学概念的理解，并培养批判性思维能力，从而助益他们未来的学业和职业发展 [11]。

在医疗保健环境中，Tangible Web 可用于创建能够响应物理传感器的交互式治疗工具。例如，引导患者进行呼吸练习的虚拟现实体验可以整合测量心率的传感器。

速率和呼吸。虚拟环境将实时调整，以提供反馈并帮助患者实现最佳呼吸模式。这对于焦虑、压力或慢性疼痛患者尤其有用。

## 6.2 自我决定理论与Tangible Web

自我决定理论（SDT）是一种可应用于交互艺术装置设计的动机理论。该理论提出，人类具有三种基本心理需求：自主性、胜任感和关联感 [19, 29]。自主性是指个体需要感受到自己能够掌控自身的行为和决策。胜任感是指个体在行动中感受到自身具备能力并能够有效发挥作用。关联感是指个体需要感受到与他人的联系，并拥有共享感和归属感。

将自我决定理论（SDT）的原则融入互动艺术装置中，可以提升用户的动机和参与度 [10]。例如，允许用户通过自身行为控制艺术作品的表现，从而赋予他们自主感，可以增强他们与作品互动的动机。设计师还可以通过提供机会，让用户在与艺术作品成功互动的过程中展现胜任感，并在物理现实与虚拟现实之间建立新的联系，来提升用户的动机和参与度。此外，设计师可以鼓励协作互动或共享体验，并借助虚拟世界和现实世界中的共同感受，培养用户的关联感。因此，设计师将自我决定理论的原则与 Tangible Web 所支持的新特性相结合，便能为用户参与互动艺术装置带来更令人满意、更有意义的体验。

## 7 结论与未来工作

在现代社会，如何利用数字技术和交互方式提升旅游的用户体验与乐趣，是一个经常被讨论的问题，尤其是在流行病限制人们出行能力的情况下。当我们进行虚拟场景游览时，往往倾向于关注虚拟场景与现实场景有多么相似，而不是关注虚拟场景如何增强现实场景，以及现实场景如何反过来丰富虚拟场景。我们或许能够欣赏眼前景色的壮丽，以及虚拟场景中季节与天气变化所带来的美妙感受。然而，要让我们充分沉浸其中，就必须将交互技术融入虚拟体验的设计之中。事实证明，这一策略能够给观众留下深刻印象，因此有望成为提升虚拟游览的用户体验与乐趣的一种有效方法 [31]。

当前虚拟现实技术的研究与开发，着重于将现实中的五种感官体验（包括触觉）精准传递到虚拟环境中。无论技术是否可用，问题依然存在：我们如何才能最大限度地缩小现实与虚拟世界之间的差异？为实现这一目标，我们有必要反思各种技术在创造沉浸式体验方面的潜力，确保体验与受众的情境相关，同时关注项目的专业与伦理方面 [9]。当故事能引起访客共鸣，让他们感觉自己仿佛成为新现实中的主角时，他们便会深深着迷 [12]。

虚拟现实技术的可扩展性支持持续升级内容并开发互动体验，为后疫情时期提升游客体验与乐趣创造了机会。诸如“可触摸的万维网”之类的互动技术，能够打造沉浸式环境，拉近虚拟现实与物理现实的距离，模糊两者之间的界限。这些环境可针对各种应用进行定制，提供一系列体验，以满足不同受众的需求。借助这些进步，我们可以打造更具吸引力、更令人着迷的虚拟游览，为用户带来独特而难忘的体验。

未来的工作将着重开发适用于多种传感器的应用，以打造更稳健的交互体验。此外，开发模块化创作工具也是一项重点，让用户能够根据自身需求，自定义添加相应的传感器模块。我们还将开发交互式异步通信系统，以提升用户在在线社区中的黏性。目标是将这种体验带入元宇宙，提升交互体验并加强与现实的联系。最后，元宇宙中的生态艺术也是一个值得探索的可持续发展方向，例如智能社区、智慧城市，以及虚拟创意生产的可持续性。

## 8 致谢

本研究部分获得了香港科技大学（广州）的 MetaUST 项目以及芬兰科学院的 FIT 项目（资助编号：325570）的支持。

## 参考文献

[1] A-Painter。2023年。绘画已保存！检索于2023年2月7日，网址：https://aframe. io/a-painter/ [2] Rajaram Bhagavathula、Brian Williams、Justin Owens 和 Ronald Gibbons。2018年。虚拟现实的现实：真实环境与虚拟环境中行人行为的比较。载于人体因素与人体工程学学会年会论文集，第62卷。SAGE Publications Sage CA：洛杉矶，加利福尼亚州，2056–2060。[3] HubSpot 博客。2023年。您的代理机构应当探索的14种最佳交互内容工具。检索于2023年2月7日，网址：https://blog.hubspot.com/agency/easy-to-use-interactive-content-tools[4] CNBC。2023年。2022年虚拟现实头显销量下滑后，元宇宙开局前景堪忧。检索于2023年2月7日，网址：https://www.cnbc.com/2022/12/28/metaverse-off-to-ominous-start-after-vr-headset-sales-shrank-in-2022.html[5] Gabriela Dumitrescu、Cornel Lepadatu 和 Cristian Ciurea。2014年。创建用于教育和文化发展的虚拟展览。经济信息学18，1（2014），102。[6] 虚幻引擎。2023年。虚幻引擎5。检索于2023年2月7日，网址：https: // www.unrealengine.com/en-US/unreal-engine-5 [7] Jorge Garza、Devon J Merrill 和 Steven Swanson。2021年。Appliancizer：将网页转化为电子设备。载于*2021*年 *CHI* 计算系统中的人为因素会议论文集。1–13。[8] Andrew Gelman 和 Antony Unwin。2013年。信息可视化与统计图形：不同的目标，不同的表现形式。计算与图形统计学杂志22，1（2013），2–28。[9] Claudio Germak、Andrea Di Salvo 和 Lorenza Abbate。2021年。博物馆中不可进入区域的增强现实体验。（2021年）。[10] Reza Hadi Mogavi、Yuanhao Zhang、Ehsan-Ul Haq、Yongjin Wu、Pan Hui 和 Xiaojuan Ma。2022年。用户如何看待促销型游戏化方案？问答网站中的一项定性案例研究。*ACM* 人机交互论文集6，CSCW2（2022），1–34。[11] Reza Hadi Mogavi、Yankun Zhao、Ehsan Ul Haq、Pan Hui 和 Xiaojuan Ma。2021年。同步在线课堂中学生主动学习的障碍：特征分析、反思与建议。载于第八届 *ACM Learning@Scale* 会议论文集。101–115。[12] Dai-In Han、M Claudia tom Dieck 和 Timothy Jung。2018年。城市遗产旅游增强现实应用的用户体验模型。遗产旅游杂志13，1（2018），46–61。

[13] Ilse Harms 和 Werner Schweibenz。2001。评估博物馆网站的可用性。（2001）。[14] Youngseung Jeon、Seungwan Jin、Patrick C Shih 和 Kyungsik Han。2021。FashionQ：一种由人工智能驱动的创造力支持工具，用于促进时装设计构思。载于*2021*年 *CHI* 计算系统中的人为因素会议论文集。1–18。[15] Kevin Kelly。2017。必然：理解将塑造我们未来的*12*种技术力量。企鹅出版社。[16] Jiasheng Li、Zeyu Yan、Ebrima Haddy Jarjue、Ashrith Shetty 和 Huaishu Peng。2022。TangibleGrid：面向盲人用户的实体网页布局设计。载于第*35*届 *ACM* 用户界面软件与技术年度研讨会论文集。1–12。[17] Igor Mayer、Geertje Bekebrede、Casper Harteveld、Harald Warmelink、Qiqi Zhou、Theo Van Ruijven、Julia Lo、Rens Kortmann 和 Ivo Wenzler。2014。严肃游戏的研究与评估：迈向全面的方法论。英国教育技术期刊45，3（2014），502–527。[18] Greg J McInerny、Min Chen、Robin Freeman、David Gavaghan、Miriah Meyer、Francis Rowland、David J Spiegelhalter、Moritz Stefaner、Geizi Tessarolo 和 Joaquin Hortal。2014。面向科学与政策的信息可视化：吸引用户并避免偏见。生态学与进化趋势29，3（2014），148–157。[19] Reza Hadi Mogavi、Chao Deng、Jennifer Hoffman、Ehsan-Ul Haq、Sujit Gujar、Antonio Bucchiarone 和 Pan Hui。2023。你最喜爱的游戏玩法充分揭示了你的特征：预测用户行为和 Hexad 类型。*arXiv* 预印本 *arXiv:2302.05623*（2023年）。[20] MoonRider。2023年。Sidequest 上的 Moon Rider——Oculus Quest 游戏和应用，包括 AppLab 游戏（Oculus app lab）。检索于2023年2月7日，来源：https: //sidequestvr.com/app/951/moon-rider [21] BBC News。2023年。Facebook 更名为 Meta，进行重大品牌重塑。检索于2023年2月7日，来源：https://www.bbc.com/news/technology-59083601[22] Nick Pidgeon、Christina Demski、Catherine Butler、Karen Parkhill 和 Alexa Spence。2014。为能源政策创建全国性的公民参与流程。美国国家科学院院刊111，增刊_4（2014），13606–13613。[23] Daniel Rees Lewis、Emily Harburg、Elizabeth Gerber 和 Matthew Easterday。2015 年。构建支持工具，将新手设计师与专业教练联系起来。载于 *2015* 年 *ACM SIGCHI* 创造力与认知会议论文集。43–52。[24] Ralph Schroeder。1996 年。可能的世界：虚拟现实技术的社会动态。Westview Press, Inc。[25] Ashrith Shetty、Ebrima Jarjue 和 Huaishu Peng。2020 年。面向盲人和视障人士的实体网页布局设计：初步研究。载于 第 *33* 届 *ACM* 用户界面软件与技术年度研讨会附属论文集。37–39。[26] David Spiegelhalter、Mike Pearson 和 Ian Short。2011 年。将对未来的不确定性可视化。《科学》333，6048（2011），1393–1400。[27] Victor J Strecher、Todd Greenwood、Catharine Wang 和 Dana Dumont。1999 年。交互式多媒体与风险沟通。《*JNCI* 专刊》1999，25（1999），134–139。[28] Ayoung Suh 和 Jane Prophet。2018 年。沉浸式技术研究现状：文献分析。《人类行为中的计算机》86（2018），77–90。[29] April Tyack 和 Elisa D Mekler。2020 年。人机交互游戏研究中的自我决定理论：当前应用与开放性问题。载于 *2020* 年 *CHI* 计算系统中的人为因素会议论文集。1–22。[30] Unity。2023 年。Unity。检索日期：2023年2月7日，网址：https://unity.com/ [31] Krzysztof Walczak、Rafal Wojciechowski 和 Wojciech Cellary。2006 年。面向教育的动态交互式虚拟现实网络服务。载于 *ACM* 虚拟现实软件与技术研讨会论文集。277–286。[32] WebGL。2023 年。Khronos 组织。检索日期：2023年2月7日，网址：https: //www.khronos.org/webgl/ [33] WebVR。2023 年。将虚拟现实带到万维网。检索日期：2023年2月7日，网址：https://webvr.info/ [34] webXR。2023 年。沉浸式网络/webxr：WebXR 设备 API 规范的代码库。检索日期：2023年2月7日，网址：https://github.com/immersive-web/webxr[35] Timothy D Wilson、David B Centerbar、Deborah A Kermer 和 Daniel T Gilbert。2005 年。不确定性的乐趣：以人们意想不到的方式延长积极情绪。《人格与社会心理学杂志》88，1（2005），5。