构建异托邦作为话语游乐场的框架：

非沉浸式与沉浸式技术的比较分析

Elif Hilal Korkut[1] 和 Elif Surer[1,*]

[1] 建模与仿真系，信息学研究生院，中东技术大学，土耳其安卡拉 06800

*通讯作者：
副教授 Elif Surer 建模与仿真系 信
息学研究生院 中东技术大学 土耳其
安卡拉 06800elifs@metu.edu.tr

Elif Hilal KORKUT（elif.korkut@metu.edu.tr）是中东技术大学多媒体信息学专业的硕士生，拥有建筑学学士学位。她对生成算法、计算设计、展览与陈列设计、视觉与视觉性，以及游戏技术感兴趣。

Elif SURER（elifs@metu.edu.tr）目前在中东技术大学研究生院信息学多媒体信息学项目担任副教授。她的研究兴趣包括严肃游戏、虚拟现实/增强现实和强化学习。

构建异托邦作为话语游乐场的框架：非沉浸式与沉浸式技术的比较分析

摘要

话语空间体现了通过积累而获得的知识的重新排序。在数字时代，多媒体已成为信息的语言，而档案实践的空间则由非沉浸式技术提供，导致话语活动中的若干层次消失。异托邦是独特的、多层次的知识语境，通过信息交换与其他系统相连。本文阐述了一个基于异托邦、为虚拟现实、混合现实和个人计算机环境构建框架的过程，以补足缺失的层次。本研究将虚拟博物馆空间视为包含“世界中的世界”的信息地形，并将场所营造呈现为异托邦的一个层次以及话语的主题。通过各种排序与分组算法，以及二元空间分割、元胞自动机、生长算法和程序化房间生成等程序化内容生成算法，实现个人多媒体内容的自动化。研究通过一项涉及30名参与者的用户研究，对该框架的不同版本进行了比较评估，考察了可用性、技术接受度和临场感等因素。研究结果表明，该框架可适用于多种语境，用于构建多层次的数字栖居地，并且能够灵活融入专业与日常生活实践。

关键词：虚拟博物馆、虚拟现实、艺术与媒体、设计工具、智能用户界面、文化、设计研究、人机交互设计理论、多模态用户界面、用户界面。

1. 引言

每种文化、领域和个人都会通过选择某些元素、排除其他元素，并按特定顺序重新排列这些元素，创造出不同的沟通与知识建构方式。其形成过程和所受限制可能各不相同，但这些单元的意义与知识生产，是通过叙述和阐释实现的（Maciag，2018年）。数字信息日益普及且更易获取，这得益于数字化和数字化处理等过程，并改变了话语实践。行动者借助技术系统，围绕由多媒体构成的新兴“无形态知识混沌”进行叙述，以生产、消费和保存信息（Manovich，2001年）。技术提高了用户获取信息的可达性和可用性；然而，随着技术的广泛普及，以及人们对个人电脑和移动电话的依赖日益加深，系统的广泛应用促使日常生活和专业实践中的若干层次发生转化、消失和分离。Odom 等人（2014年）将这种状况描述为“无地方性”和“无形态性”。在缺少某些层次的情况下，用户不断将现实中的交互和定制映射到数字环境中的“虚拟拥有物”上。

异托邦作为一个多层次的话语空间，可以借助福柯的异托邦概念，探索这一新领域中缺失的层次。福柯将异托邦称为“强化知识的抵抗区域”（福柯，2008）。本研究通过异托邦这一概念，探讨了专业与个人“档案实践”中，实现全面生产、表征和阐释过程所必需的层次。福柯提出了构建话语的几种策略：“操作台”、“涌现面”、“界定权威”和“分类网格”（福柯，2019）。基于异托邦的层次及其整合话语策略的潜力，我们提出了一个框架，借助融入个人档案的沉浸式技术，支持用户创建自己的数字栖居地。

异托邦的抵抗通过对功能的调整和更改得以实现，而这些调整和更改源于动态的权力关系，这是异托邦的一个关键层次。在现代性中，个人被视为“抵抗焦点”，能够结合自身所关联的系统，塑造并操控体验与产品（Thompson，2003）。个人与系统共同成为“界定权威”。所提出的框架赋予异托邦以动态性，使其能够根据用户需求进行调整；用户还可以导入各种格式，构建内容层和基于面向对象编程的模块化结构。该框架赋能个人在沉浸式环境中依据自身内容创建体验，并成为其中的权威。

异托邦通过将多个空间并置并组合于同一场所，为人们提供观察世界的另一种视角，以及探索不同思维方式的机会；它们对来自“涌现面”的既定知识提出质疑。该框架发挥着“操作台”的作用，拓展了异托邦的空间，并使用户能够在不断变化的情境中与多媒体语言的元素互动。异托邦是动态的物理或虚拟空间，存在于常规时空秩序之外。它们提供空间层，以便重新排列信息（福柯，2008）。该框架提供了“规格网格”，构成“流动建筑”，用户可据此根据自身需求创建场所（Novak，1992）。其中包含程序化生成算法（PCG），能够提供

不同程度的自主性，同时提供若干建筑元素。由此，该框架提供了另一层，可将其解读为空间的意义，而这一空间包含复杂关系。这一层涵盖空间如何被不同人群及赋予其意义的语境所叙述、呈现或理解（Lehtinen，2022）。

通过具身性，混合现实和虚拟现实技术有望创造异托邦的空间层：它们能够构建沉浸式、交互式的数字环境，模拟身处实体场所的感受，或将实体空间与虚拟空间融合，从而营造场所感，并使用户与周遭环境产生联系（Schultze, 2010）。虚拟现实（VR）和混合现实（MR）技术已得到广泛研究，旨在通过让用户参与文化遗产相关活动和仿真（Cecotti, 2022; Gonizzi Barsanti et al., 2015）、施工管理（Hepp and Hasebrink, 2018; Safikhani et al., 2022）以及建筑学（Akin et al., 2020; Prabhakaran et al., 2022）领域的活动与仿真，促进场所营造和知识生产。尽管这些研究证明了空间层的存在，但它们是针对特定领域开发的。因此，它们在多媒体方面不够全面，且只为目标领域提供操作台，因而无法应用于其他语境。

本研究特意选用“虚拟博物馆空间”作为统摄性术语，用以涵盖各类实体，这些实体兼具场所与媒体表征和再现层。虚拟博物馆中的展览通过以场所构建的叙述，创造出一个“世界中的世界”。福柯（2008）早已将博物馆定义为异托邦；然而，并非所有博物馆都是话语异托邦。现有应用表明，大量由虚拟博物馆构成的语料库，提供了真实博物馆的抽象副本或精确复制品，并基于预设路径设置孤立的交互（Cecotti，2022；Kersten 等，2017）。越来越多的研究将个性化融入静态、设计好的建成环境，从而对其加以改进（Foo 等，2009；Komianos 和 Oikonomou，2018）。虚拟博物馆应用提供了丰富多样的多媒体元素；然而，它们的功能是静态的，个人内容也仅限于图像。目前尚无系统具备整合文本、音频和三维图形等多种个人媒体的技术能力。此外，这些元素以数字化的“场所”形式提供，无法实现重新编排个人内容所需的可适应场所营造。因此，它们大多不具备操作台功能，也无法体现个人所表达的抵抗。

基于这些见解，我们开发了一个灵活框架，可为更广泛的受众和不同学科提供构建异托邦的方式，使该框架能够用于进一步研究和多样化实践。异托邦创建所需的空间层通过可供操控的建筑元素，以及纹理、照明和尺度选项来实现，并借助程序化内容生成算法提供支持，尤其适用于新手用户。此外，通过融入用户偏好，我们提供了不同的自动化级别。内容层和档案实践则通过多种算法实现，这些算法能够导入、存储和展示各种数据格式，并支持对个人内容进行分析和分组。结合容纳不同层次的能力，所开发的框架能够提供一个以异托邦为基础的游乐场。在整个设计过程中，我们遵循元设计原则，开发出一个灵活且模块化的框架，可根据用户需求进行调整，以适应不同语境。

本研究比较了用户在三个平台（个人电脑、虚拟现实、混合现实）上的体验，以了解不同技术带来的影响，为进一步增加沉浸式技术的集成提供参考。我们开展了一项比较用户研究，共有30名受访者参与。体验系统后，参与者完成了标准化的临场感、技术接受度和可用性问卷，以及针对系统的专项调查。随后，我们进行了半结构式访谈，以更深入地了解并解读前述步骤中收集的客观和主观数据。结果表明，我们成功地在不同技术平台上实现了标准水平的可用性和接受度，且该框架适用于不同语境。

虽然虚拟现实和混合现实技术能够提供二维界面所缺失的层次，但从元设计的视角来看（Fischer等人，2004年；Lee等人，2020），与基于个人电脑的工具相比，沉浸式技术仍有待更广泛地应用。要实现这一目标，需要采用新的人机交互方法，将这些技术融入日常的职业与个人生活中，从而在系统、用户、内容和场所之间建立全面的对话。

为了推导出能够促进沉浸式技术融入不同语境的设计特征，本研究旨在回答以下问题：

R1. 在异托邦的创建过程中，哪种媒介在可用性、临场感和技术接受度方面能带来更好的体验？R2. 不同版本的技术接受度、可用性和临场感在哪些尺寸上存在差异？R3. 哪种媒介更适用于与不同资产类型进行交互？R4. 不同媒介如何改变用户的设计方法？R5. 尺度、视角、照明和材质方面如何影响用户的体验与任务？R6. 程序化生成算法的自主性水平对用户偏好有何影响？

下文将回顾与沉浸式技术、虚拟博物馆和程序化生成技术相关的研究。为了便于阅读，并为用户分析作铺垫，我们将简要概述技术发展过程中涌现的概念术语。随后，我们将介绍所提出应用程序的各个方面，以及设计决策背后的依据。接下来，我们将说明评估方法和流程，然后呈现用户测试结果，探讨来自不同领域的相关概念。我们还将结合用户测试中涌现的扩展概念和术语，对结果展开讨论。最后，我们将总结本研究，并进一步探讨如何深入研究相关细节。

2. 文献综述

2.1. 话语与异托邦

米歇尔·福柯是一位法国哲学家，研究权力与知识塑造社会的方式。他指出，文化中存在着一些特定场所，称为异托邦，它们可视作一种

“现实化乌托邦”，在其中，文化中的其他场所得到呈现、争议和颠覆。异托邦的特点是能够并置和比较各种空间与概念，并可呈现为各种建筑形态、功能和尺寸（福柯，2008）。

米歇尔·福柯认为，话语，即思想与表征系统，在塑造我们对世界的理解方面发挥着重要作用。他指出了构建话语的几种策略：“操作台”、“涌现面”、“界定权威”和“规格网格”。操作台代表知识得以建构的空间，它作为分类和排列事物的手段，使我们能够理解事物。涌现面是新话语发展和新主体形成的基础，而界定权限则是一套规则，用以决定对象如何在话语中成为主体。规格网格是用于将对象排列成话语内部层级的一套概念分类法。通过理解这些策略，福柯阐释了话语如何塑造我们对世界的理解，以及我们在其中的行动（福柯，2005年）。

异托邦是能够容纳话语过程的独特空间。米歇尔·福柯指出了这些空间的各种特征，并举例说明，以帮助阐释和理解这些特征。米歇尔·福柯认为，所有文化都会产生偏差与危机的异托邦，例如寄宿学校和监狱。根据文化和时代的不同，这些空间在社会中可能发挥多种作用；其特征和功能也会随时间演变，从而带来抵抗。他认为，抵抗并非独立于权力关系，而是权力关系不可或缺的一部分。权力并非固定不变的实体，而是在交互中不断协商和争夺，由此使异托邦的功能发生更改（Lehtinen和Brunila，2021年）。异托邦是能够在同一位置汇集多个彼此不相容的空间和元素的空间，从而扰乱我们理解世界的方式。福柯还探讨了“话语秩序”，即支配知识生产的规则与系统的组织方式（福柯，2005年）。异托邦提供了组织信息的另类方式，而空间的布局会影响知识分享和理解的方式，从而提供“规格网格”。这些空间的特征和用途会影响人们通过具身性体验到的意义和感知。

异托邦是与特定时间段相联系的空间。它们既可以像档案馆或图书馆那样永久保存时间，也可以像展览或节庆那样，提供一个短暂窥见特定时代的窗户。在现代社会中，个人成为“抵抗焦点”；档案馆、图书馆和博物馆往往代表着个人选择与“自我塑造”，而个人则成为抵抗其所处的更大系统的塑造性权力的一个支点。这些个人成为“界定权威”，在系统的约束下塑造自己的产品（福柯，1972年）。

异托邦是出入受到控制的场所，这意味着它们不像公共空间那样可以自由进入。这种控制可以通过技术手段实现，例如使用具有开闭系统的设备或个人账户。异托邦是与周围环境有着特殊联系的场所。它们既可以揭示其他现实空间的本质，也可以

创造出一个有序空间，使其有别于其他场所的混乱。在话语语境中，这种关系形成了“涌现面”，新的思想、论点或观点由此产生，或在话语中凸显出来（福柯，1972年）。

2.2. 异托邦与数字游乐场

Rousseaux 和 Thouvenin（2009）通过叠加数字空间与实体空间，借助米歇尔·福柯的异托邦概

博物馆的潜力并非仅仅源于其展品，更在于展出物品与参观者之间的交互。这些交互，以及

遵循异托邦概念，当代感官层面的范式转变已在博物馆结构中发生。Google Art 和

随着数字媒体的采用以及对叙事的关注（即所谓的“叙事转向”），被称为“记忆机构”的美术馆、图书馆、档案馆和博物馆领域经历了转化。借助虚拟现实和增强现实、360度摄影、三维重建等技术，这些机构改造并创建了各类场所，并增加了对网站等数字空间的使用（Basaraba, 2021年）。沉浸式环境中的沉浸感和交互性旨在增强

用户在虚拟环境中的临场感；然而，这并不意味着数字环境完全由虚构元素构成。将实体文物重

虚拟博物馆与沉浸式文化遗产研究可以被解读为偏差与危机的异托邦。由于自然或非自然因素导致展品面临灭绝风险，因此需要借助数字媒介对其进行重建。技术进步重新定义了几乎所有领域的各种实践，也由此带来了偏差。此外，作为一场全球性危机，新冠肺炎疫情在人与地方之间筑起了边界，这推动了虚拟博物馆研究的发展，以提升可达性。

数十年来，游戏一直为场所营造活动提供支持，玩家可以塑造并影响游戏中的虚拟空间。这些活动包括建筑物、结构和景观的建造与构筑，也包括对这些空间外观的定制与装饰（Basabara，2021年）。对个人而言，这些活动提供了表达创造力、个性化虚拟空间的机会，并能培养其对游戏世界的归属感与依恋感；玩家在创造和塑造自己的空间时，也会因此感到自豪和有所成就。Boldi 等人（2022）通过电子游戏探讨危机技术。根据他们的研究，COVID-19疫情使人们的日常生活被限制在家中，导致一些人感到自己与惯常居住的地方失去了联系，并转而通过电子游戏逃避现实。一些人利用游戏探索有别于日常生活的虚拟世界，另一些人则借助游戏重建或替代那些已无法亲身前往、但对自己意义重大的地方。研究人员指出，可以设计游戏或在线社群，让人们探索和定制虚拟空间，以加深对这些空间的依恋，并重建失去的地方，帮助人们在日常环境中发现新的机会与意义。

2.3. 沉浸式技术

虚拟现实、增强现实和混合现实已得到广泛研究，并在各个领域有多种应用。虚拟现实已有公认的定义，而混合现实则有多种不同的描述方式，因此定义较为模糊。混合现实融合了增强现实和虚拟现实的元素，两者的融合程度决定了它在现实—虚拟连续体中的位置（Milgram 和 Kishino，1994年）。虚拟现实是一种技术，它通过立体视觉，在人工的计算机生成环境中运用对现实世界的视觉感知，并借助动作捕捉提供

沉浸式体验。Paul Milgram 和 Kishino 提出“增强现实”和“增强虚拟性”这两个术语，用来描述更接近这一光谱中心的环境。增强现实将虚拟元素映射到物理空间中，形成现实与虚拟的混合体，通常通过智能手机实现。混合现实技术利用头戴式显示器结合增强现实和虚拟现实的功能，例如微软的 HoloLens。

2.3.1. 界面与交互

用户界面（UI）是用户与计算机系统或应用程序之间的沟通方式。大多数个人电脑使用图形用户界面（GUI），通过图标、按钮和菜单等视觉元素，以及鼠标和键盘等输入和输出设备来显示屏幕。不同类型的界面包括表单填写，即用户将数据输入预先定义的表单或模板；以及直接操作（Shneiderman，1983），即用户以直接影响屏幕上对象行为的方式与其交互。命令语言是一组用户可输入的指令或命令，用于与计算机或软件程序交互，常用于终端等基于文本的界面。自然语言处理（NLP）使用户能够使用自然语言而非特定命令与计算机或软件程序交流，常见于语音助手和聊天机器人（Gilbert，2019年）。

沉浸式环境可能需要更具交互性的界面，并配备动作控制器或触觉反馈设备等专用输入设备。这些界面可包括头部追踪、手部动作追踪、语音控制、眼动追踪、身体动作追踪和虚拟手部操作。为了有效操作虚拟现实环境中的对象，交互技术应支持对象选择、定位和旋转。这些技术的设计通常涉及手部操作，对虚拟现实环境的整体用户体验十分重要（Mann 等，2022）。

2.3.2. 临场感、具身性与建筑体验

人体通过感官，从物理世界中获取、处理并呈现信息。虚拟世界是数字环境，用户可以借助与物理世界不同的技术与之互动。体验并与其中的物体、空间和人互动，需要依赖技术。临场感是指人在特定时空中感到自己身临其境的感觉，这种感觉常见于虚拟现实环境（Schultze，2010）。影响临场感强弱的因素包括环境中感官刺激的真实感、环境作为真实空间的可信度、用户对环境的参与度，以及用户已有的知识和预期。虚拟世界为考察人体在交流中的作用，以及不借助实体身体进行交流所产生的影响提供了机会（Spence，2020）。梅洛-庞蒂的哲学思想（Lehtinen，2022）强调具身性这一概念，即身体如何塑造我们对世界的感知和体验，同时又受到它们的塑造。他认为，身体不仅是我们与外部世界互动的手段，也在感知、理解和表达过程中发挥作用

。因此，身体对于我们的主体性以及我们对世界的理解至关重要。

在《体验建筑》中，Rasmussen（1964年）指出，对建筑物或空间的感官体验对于我们理解并与建成环境进行交互至关重要。他认为，评价建筑学应依据用户如何体验它，而不应仅看其审美或功能特质。Rasmussen探讨了视觉、声音、触控，甚至嗅觉和味觉等各种感官体验如何影响我们对建筑物或空间的感知。他解释说，我们体验建筑学的方式取决于我们对实体与空腔、图底关系、节奏、尺度、比例、声音、照明、色彩和纹理的感知。他将建筑形态的创造与解读过程分为两类：实体思维与空腔思维。实体思维的建筑学通过组合实体或空腔壳体来创造形态；空腔思维的建筑学则是从一个大型实体中雕凿出构件，以创造空间。Rasmussen将建筑学描述为“玩转实体与空腔的艺术”。

根据Luck（2014年）的观点，设计过程往往包含一些看似不协调、却有更深层目的的行为。这些与结构设计有关的动作象征着某种事物，并短暂地呈现出建筑概念以及建筑形态中预期运动感的视觉表征。这一过程被称为“审美生成”，体现了这些行为涌现背后的创造过程。建筑物的物理形态、它的体验方式以及它所引发的反应之间的关系，具有主观性、直觉性且错综复杂。

2.3.3. 可用性、接受度与信任

技术接受度是指个人或组织使用某项特定技术的意愿。通过了解影响技术接受度的因素，设计师和开发者可以创造出更有效、更具吸引力的技术（Rheingold，1991年）。可用性是衡量个人使用系统或产品实现目标的难易程度。它会影响用户的性能、效率和满意度，以及整体体验。影响系统可用性的因素包括用户的认知能力及其局限性，以及系统界面、组织方式和结构的设计（Salanitri等人，2015年）。

对技术的信任这一概念在人机交互（HCI）领域得到了广泛研究。既有研究表明，对技术的信任受可用性、技术接受度和临场感等因素影响，而这些因素也会相互影响（Lippert 和 Swiercz，2005年）。对技术的信任是一个多维概念，研究人员已经确定了若干有助于用户与技术之间建立信任的尺寸。这些尺寸包括可预测性（技术遵循既定性能标准的能力）、可靠性（在特定情境中对技术可信赖程度的感知）和效用（对技术有用性的感知）（Mcknight等人，2011年）。

2.4. 程序化内容生成

通过算法方法和模式，在几乎没有用户输入的情况下自动创建数字资产，这一过程称为程序化内容生成（PCG）。在游戏行业中，算法被用于创建道路网络、建筑物、生物，以及景观和植物等复杂内容。程序化内容生成不仅在计算机科学领域受到研究；科学领域的跨学科研究方法，包括生物学、建筑学、城市研究和心理学，也引发了其他社群日益浓厚的兴趣，程序化内容生成因此变得愈发重要（Prusinkiewicz 和 Lindenmayer，2012年）。随着程序化内容生成在制作中的重要性不断提升，研究人员正在探索新的方法，以便在有人类输入或没有人类输入的情况下生成高质量资产；因此，新的范式也随之兴起。机器学习（PCGML）和深度学习领域已发展出多种技术，例如神经网络、自编码器和深度卷积网络；马尔可夫模型、n 元语法和多维马尔可夫链；聚类；以及矩阵分解（Summerville 等人，2018年）。

设计师越来越多地利用自主工具，以更快的速度、以新颖的方式完成复杂任务。然而，这些方法具有确定性，可能反复产生相似的结果，且其创意用户体验或许不及手工制作和设计的内容。近期开发的技术大多旨在创建完全自主的方法。许多研究人员提出了自动生成平面图和建筑物的方法，但只有少数方法允许用户定制算法的最终产品。在建筑学领域，不支持定制的产品一直受到批评（Porter 和 Hanna，2006）。本研究旨在通过调整算法的自主性级别，并为用户提供一个可定制最终产品的“设计空间”，按需赋予用户对系统更大的控制权。因此，我们寻求能够为用户提供不同自主性级别和设计空间的方法。

此前，虚拟世界的大规模程序化建模通常只能生成缺乏内部划分和相互连接的空洞结构。为解决这一问题，人们提出了多种方法，包括瓷砖放置、房间扩展、由内向外扩展和细分。采用瓷砖放置策略时，会先对领域进行划分，再用代表房间的瓷砖填充所得网格。不依赖建筑物边界作为约束的由内向外算法，会根据房间连接要求来布置房间。基于生长的算法则将房间种子分散在建筑物各处，随后房间逐渐填满室内空间，并扩展至完整尺寸（Camozzato，2015年）。Lopes 等人（2010年）提出了一种用于平面图生成的受约束的基于生长的方法。在他们的方法中，房间的尺寸和位置由用户设定。随后，房间会不断扩展，直至呈正方形，再通过移动房间，用其他不规则形状填充空余空间。由于平面图可以划分为多个细分区域，因此可以连接相邻房间；同时，还会为每个房间生成带有门和窗户的细分区域。他们指出，复杂性低且数据结构有效，是其方法成功的主要原因。Wang 等人（2018年）提出了图式设计生成方法（GADG），这是一种基于从现有平面图中提取的图来自动创建矩形平面图的方法。他们开发了一种机制，通过将楼层布局映射到连通图，依据两种转化原则操控房间：加法和减法

。用户可以使用该算法指定所创建房间的最大宽高比。

建筑边界由细分算法用于将室内空间划分为房间。一种称为二元空间分割（BSP）的技术使用超平面递归地将空间划分为凸集。该细分过程将场景表示为一种称为BSP树的树形数据结构。Baron（2017年）研究了许多可应用于二维和三维项目的程序化材质生成方法。他们使用五种房间和走廊生成算法（随机房间放置、BSP房间放置、随机点连接、醉汉漫步和BSP走廊）来创建配对。针对室内语境，Yang等人（2022）提出了一种房间布局重建策略。为创建最佳室内多边形模型，他们结合了基于体素的房间分割与空间划分。该技术利用房间语义数据来划分子空间。

元胞自动机（CA）是用于建筑生成的另一种技术。元胞自动机对元胞应用一组规则，每个元胞都会根据其邻居单元执行这些规则。元胞可以具有有限数量的元胞状态。Herr和Kvan（2007年）展示了在单个元胞自动机模型中使用不同形状和尺寸的元胞，如何有助于探索建筑形态。

此外，他们还提出了一个将元胞自动机融入设计过程的理论框架。Araghi和Stouffs（2015年）探讨了用于高密度住宅建筑形态的元胞自动机系统。他们基于元胞自动机能够创建复杂规则定义这一特性，通过规则定义为密度、可达性和自然光等建筑问题探索解决方案。Cruz等人（2016年）讨论了经典元胞自动机元胞形状的变化，以推导出多种建筑上可行的形态，这些形态能够生成符合特定空间构型的聚合空间单元。

3. 设计依据与框架结构

基于有关异托邦与话语的文献，我们制定了一套规则，以确保方法论的一致性，并建立全面的框架结构。该系统应当：（1）具备动态的权力关系，并能灵活改变功能以产生抵抗；（2）在“操作台”上呈现多媒体元素的并置，从而实现特定交互；（3）通过个人与系统共同构建“界定权威”，为“自我塑造”和“抵抗焦点”提供基础；（4）通过创造幻象空间或由“分类网格”构成的有序空间，与其他场所建立联系；（5）能够根据用户的需求创造“流动建筑”，传达可通过具身性感知的空间特质。

在整个方法论中，我们着重强调终端用户开发和元设计原则，以赋能用户、创建设计空间，并鼓励新手和有经验的用户探索非正式使用场景。因此，为了简化我们集成的机制和功能，使用户能够成为其数字环境的策展人，我们参照此前有关多媒体的研究，谨慎地对这些机制和功能进行了选择，

以及有关建筑学和沉浸式技术的研究。后续章节将按照所提供的流程和层次，介绍虚拟现实、混合现实和PC技术的实现细节。

3.1. 将虚拟博物馆视为操作台

与以往的研究不同，本研究中的虚拟博物馆概念并非指数字空间中的静态“安置”。相反，它成为一种动态结构，一个操作台，用户可通过纳入、排除和转换元素对其进行操作。虚拟博物馆的设计可被视为一个无限的过程：始于文档记录，并在虚拟环境中通过想象与体验不断延续，从而形成多层次的话语空间。当个人数据经分类并存储于数字空间时，可将其视为数字档案。若数据被展示或播放，则视为单件展品；若在特定语境中展示多个文件，则视为数字展览。虚拟博物馆空间对文档记录进行分类，并通过建成环境以展览的形式展示档案，因此能够将个人档案转化为个人展览，构建“规格网格”。

通过实践体验，我们采用“博物馆空间”这一术语，以提高可用性并降低框架的复杂性。我们为该应用程序定义了两种不同模式，即策展人模式和访客模式。策展人模式指主动创建异托邦，而访客模式则不包含控制层。该框架为用户提供了一个系统，用于存储和展示数字内容，包括文本、图像、视频、三维模型和音频，并使其便于访问和操作。为了对项目进行分类，我们按照博物馆惯例为资产命名，例如绘画、雕塑等，并添加标签以提供更多数据。我们使用资产风格、艺术家、位置和时间数据，帮助用户自动重新排序异托邦系统。另一方面，该系统也允许用户进行操作和诠释。例如，用户可以根据不同变量，有条理地运用用于排序和分组的四个变量。

3.2. 用户与系统之间的对话

所提供的硬件、系统的总体结构、界面设计、交互和导航能力都会直接影响体验。例如，硬件决定了身体舒适度、交互方式和技术边界。界面与用户之间的对话会影响用户所创建的异托邦的诸多特征，并塑造用户体验。用户通过界面把握自主性水平。界面、交互和导航为话语空间和意义建构过程提供叙述。

3.2.1. 编程语言和开发环境

为消除虚拟现实和混合现实中由硬件差异导致的结果，本研究使用 Oculus Quest 2 头戴式显示系统来传输音频和视觉内容。借助名为透视功能的特性，利用头戴设备上的传感器，用户可以实时查看周围环境，同时观看虚拟内容。

本研究使用更广义的“混合现实”而非“增强现实”，主要是因为该设备兼具交互和锚定功能，融合了增强现实与虚拟现实。Oculus Insight 追踪系统由 Facebook 公司开发，并应用于 Oculus Quest 2。Oculus Insight 追踪依赖三路传感器数据流。持续的数据流可实现手势识别和物理环境感知，并提供控制器与手部的位置数据。研究使用 Oculus Quest 2 控制器作为交互设备，并采用手部追踪，让用户能够在虚拟环境（VE）中导航。虚拟环境中会显示控制器上的按钮，包括手部位置。Oculus Quest 2 会追踪头部运动，将正确的虚拟世界图像呈现给用户的双眼（LaValle 等，2014年）；它还会实时分析用户的头部运动以控制视野，从而实现自然交互，并带来较强的临场感和沉浸感（Desai 等，2014年）。头戴式显示器配有可调节头带，使双手能够腾出来操作控制器。头戴式显示器（503 克）与控制器（每个 126 克）的总重量为 755 克，便于长时间舒适使用。

该框架的所有版本均使用 Unity 开发。之所以选择 Unity 游戏开发平台，是因为它在业内其他竞争者中具有突出优势，而且它也是 Oculus Quest 2 的原生开发平台之一。Unity 游戏引擎兼容多种平台，包括桌面、移动设备、游戏主机、网络等。Unity 支持 C# 编程语言，该语言由微软为通用语言基础结构设计。它是一种通用、多范式的面向对象语言，开发者可用它构建能够在 .NET Framework 上运行的应用程序。一种名为“面向对象编程”（OOP）的编程范式基于这样一种理念：“对象”既可以包含数据，也可以包含用于操作这些数据的代码。面向对象编程中的对象是由信息和编程代码构成的独立单元。操作对象的代码旨在反映现实世界中对象的行为，而对象则用于表示现实世界中的概念或事物。面向对象编程的特点是采用封装，即将数据及操作数据的代码捆绑为一个单独的单元或对象。通过封装，框架能够开放地进行转化并添加功能。这种可变的结构使框架能够适应异托邦。除 Unity 外，由微软推动的混合现实工具包（MRTK）项目还提供了一系列构件和功能，用于应用程序中的虚拟现实和混合现实部分。三维模型在 RhinoCeros 和 Blender 中创建，并借助三维建模资源分发网站提供的模型进行增强，例如 CG Trader、Sketchfab 和 TurboSquid 等网站提供的左版模型。

3.2.2. 界面与交互

界面旨在引导用户逐层体验并构建异托邦。不同类型的层次通过不同的平面提供，并按顺序呈现。在界面设计方面，我们优先采用尤其适合新手用户的技术。例如，尽管命令行非常灵活，但由于命令语言通常很难学习，不适合非专业用户，因此我们没有加入任何命令语言交互。表单填充交互方式面向的是与命令语言不同的一类用户，即非专业用户。对于需要用户输入多项数据的任务，我们采用了表单填充式设计。例如，尺寸

生成算法的属性（图 1）和用于连接的 URL 以表单形式提供。为了通过预定义规则引导用户并简化数据输入，在适用的情况下，我们没有使用空白输入字段，而是优先使用滑块，直接向用户定义并展示取值范围。

菜单是显示在屏幕上的选项集合，用户选择并执行选项后，系统状态便会受到影响。用户通过基于菜单选择的系统，从菜单中预设的命令列表里选择命令。尽管这可能会减慢频繁使用系统的用户的操作速度，但我们倾向于在大多数情况下采用菜单交互，因为这对新手或偶尔使用系统的用户来说很理想。为了便于记忆并消除语言障碍，我们使用图标而非标签来表示命令／菜单项。为减少信息过载和视觉杂乱，我们根据各项功能将其归入不同的子菜单（图1）。在虚拟现实和混合现实版本中，只要该功能未关闭，菜单就会随着用户移动。在用户找不到主菜单时，我们加入了一个手部菜单，其中包含重新启动、退出和调出主菜单选项；用户可以通过手势和控制器上的按钮调出该菜单（图2）。为虚拟现实和混合现实设计的三维菜单还支持用户通过触控进行交互。

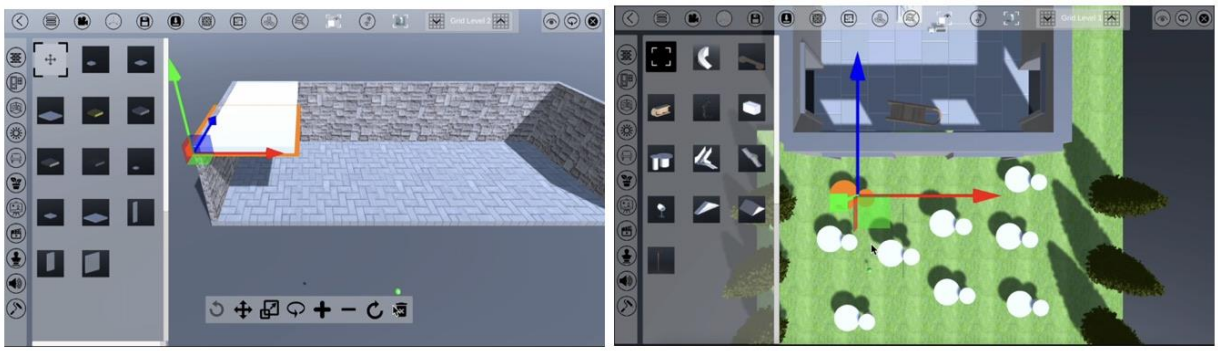


图1. PC版本的界面选项示例。

对于所有可放置到网格中的对象和三维界面元素，我们都采用了直接操纵原则。选中的对象会被高亮显示，并可根据不同版本通过手部、控制器，或鼠标和键盘进行直接操作。直接操作对于具身性尤为重要，因为它要求身体进行移动。通过这种分割，我们旨在防止模型发生意外更改，并从用户的视觉范围内移除不必要的UI元素，否则这些元素可能会干扰用户体验。所有版本的用户体验都从欢迎界面开始，随后进入用于导入数字档案的面板。经过分析的档案以及用于构建场所的环境元素，会通过一系列面板提供给用户，以构建话语栖息地。PC版本使用键盘和鼠标作为输入，而对于VR和MR版本，我们提供控制器和手部交互。手势是人机交互的构件，已成为多模态系统关注的对象。在本研究中，我们使用了六种手势，即指向、选择、释放、传送、呼出手部菜单和呼出主菜单（Oculus）。手部交互提供远距离交互和近距离交互选项。在所有版本中，用户都可以通过尺度调整、旋转或平移操作来操纵包括3D UI元素在内的元素。



图2。虚拟现实环境中的手部菜单和界面。

3.2.3. 导航

在创作个人博物馆体验时，用户应能够完全控制自己在博物馆中的导航，并能够以互动且灵活的方式自由探索和操纵对象，从而创造属于自己的虚拟体验。在策展过程中，用户不只是观察者，还可以通过建设性对话与展品进行交互。通过丰富审美感知，用户在虚拟博物馆中的整体过程和导航增强了理解，并持续保持兴趣。

在设计过程中，我们努力确保所有版本尽可能彼此相似。然而，不可避免的是，我们在个人电脑版本与其他版本之间的导航和交互方面采用了不同的方法。个人电脑版本包括四种摄像机视角：第一人称视角、俯视视角、等轴测视角和等轴测鸟瞰视角。所有摄像机均可通过 W、A、S 和 D 按钮进行控制；在俯视图中，还可以使用鼠标滚轮进行放大或缩小。此外，控制菜单中设有一个传送切换开关，用户可以通过单击鼠标左键将场景中的所有摄像机传送至其他位置。手势是人机交互的组成部分，已成为多模态系统关注的对象。手势通过 Oculus Quest 2 上的摄像机捕捉，并能够识别多种手势类型。在虚拟环境中，用户可以使用控制器或手势进行导航、行走或瞬移。标签用于定义允许瞬移的碰撞体。带有地板和地面标签的对象允许进行瞬移。为消除晕动症，我们没有添加通过控制器实现的移动功能。

3.3. 内容层：作为自我塑造与档案实践的行为

作为抵抗力量，个人应将决定“显现面”构成元素的行为视为一种自我塑造。档案实践作为分析话语及其构成元素的方法，包含了在操作台上进行自我塑造的行动。为实现自我塑造活动的自动化，我们构建了一套处理流程，其中包括导入个人档案并将其转换为可操作的人工制品。我们还依据博物馆的规格网格对档案进行了分析。

3.3.1. 导入文件与框架的界定权限

元素划定的第一层将根据媒体类型，呈现在框架所定义的操作台上。作为多媒体语言的构成元素，我们确定了五种资产类型及其博物馆对应项。可用于生成展品展示区的文件包括：.txt 格式的文本、.jpeg 和 .png 格式的图像、.obj 和 .fbx 格式的三维模型、.mp3 格式的音频，以及 .mp4 格式的视频。在这些限制范围内，作为抵抗焦点，用户可以根据自己的兴趣和偏好创建个人的 3D 数字展品收藏。对于 PC版本，我们编写了自定义文件浏览器，用户可通过它选择包含待上传至应用程序文件的文件夹。对于 VR 和 MR版本，出于设备安全属性的考虑，应用程序不使用文件浏览器，而是从 Google 云端硬盘提取数据。为提供此功能，我们采用了 Oculus 提供的虚拟键盘和一个输入字段，用户只能在其中填写数据文件的文件 ID。利用该 ID，系统会为 .JSON 格式的数据文件构建 Google 云端硬盘直接链接。数据文件必须包含待下载至框架数据库中的对象的文件 ID。

3.3.2. 艺术品类别

除资产外，用户还可以提供 .CSS 或 .JSON 格式的数据文件，其中包含展品的某些特征。数据列定义为名称、艺术家、风格、位置、时间、尺寸和描述。根据可接受的资产类型——绘画作品、雕塑、视频、音频和文本——构建了五个不同的类别，它们继承自基类。每件艺术物体都具有名称、描述、艺术家和风格等共同属性。根据类别的不同，还会获得不同的属性。例如，绘画作品和雕塑具有位置和尺寸属性。根据文件扩展名，该工具会将文件复制到数据文件夹中，并将其归入艺术品组。如果用户提供的数据位于该文件夹内，系统会将数据解析为数据列，并根据其类别为每一行构建一个新的艺术品对象实例。算法通过比较数据和文件来搜索匹配的名称，并为艺术物体构建字典和独立列表。如果未提供数据文件，实例化的对象会使用文件名作为名称，不显示描述面板，并采用通用比例。根据文件扩展名完成导入过程后，系统会在相应面板下为每个文件构建按钮，以便在虚拟环境中生成展品。对于绘画作品，按钮的精灵图直接使用文件本身；对于其他类型，则使用表示其类型的图标。按钮名称根据文件名生成。所有对象的放置方式将在网格系统中说明。

3.3.3. 艺术品容器

按照终端用户开发的理念，系统应提供自动化功能，将个人的资产转化为可供操作的展品，使用户能够通过对展品进行更改、制定计划和开展实验，并为其在虚拟环境和现实环境中寻找最佳位置而获益。基于面向对象编程的特性，系统为每种工件类型设计了一个工件持有者，其中包含

若干交互所需的脚本和元素。容器是层级中的较高层级实体，其位置、旋转和尺度均可操作。每个容器都包含一个用于放置简短描述的标签面板、一个用于容纳资产的游戏对象、一个用于打开艺术画布面板的详情按钮、一个用于操作的碰撞体，以及一个用于固定展品与标签之间空间的网格对象集合脚本。如果提供了绘画或雕塑资产的尺寸，资产的容器对象便会根据数据进行缩放，而展品展示区与标签之间的空间则保持稳定。此外，每个工件持有者都具有资产专属的功能。例如，视频和声音的容器配有播放和暂停按钮（图3）。



图3. 虚拟现实环境中的艺术品容器。

每种类别的工件持有者都被设计为预制件。按下展品按钮时，系统会根据相应的预制件构建工件持有者。如果提供了数据，标签上会显示名称、艺术家、风格、时间和位置等列。此外，我们还提供艺术画布面板，用于展示展品的描述列中的信息。视频、文本和绘画类展品以视觉形式呈现在面板左侧。声音和雕塑类展品则以图标表示。画布右侧设有详情区。用户还可以在展品分析面板中查看自己上传的所有资产列表，其中的信息按照展品分类提供。

3.3.4. 框架的展品分析与规格网格

资产首先按照格式进行分类，以构建易于访问的档案。如果提供了数据，就会将其解析为列，并根据四项规格对每类文物进行分组。该框架为档案索引提供三个字符串和一个整数，这些索引采用博物馆术语命名，分别为艺术家、风格、位置和时间。构建的列表通过展品分析面板呈现。这些分组还将用于程序化内容生成算法，以根据分组选项计算房间的尺寸。另一方面，用户可以根据数据类型生成不同类型的规格。

3.4. 空间层作为自我塑造与建筑元素的实践

在虚拟博物馆语境中使用建筑元素，主要是为了重新编排多媒体元素，从而构建规格的空间网格。本研究所说的“虚拟博物馆”并不一定指传统的建成环境。相反，它扩展了空间，并围绕用户形成一种“液态建筑”。每个置于其中的数字对象，无论是否属于建筑元素，都会成为信息。除了将其作为文物的分隔空间之外，我们还提出了场所营造实践，以提供“审美生成”体验，将其作为一种自我塑造的行为。

异托邦中的空间层次展现了这些空间的复杂性与多面性，以及它们承载的不同意义和功能。这些层次可以被视为由各种技术提供的不同现实层级。异托邦的一层空间意义，是它在现实世界中的实际物理位置及其在具体语境中的意义。个人电脑、虚拟现实和混合现实技术提供了与场所及场所营造相关的不同关系。与物理位置的关联则通过混合现实技术实现。根据具体语境，用户可以用数字元素改造物理空间，也可以创造完全数字化的不同场所。异托邦具有与个人体验方式相关的空间意义层次。通过具身性和远程临场感，技术为用户提供了无穷无尽的可能性。在本研究中，我们提出了建筑实践，以增强异托邦的转化效果，并希望通过具身性与临场感，为这些实践提供一个操作台。为了构建一个易于使用的通用框架，我们考察了建筑学研究，以确定其基本特征。根据 Rasmussen 在《体验建筑》中的研究，实体与空腔形态的感知、前景与背景元素的区分、建筑特征的尺寸与大小、比例与尺度的恰当运用、空间的声学、照明、纹理和节奏等多种因素，共同构成了建筑物或空间的整体感官体验。因此，我们旨在将这些元素引入技术景观。

3.4.1. 构造元素

在构建建筑元素时，我们将墙壁、地板、屋顶、窗户、楼梯和门确定为主要构造元素。此外，我们还添加了两个不同的类别：景观元素和家具。所有类别都显示在不同的面板中。主要元素以默认对象的形式提供，并且可以调整其位置、尺度和旋转。

3.4.2. 纹理、材质与颜色

在 Unity 引擎中，二维纹理会以平铺方式呈现，形成材质。墙、地板、屋顶、门和窗户对象均提供不同的纹理。为保证场所的一致性并提升易用性，同一图层中的通用对象共用相同的材质属性。我们添加了滑块，用于控制建筑对象所用材质的 RGB 值。此外，我们还为虚拟现实和个人电脑版本提供了不同的天空盒材质。

3.4.3. 尺度

尽管所有对象都可以缩放，我们仍添加了不同的尺度选项，以提升可用性。同样的墙、地板和屋顶瓦片也提供不同的尺度，例如 1x1、2x2 和 4x4。体验开始时，该框架会为虚拟现实和混合现实环境提供两种不同的尺度模式：人体尺度（1:1）和模型尺度（1:20）（图 4）。所有模型都会根据所选模式自动缩放。此外，垂直建筑构件会根据选定的网格高度进行缩放。

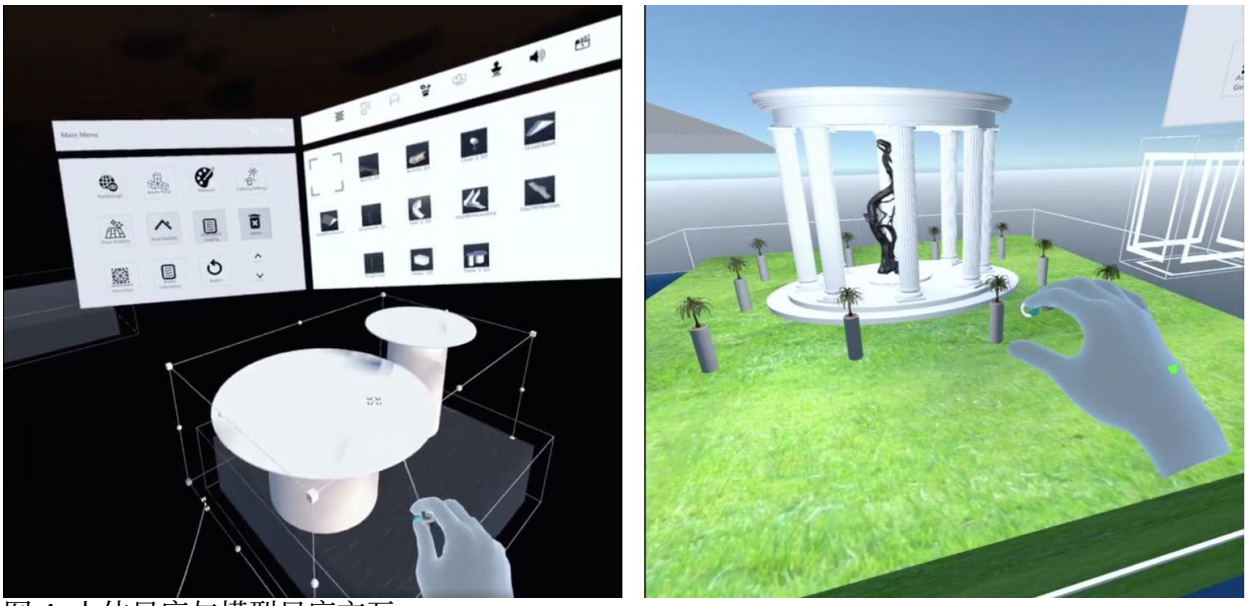


图 4. 人体尺度与模型尺度交互。

3.4.4. 照明设置

项目中使用了三种不同的光源：作为方向光的阳光、以灯带形式呈现的顶灯，以及作为聚光灯照明的艺术物体。在照明设置面板中，每种照明类型都有一个可打开或关闭的切换开关（图5）。此外还添加了一个滑块，用于控制光线的色温；温度值以开尔文为单位，并会转换为光线的色彩。



图5. 中性和暖色温下的文物。

3.4.5. 放置与网格系统

构建网格系统是为了提供放置和吸附功能，使对象对齐到正确位置，避免相互重叠。用户可以设置网格层级和网格高度属性。网格层级定义楼层数量，网格高度则定义墙壁的高度以及两个网格层级之间的距离。针对所有可放置对象（包括文物），创建了三种不同的可编写脚本对象（SO）。SO 是 Unity 引擎中的一种资产类型，可将数据保存为资源文件，而不是将其作为单一行为组件附加到游戏对象上。这样，数据便可独立于任何特定游戏对象存储，也便于在框架的不同部分重复使用和共享。第一种是地板对象，只能放置在标记为地面的层次上。网格系统用于将地板对象吸附到正确位置，并保存其位置数据。第二种包括放置在地板瓦片边缘的垂直元素，例如窗户、墙壁和门。每个地板对象都包含四个碰撞体，分别位于角点处。这样，在地板上放置垂直对象时，网格系统会在发生碰撞时根据地板对象的边缘吸附并旋转垂直元素。

第三类包括其他可放置在任意位置的元素和展品。所有可编写脚本对象类型都包含同一预制件的两种变体，即幽灵对象和已放置对象。可编写脚本对象上的初始代码会根据类型添加交互和层级所需的额外脚本。按下实例化按钮后，系统首先会生成一个幽灵对象，在混合现实和虚拟现实中，该对象会跟随指针移动；在 PC 版本中，则会跟随鼠标位置移动。根据版本不同，放置对象时可使用鼠标左键、右手的选择手势或右侧扳机键。若要取消选择，可使用鼠标右键、左手的选择手势或左侧扳机按钮。对于删除操作，系统添加了一个切换开关，用户开启后即可删除选中的对象。若选择模型尺度，网格系统便会放置在桌子上，所有生成的对象都会成为桌子的子对象。这样便可将对象的尺度和移动转换为相对于桌子的尺度和移动。

3.5. 建筑与档案的结合：建成环境的自动生成

这些算法可在三维空间中提供重新排序机制，基于档案数据构建规格网格，同时为建筑实践提供快速原型制作。根据建筑学、异托邦和元设计原则中关于权力、自主性与控制的讨论，我们对算法进行了调整，使其能够为用户提供设计空间和控制权（图 6）。根据本研究的要求，算法能够基于用户数据生成内容，且生成的内容可供定制。



图 6. 二元空间分割算法输出的转化。

Rasmussen 将建筑形态的生成与诠释过程分为两种：实体思维与空腔思维。可以从一个简单的框架着手，再逐步添加构件；也可以从一个大型实体中雕凿出特定构件。基于这一区分，我们定义了两种尺度选项，即房间尺度和建筑尺度，并采用一种算法来生成房间：用户可以指定实体的尺寸和空腔数量，该算法则根据尺寸、窗户和门的要求生成内容。对于建筑尺度的生成，我们提供了两种不同的生成技术。我们将二元空间分割（BSP）与元胞自动机（CA）算法结合起来，实现实体思维的生成；并采用约束生长算法，实现空腔思维的生成。尽管这些算法大多与随机数生成器搭配使用，以创建不同的游戏关卡设计，我们仍引入了用户偏好和用户数据，以实现不同的自动化级别。每种算法都提供三个自动化级别。用户可以选择根据提供的数据生成三维环境、使用随机数生成，或通过界面定义参数。这种方法让用户能够创意性地控制机制，并呈现不同的粒度级别。在这三种情况下，我们都进行了建筑设计选择，以确保生成的环境协调一致，从而带来连贯的用户体验。用户可以使用与重新设计其他资产相同的操作，重新设计生成的建筑模型。若用户不执行缩放操作，所有垂直构件的高度

则由用户在体验开始时设定的参数决定。为此，我们将作为算法输入的对象设为与提供给用户的主要建造对象相同的资产。

3.5.1. 基于数据的计算策略

为了计算房间数量和最小尺寸，系统会将用户提供的数据解析为列（算法1）。根据风格、艺术家和位置数据，展品会被分组，并与艺术品类型一起通过展品分析面板呈现。房间数量根据用户的分类选择来确定。例如，如果选择了风格，风格的数量也就决定了房间的数量。这样，每件展品都会被分配到特定的房间。由于音频、视频和文本工件容器的尺寸已经确定，因此会直接将它们在X轴上的尺寸加入总和。绘画作品和雕塑的尺寸从数据中提取；如果没有相关数据，则将其在X轴上的默认尺寸设为一米。

```
    算法1：房间数量和尺寸计算
 1  将用户数据解析为列
 2  按风格、艺术家和位置对文物分组
 3  根据用户的分类选择确定房间数量
 4  将每件文物分配到一个房间
 5 对每个房间执行
 6      对房间中的每件展品执行
 7          如果展品是音频、视频或文本，则
 8              将 X 轴尺寸加入总和
 9              else
10              如果存在尺寸，则
11                  从数据中提取 X 轴尺寸，并将其加入总和
12                  else
13                  将默认尺寸设为 1 米，并将其加入总和
14              结束 if
15          结束 if
16          将固定标签和空间尺寸加入总和
17          将 X 轴尺寸除以四，并将结果作为间距加入总和
18 结束 for
19      将两面平行墙的最小入口尺寸（2 米 × 2）加入总和
20      将总和除以 2，得到两面垂直墙的尺寸总和
21 结束循环
```

此外，标签的尺寸以及显示对象之间的空间是固定的，并会为每件展品计入总和。为创建列表，展品会按照日期属性排队。没有提供日期的展品则按照字母顺序添加。根据构建的列表，会依据每件展品的尺寸计算展品之间的空间，并将其与两面平行墙所需的最小入口尺寸一并计入总和。最后，将计算所得的长度分成两部分，得到两面彼此垂直的墙的总长度。计算所得的长度将作为参数提供给其他算法，用于确定房间的尺寸。

3.5.2. 约束生长算法

程序化方法定义自身边界的能力取决于空间：它可以将生成的区域精确用作输入，并在其中继续生成（算法2）。使用建筑轮廓进行平面图生成，可以确定程序化方法的边界。为了向用户提供一致的建筑占地范围，我们搜索了现有博物馆的平面图。通过 Archdaily 和 Divisare 等网站，我们获取了20张空间复杂程度各异的平面图。我们使用 OpenCV 通过填充操作提取平面图的轮廓，并将其转换为建筑占地范围。我们将建筑占地范围用作实体，以容纳在其中生长的空腔。经过多次实验，考虑到计算限制，我们将包含建筑占地范围的 .png 文件尺寸定为128x128像素。我们根据像素和色彩要求准备了建筑占地范围，供用户选择。要运行该算法，用户首先选择要处理的建筑占地范围。

根据偏好，用户可以通过选择建筑占地范围的像素图像来定义初始生长点；如果有数据可用，用户也可以从排序类别（风格、艺术家、位置）中选择选项，以确定房间数量，算法则根据最佳间距随机选择点。如果没有可用数据，用户也可以选择由算法随机确定点的数量和位置。初始点形成一个方形，周围留出1个像素的空隙，并以8个像素为边界（图7）。通过基于像素的搜索选定初始点后，这些点便开始生长，直到到达建筑占地范围的边界，或彼此相接，在建筑占地范围内形成空腔。生长过程完成后，通过不断添加并比较属于特定房间的像素位置，找出容器的角点。根据角点、中心位置和墙体长度，确定三维墙砖的放置位置。对于每个房间，根据空像素和墙壁放置三维地板及其镜像版本的屋顶瓦片。

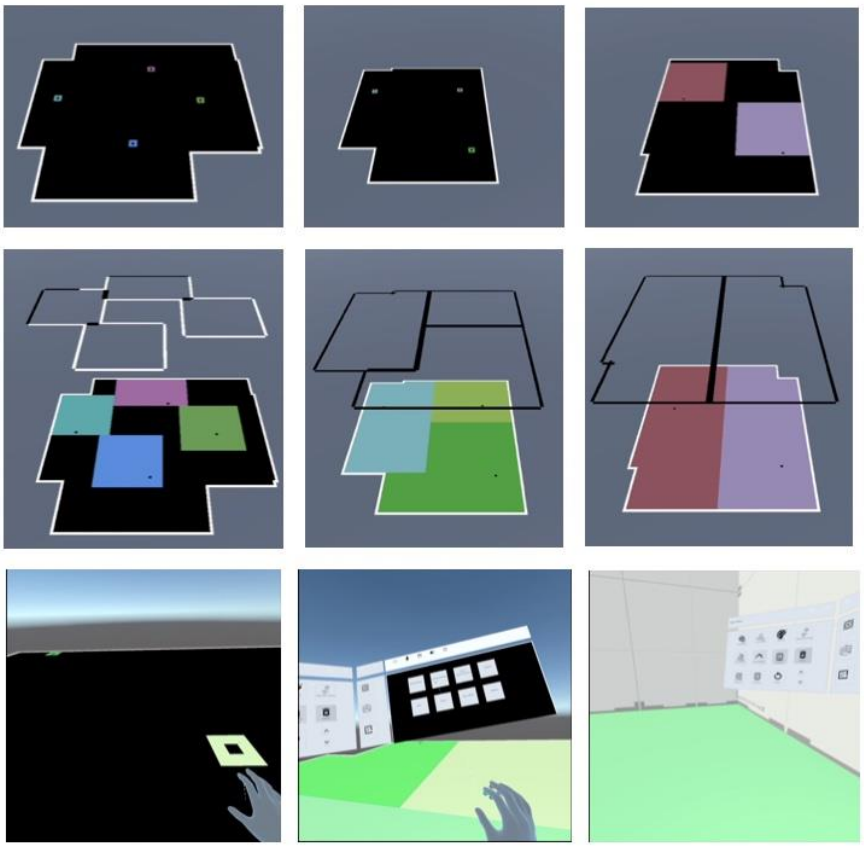


图7. 约束生长算法的示例输出。

3.5.3. 房间生成

在房间生成算法中，使用通用墙体、屋顶和地板资产作为实体来生成立方体房间。对于算法的基于数据的版本，用户可以选择资产的排序选项；随后，根据房间将容纳的文物数量和尺寸，计算房间的宽度和深度尺寸，并按照计算结果缩放初始房间。每个房间都会生成一个按钮，用于在虚拟环境中生成该房间。在基于用户偏好的版本中，用户首先放置一个承载生成算法的通用房间。用户可以通过定义房间尺寸、窗户数量和门的数量，调整空腔和实体。用于共同构成初始实体的资产，以及窗户和门资产，都会提供给算法。用户按下生成按钮后，首先会根据给定尺寸替换地板瓦片和墙体瓦片。随后，算法根据用户给定的数量，将墙体瓦片替换为窗户瓦片和门瓦片（图8）。

算法2：约束生长算法

```
初始化新列表 cornerList
从 (minX, minY) 开始，沿四个方向搜索边界像素
如果找到，则
    添加到角点列表
    else
移动
结束 if
按顺时针方向排列角点
如果放置了房间，则
检查区域
如果区域干净，则
        绘制房间边界
        将一个房间添加到房间列表
        else
终止房间
结束 if
结束 if
如果未暂停，则
    遍历房间列表并查找候选墙面
    当可扩展墙面的数量为 > 0 时
        扩展房间
        更新墙壁
        更新纹理
结束循环
结束条件
判断
```

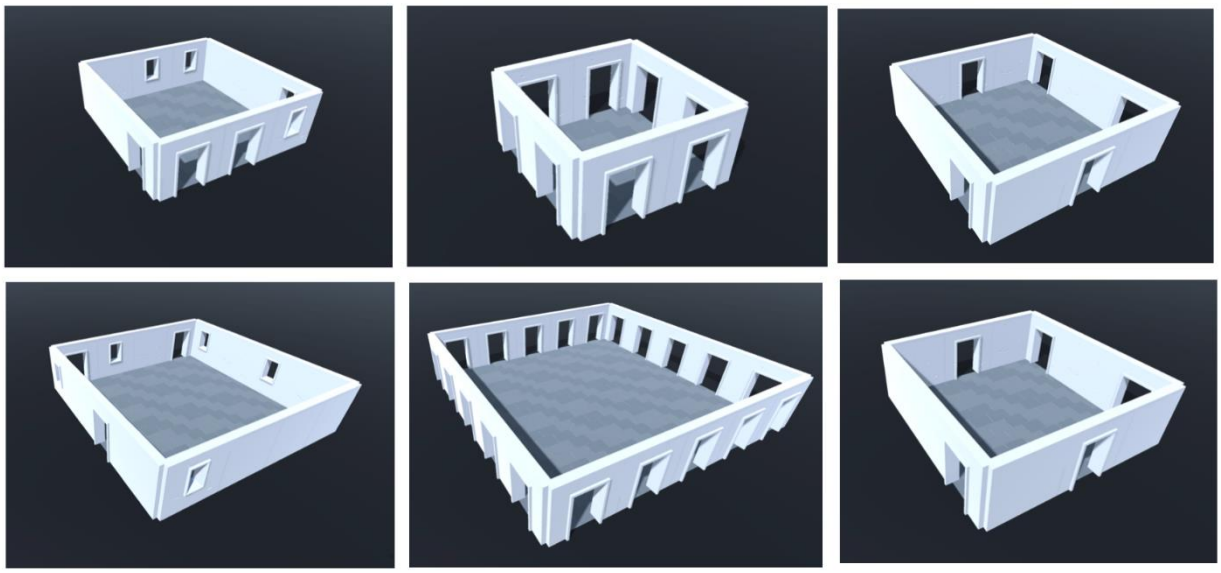


图8. 房间生成算法的输出示例。

3.5.4. 二元空间分割与元胞自动机

元胞自动机（CA）和二元空间分割（BSP）是两种不同的算法，可单独使用，也可组合使用来生成布局。BSP 是一种用于计算机图形学的技术，可将二维或三维空间划分为更小的子空间或节点。通常，BSP 子空间的数量由给定范围内的随机数确定，并通过提供种子来实现变化。它主要用于生成复杂的二维地牢模式。本研究使用 BSP 生成相互连通的房间和走廊；然而，与最常见的技术不同，我们不是使用随机数，而是通过用户偏好对算法加以约束。

元胞自动机是一种数学系统，由网格单元构成，每个元胞都有数量有限的可能状态。根据一组规则，每个元胞的状态由其邻居单元的状态决定。这意味着，在元胞自动机中，元胞彼此交互，简单的规则便能生成复杂的模式和结构。在电子游戏中，元胞自动机通常用于生成洞穴和森林等更自然的模式。本研究使用元胞自动机，根据元胞状态创建了生成的网格数据的三维模型。
BSP 的基本思想是，任何平面都可以将空间划分为两个空间。因此，它通过递归地划分关卡空间来创建不同的区域。任何继续通过定义平面进行划分的半空间，都会进一步分成两个更小的子空间。通过持续划分生成子空间，并形成空间二叉树。划分可以设在随机位置，因此各区域的尺寸和形状不尽相同。当区域达到合适的尺寸后，每个区域都会转换为一个房间，并在相邻区域之间添加连接。在 BSP 的基于数据的版本中，房间的数量和尺寸由数据分析算法提供，该算法根据用户选择的排序选项计算参数。其他变量由算法随机生成，并

通过种子进行调整。在没有数据的情况下，算法会依据指定的种子，将生成过程中使用的所有参数随机化。对于基于用户偏好的版本，用户可以设定走廊和房间尺寸、建筑占地范围尺寸以及房间数量的最大值和最小值，从而为实体指定参数。

我们使用 BSP 生成布局，首先定义初始边界，也就是建筑占地范围，其尺寸取决于用户的偏好（算法3）。建筑占地范围的尺寸可能会改变布局的整体布置。例如，如果用户希望创建纵向并排的区块，或更紧凑的结构，则可以通过调整宽深比来实现。下一步是根据用户定义的房间数量和尺寸，将建筑占地范围划分为更小的空间（图9）。在二元空间分割中，种子是用于生成随机数值序列的起始值。随后利用该随机序列来确定布局。我们使用种子随机选择分割的位置和方向，以创造多样性。种子值作为随机数生成器的输入，生成基于该种子的一系列随机值。通过使用相同的种子值，可以多次生成相同的布局。分割根据房间和走廊的尺寸以及种子值进行，持续进行，直至达到用户定义的房间数量。

所构建树结构中的每个节点都代表布局中的一个子空间。为生成树的实际布局，随后会遍历这棵树；在每个节点处，如果该节点可以创建房间，就将房间添加到布局中，并尝试在四个基本方位上放置走廊。如果空间足够，算法就放置走廊并继续处理下一个节点。如果空间不足，算法就终止该过程并重新开始分割。BSP算法以元胞为操作对象，因此适合与元胞自动机结合，用于基于规则的三维生成。我们为元胞定义了若干状态，以构建生成的数据结构的三维模型。分割前，所有元胞都处于空状态；当所有房间都在空间二叉树中就位后，元胞会变为墙、转角墙、地板、门和窗户状态。墙瓦片和屋顶瓦片无需旋转，而墙、转角墙和门瓦片则具有适用于旋转操作的不同状态。应用这些规则后，三维资产便会各就其位。对于屋顶，我们没有创建新状态，而是将生成屋顶瓦片的职责交给处于地板状态的元胞；这些元胞可根据设定的高度，通过复制来生成屋顶瓦片。



图 9. 二元空间分割和元胞自动机的输出示例。

4. 评估

4.1. 伦理

本研究已获中东技术大学人体受试者伦理委员会批准，审批方案编号为0244-ODTUİAEAK-2022，批准时间为2022年4月。研究开始前，每位参与者均签署了知情同意书。该表格简要说明了研究的目的和目标、参与者提供意见的重要性、数据收集方法、参与者个人信息的保管方式、数据的预期用途，以及对参与者的要求。研究人员已告知参与者，虚拟现实平台可能带来晕动症和恶心等负面影响，并说明参与者在体验过程中若感到不适或受到困扰，有权随时退出。本研究收集的所有信息均经过匿名化处理，可能包含个人数据的图像均已排除。参与者未获得任何补偿。

```
算法3：二元空间分割与元胞自动机
使用给定的建筑占地范围尺寸初始化布局
将种子值作为随机数生成器的输入
当 layout.num_nodes < user.num.rooms 时
    为分割随机选择一个位置和方向
    将布局划分为更小的子空间
结束 while 循环
遍历布局的树结构
递归访问布局树结构中的每个节点
如果该节点可以创建房间，则
    将其添加到布局中
    尝试在四个基本方位上放置走廊
    否则返回
结束 if
如果 layout.num_nodes = user.num.rooms，则
遍历布局中的元胞，并根据
    状态
否则返回
结束如果
```

4.2. 参与者

共招募了30名参与者。受访者年龄介于18至35岁之间，平均年龄为22.52 ± 4.13岁。每位参与者的视觉均正常或经矫正后达到正常水平（自我报告）。研究主题的范围与专注度、用于收集数据的方法，以及从每位参与者处获取的信息量，都是可能影响样本量的因素（Braun 和 Clarke，2019年）。应收集足够的信息，以充分回应研究问题。鉴于采用了多种数据收集方法，且从参与者处收集的信息内容详尽，30名参与者的数量是足够的，由此进行的分析也得出了重要见解。

4.3. 程序

我们通过问卷形式开展了定量调查。此外，我们还进行了半结构化访谈，作为一种探索性方法，以便更详细、深入地了解应用程序的使用情况和用户偏好。在版本测试之前，我们要求参与者填写玩家动机档案（Yee，2016年）、沉浸倾向（ITQ）和工具胜任力问卷。为避免数据和媒体造成的不一致，我们向用户提供了完全相同的数据和博物馆藏品。按照流程，参与者随后可以访问自己的藏品。我们首先请用户自由使用该应用程序，然后测试特定功能，例如照明设置和程序化生成算法。参与者使用完全部三个版本后，我们向他们发放了用于评估各版本若干方面的问卷。为了对框架进行定性评估，我们采用了广泛使用的系统可用性量表（SUS）（Brooke，1996）、临场感问卷（PQ）（Witmer and Singer，1998）和技术接受模型（TAM）

问卷（Venkatesh 和 Davis，2000），并发放给参与者。此外，我们还编制了三份问卷，分别涉及照明、程序化生成算法和交互偏好。之后，我们进行了一次简短的半结构化访谈。每次访谈约持续一小时。

4.4. 数据收集方法

4.4.1. 半结构化访谈

所有平台均由参与者使用后，在体验环节结束后进行了半结构化访谈，以进一步了解他们对各版本的总体印象。访谈提纲包含 11 个问题，重点了解参与者对框架的解读和感知、使用不同版本的体验、他们认为可以如何改进，以及他们偏好哪些版本和选项及其原因。此外，还进行了非正式交谈，以识别可能被忽略的因素，例如方法应用中的错误和软件错误。在访谈中，也请参与者用自己的话描述使用该应用程序的体验。

4.4.2. 问卷

系统可用性量表是一种包含 10 条陈述的自我报告量表，用于分析和研究系统在一般评估中的可用性。该量表采用 1 至 5 级李克特量表进行评分，其中 1 表示强烈不同意，5 表示强烈同意。量表包含的 10 个问题由五条正向陈述和五条负向陈述组成。SUS 分数根据收集到的数据计算，结果介于 0 至 100 之间。文献中广泛使用 SUS 来比较和评估产出成果的成效。

通过接触沉浸式环境所体验到的临场感，常与环境的有效性联系在一起。临场感通常被描述为一种“身临其境”的感觉，即一个人觉得自己仿佛置身于另一个地方。临场感问卷最初由 Witmer 和 Singer（1998）编制。问卷包含若干子部分，但本研究仅采用其中少数几个。临场感采用7点李克特量表进行评分，范围从1 = 强烈不同意到7 = 强烈同意。

一种名为技术接受模型（TAM）的方法论旨在判断新技术是否会被接受、拒绝或使用。该方法由 Davis（1987）首次提出，并广泛应用于文献研究中。TAM包含不同的子部分和不同的应用形式。本研究采用修订版的技术接受模型问卷（Venkatesh 和 Davis，2000），共包含10个问题，涵盖两个子部分：感知有用性（PU）和感知易用性（PEU）。前六个问题用于测量感知有用性，后四个用于计算感知易用性。TAM采用7点李克特量表进行评分，范围从1 = 强烈不同意到7 = 强烈同意。

然而，沉浸式系统的有效性可能受到个体差异、技术特性以及负面副作用的影响。衡量这些中介效应，对于理解它们之间的关系以及如何最大限度地提升

沉浸式环境的有效性至关重要。为衡量若干个体差异，研究者引入了沉浸倾向问卷（Witmer and Singer，1998）。沉浸倾向指个人沉浸于仿真中的倾向。ITQ由18个条目组成，分为四个子部分，分别是投入度（5个条目）、专注度（5个条目）、情绪（5个条目）以及玩电子游戏的倾向（3个条目）。

为衡量参与者在虚拟现实和混合现实方面的工具能力水平，我们请他们使用7点李克特量表评定自己的经验水平，范围从1 = 我毫无经验到7 = 我是专家。在PC版本中，我们采用了最常见的导航和交互方式（使用 W、A、S 和 D 按钮进行导航，并通过鼠标交互控制摄像机移动），而这些方式在混合现实和虚拟现实中并不需要。因此，我们没有询问参与者在个人电脑方面的经验水平，而是采用一项名为 Quantic Foundry 玩家动机档案的调查，来衡量参与者在本研究中的电子游戏经验程度。该问卷包含六个问题，侧重于受访者喜爱的游戏和游戏习惯，问题设计依据因子分析和历史调查。它根据四个等级评估经验水平，范围从非玩家到硬核玩家。

本研究还请用户回答了四组开放式问题，分别涉及框架能力、交互偏好、程序化生成算法选择和照明偏好。工具能力问卷包含两个问题，用于评估参与者在虚拟现实和混合现实方面的经验水平。虚拟现实版和混合现实版各有一个问题，提供两种交互方式选项（手部交互／控制器），以了解参与者对交互模式的偏好。在照明偏好问卷中，虚拟现实版和PC版分别针对不同角色（策展人／参观者）设置了两个问题，并提供三种色温选项（冷／中性／暖）。程序化生成算法选择问卷针对三个程序化生成算法的每个版本（基于数据、基于用户偏好）设置四个问题，以评估易用性、感知控制、对算法的可理解性以及设计成果的质量。该问卷采用5点李克特量表评分，范围从1 = 完全没有到5 = 完全。

5. 结果

本章呈现的比较结果基于30名参与者对个人电脑版本（使用 MacBook M1 Pro）以及虚拟现实和混合现实版本（使用 Oculus Quest 2）的回答。我们使用分析工具 MAXQDA（2022）分析了开放式问题的回答。我们使用软件 JASP（2022 V.0.16.4）进行统计分析，以计算并验证结果。我们对每份问卷进行了信度检验，以确定均值的内部一致性是否令人满意。我们计算了克ронбах巴赫系数，这是一种常用于验证调查问卷的方法（表1）。

桌子1. 克朗巴赫α系数（α）值的解释（Tavakol 等，2001年）。

克朗巴赫α系数的 α	克朗巴赫α系数的 α 评语
α ≥ 0.9	卓越
0.7 ≤ α < 0.9	Good
0.6 ≤ α < 0.7	可接受
0.5 ≤ α < 0.6	Weak
α ≤ 0.4	不可接受

5.1. 半结构化访谈

第一和第二个访谈问题要求用户说明他们对框架的总体印象，以及他们对使用领域的理解。图10、图11和图12展示了频率映射，呈现用于描述该框架不同版本及潜在用例的常用词语。



图 10. 参与者用于描述该框架 VR 版本的最常用词频率映射。使用 MAXQDA 制作。



图11. 参与者用于描述该框架混合现实版本的高频词频率映射。由 MAXQDA 制作。



图12. 参与者用于描述该框架个人电脑版本的高频词频率映射。由 MAXQDA 制作。

5.2. 交互偏好

用户被要求根据已识别的资产类型选择其偏好的媒介。图13展示了用户针对不同资产类型所偏好的交互媒介。

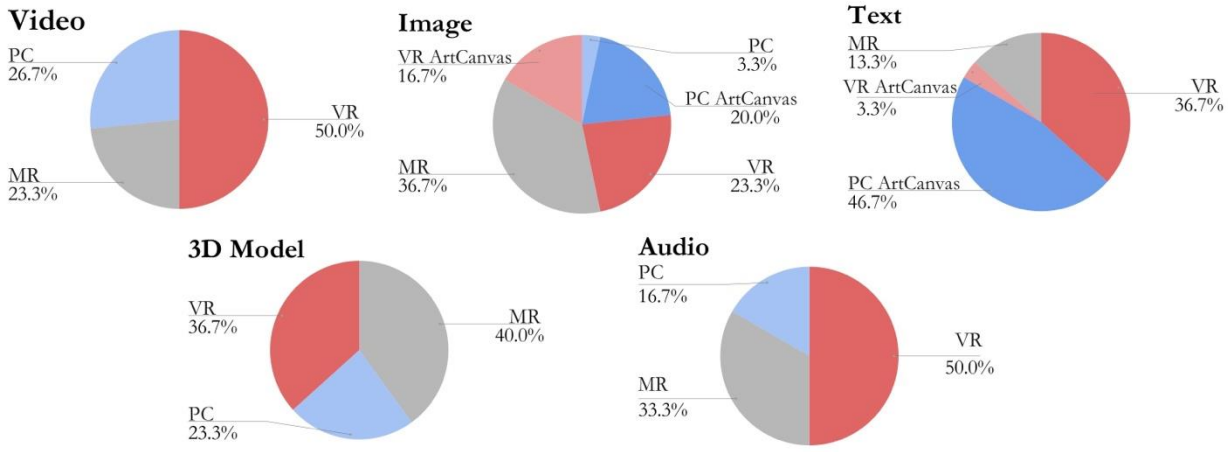


图13. 参与者对不同资产类型的交互偏好。

在VR和MR版本中，所有用户都测试了手部交互和控制器。图14展示了用户对应用程序不同版本交互方式的偏好。

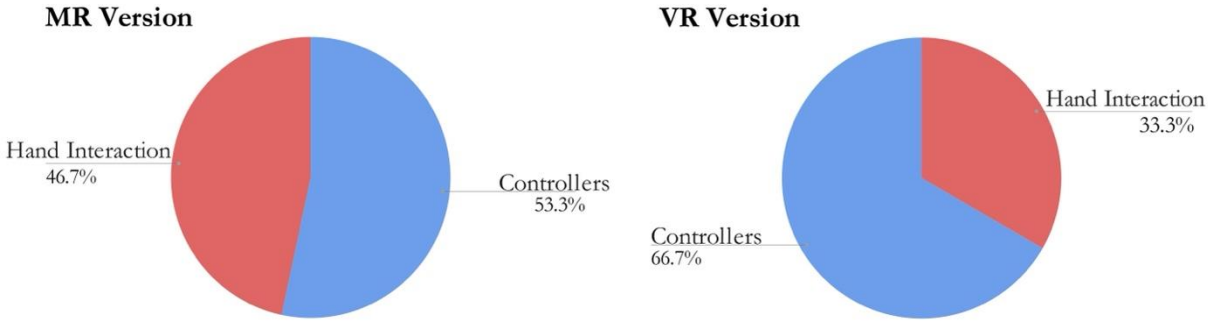


图14. 参与者对虚拟现实和混合现实版本的交互偏好。

5.3. 照明温度偏好

针对框架的不同模式，为受访者提供了温度刻度的三个部分供其选择。由于MR版本不使用虚拟照明系统，因此未将其纳入调查。结果如图15所示。

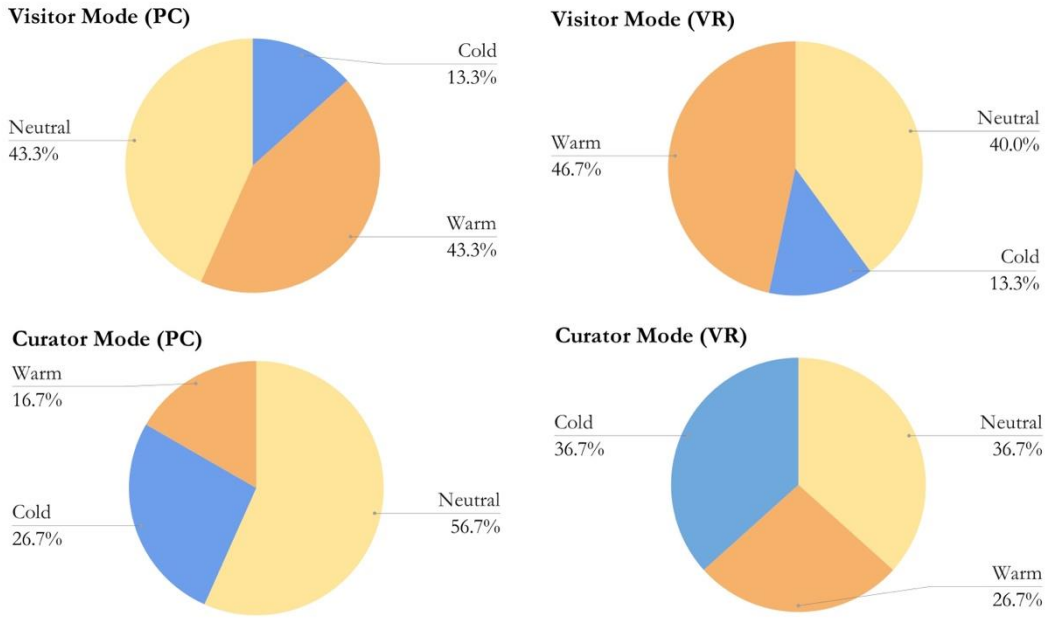


图15。　参与者对不同模式和沉浸式环境的照明偏好。

5.4. 程序化生成算法

确定了四项不同标准，用于评估已实现的算法的成功程度。结果分为两类：基于数据的生成和基于用户偏好的生成。为检验向用户提供的选项数量与其他适格性指标之间的相关性，相关内容一并列于表2中。

表2。基于用户偏好的程序化生成问卷结果的均值和标准差。问卷答案采用1至5分量表；分数越高表示态度越积极。

	增长算法	二元空间分割与元胞自动机	Room生成
选项数量	3	7	4
感知控制	3.56 ± 1.04	3.76 ± 0.97	4.03 ± 0.80
易用性	3.90 ± 0.75	3.7 ± 0.98	4.00 ± 0.78
可理解性	4.00 ± 0.81	3.66 ± 0.92	4.00 ± 0.87
设计结果	3.54 ± 0.97	3.43 ± 0.89	4.03 ± 0.92

由于感知控制、选项数量和易用性与基于数据的生成无关，因此仅考察了设计结果和对算法的可理解性。结果见表3。

表3. 基于数据的程序化生成问卷结果的均值和标准差。问卷答案采用1至5分量表；分数越高，表示态度越积极。

	增长 算法	二元空间分割和 元胞自动机	Room 生成
设计结果	3.23 ± 0.89	3.90 ± 0.75	3.40 ± 0.85
可理解性	3.66 ± 0.71	2.86 ± 0.84	3.30 ± 0.83

结果表明，尽管与其他算法相比，BSP 与元胞自动机算法的组合可理解性较低，但其设计结果得分最高。

5.5. 系统可用性量表

尽管 SUS 没有子量表，但应按照 SUS 评分算法计算答案，以便解读结果（Brooke，1996）。为实现所需的一致评分，评分公式针对问卷中的负向题目和正向题目采用了不同的计算方法。桌子 4 显示克рон巴赫系数值，桌子 5 和图 16 则展示了 SUS 统计研究的结果。

桌子 4. 系统可用性量表的克рон巴赫系数值。

版本	PC	VR	MR
克рон巴赫 α	0.653	0.874	0.670

桌子 5. 系统可用性量表的均值和标准差结果。

版本	PC	VR	MR
Mean	79.91 ± 10.89	70.00 ± 14.03	77.51 ± 12.99

由于所有版本计算出的克рон巴赫系数（α）值均高于 0.5，因此 SUS 结果具有可靠性。（个人电脑（0.653 > 0.5）、虚拟现实（0.874 > 0.5）、混合现实（0.670 > 0.5））。对 30 名参与者的总体系统可用性评分（SUS）表明，系统可用性较高；个人电脑的平均得分为 79.91%，被定义为“良好”，在系统可用性评估中评级为“B”。比较标准差可见，参与者的个人电脑得分一致性更高。另一方面

混合现实版本的可用性得分（77.51%）高于虚拟现实版本（70.00%），但两者均处于“B”级范围，也都被定义为“良好”。

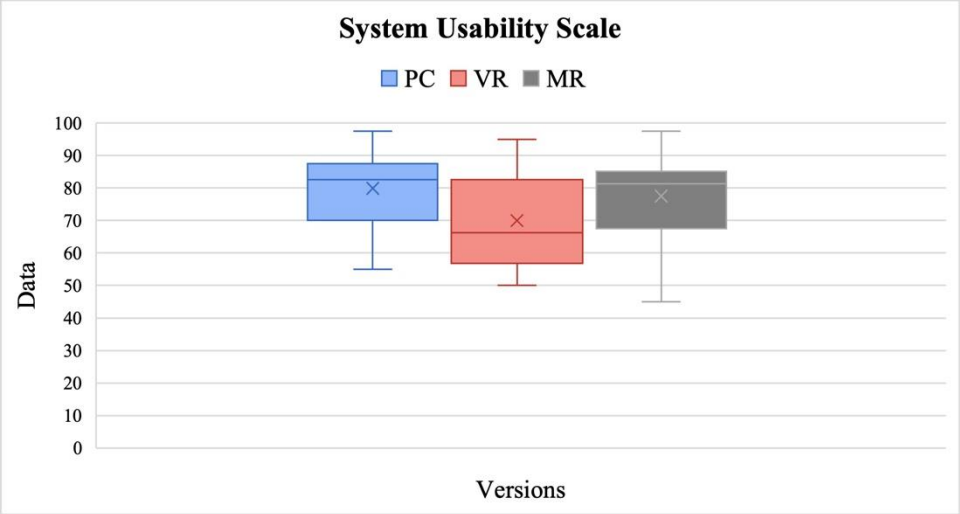


图 16. 箱线图格式的 SUS 分数比较结果。

5.6. 技术接受模型

TAM 问卷没有结构化的问题集，也没有用于比较结果的评分表。因此，结果仅通过描述性统计进行数值分析。在用户研究中，选取了 TAM 模型中最相关的两个子部分，即感知易用性和感知有用性。问卷按其子部分进行分析。表 6、表 7 和图 17 对各个版本的结果进行了比较展示。

表 6. 技术接受模型的克рон巴赫系数值。

版本 PC		VR	MR
克рон巴赫系数 α	0.640	0.857	0.848

结果显示，所收集的数据整体可靠，因为计算得出的克рон巴赫系数（α）均高于 0.5（PC（0.640 > 0.5）、VR（0.857 > 0.5）、MR（0.848 > 0.5））。

桌子 7. 技术接受模型的均值和标准差结果。问卷答案采用 1 至 7 的尺度；分数越高，表示态度越积极。

版本	PC	VR	MR
感知有用性	5.63 ± 1.05	5.47 ± 1.22	5.5 ± 1.24
易用性	5.54 ± 1.05	4.88 ±1.13	5.15 ± 1.41
总均值	5.60 ± 1.05	5.23 ± 1.22	5.29 ± 1.35

根据结果，PC 的均值、感知有用性和 PUE 得分均高于 VR 和 MR 版本。MR 版本的得分略高于 VR 版本；最值得注意的是，VR 版本的感知易用性得分低于其他版本。

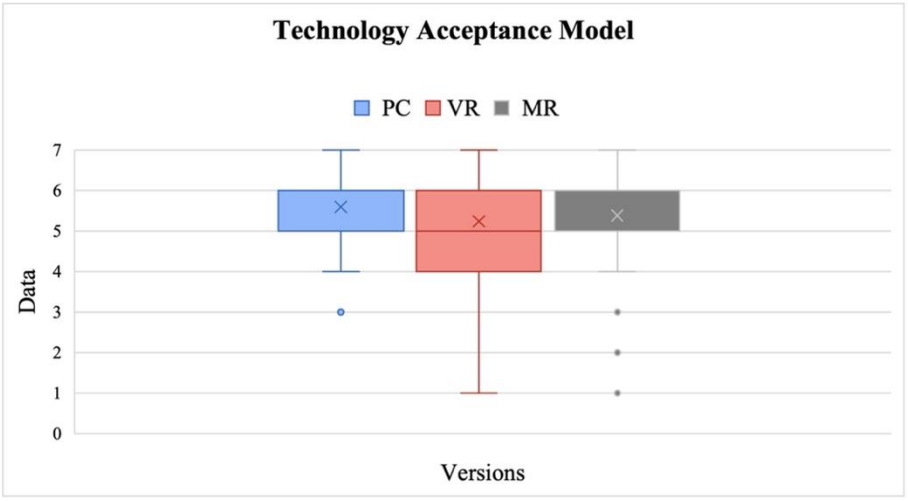


图 17. 技术接受模型问卷的比较结果（箱线图格式）。

5.7. 临场感问卷

临场感问卷（PQ）包含若干子项，分别代表框架的不同特征。问卷重点考察了真实感、行动可能性、界面质量、探索可能性和绩效自我评价等子项，共设置19个问题，用于评估各版本在临场感方面所提供的可供性。各子项的系统总体性能分别计算，随后汇总得出临场感总分。研究使用 UQO 网络心理学实验室（UQO，2002年）提供的评分表作为指南，以了解表现良好的版本所具备的临场感能力；该评分表列出了取得成功结果所需的最低分数。各版本的比较结果见表8、表9和图18。

表8. 临场感问卷的克рон巴赫系数值。

版本	PC	VR	MR
克рон巴赫系数 α	0.717	0.822	0.685

表9. 临场感问卷的均值和标准差结果。问卷答案采用1至7分的尺度；分数越高，表示态度越积极。

版本	PC	VR	MR
真实感	5.26 ± 1.20	5.02 ±1.31	5.02 ±1.45
行动可能性	5.40 ± 1.15	5.25 ± 1.46	4.93 ± 1.37
界面质量	4.37 ± 1.52	4.33 ± 1.56	4.93 ± 1.49
绩效自我评价	5.53 ± 0.92	5.38 ± 1.09	4.78 ± 1.43
总均值	5.14 ± 1.27	4.97 ± 1.46	4.93 ± 1.44

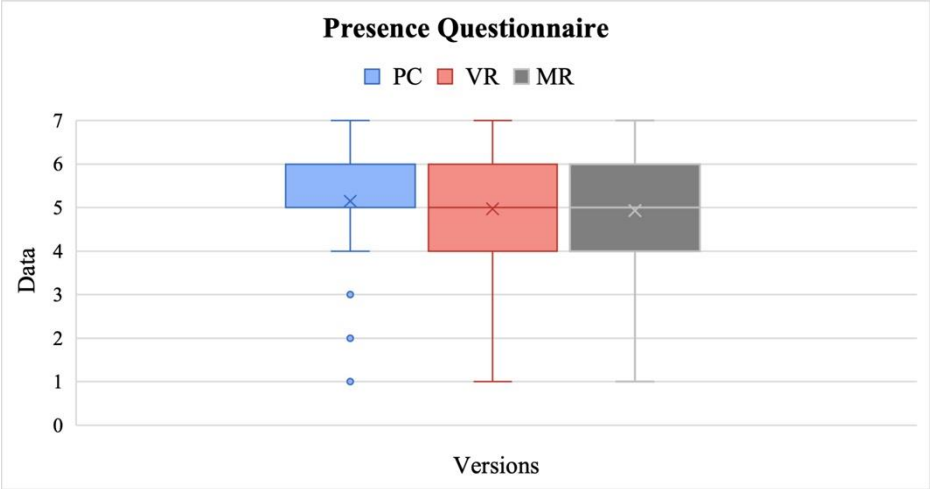


图18. 临场感问卷的箱线图格式对比结果。

根据信度检验的结果，问卷结果被认为是有效的。各版本的总均值相近，但从图18中可以看到，PC版本存在若干离群值。

6. 讨论

异托邦是独特的空间，能够通过信息交换连接不同的系统，并以具有多个层次为特征。基于话语异托邦的特点，本研究所述框架旨在保持灵活性和模块化，可用于多种

语境中，以创建能够为话语提供发生空间的数字栖居地。由于异托邦的复杂性，需要采用多种评估方法来检验这些方法对于实现目标是否便利。

为了用个人档案检验这一框架，一些参与者在活动开始前准备了素材集合，另一些则倾向于使用其线上或线下数据库中的现有材料。预制数据集为我们提供了有关技术层面的重要见解，而该框架构建独特异托邦的潜力，则通过个人经历和档案展现出来，证明了这一框架适用于多种语境。

通过“手术台”方法并置多媒体元素，为参与者创造了多种可能性。例如，参与者倾向于使用自己的照片、视频、笔记和屏幕截图，这与异托邦在时间和元素方面的累积特性相似。他们根据自己的分类方式生成不同的房间，构建“分类网格”，由此创造出与自我反思和自我塑造直接相关的多层次体验。该框架提供的个人档案和空间层使用户能够创造一个“世界中的世界”。

[P.17] “我把这次体验视为在自己的大脑里行走并对其进行整理，让它能够运转。此外，该框架还可以借助深度学习算法进行扩展，以实现进一步的定制和引导。”

使用与其职业生活相关资产的参与者，基于“涌现面”建立了关系并获得了体验；若缺少场所和具身性，这些关系与体验便无法实现。例如，来自设计研究相关领域的参与者，将共同制作的模型与制作过程中的草图、笔记和视频结合起来，呈现了叙事展览。他们还进行了现场演示，开展建筑设计活动，体验“审美生成”的创造过程。

[P.22] “我觉得大多数 我们用过的设计工具都像卡车；这个应用程序则像一辆跑车。 ”

[P.04] “我可以轻松地将这个工具用于室内设计实践，而且我尤其觉得混合现实版本非常实用。”

具有医学背景的参与者放置了解剖模型和文本，将环境转化为一种益智游戏，使他们能够通过手部交互操控模型的各个部分。此外，两名来自计算机科学领域的参与者利用框架的适应性，通过基于面向对象编程（OOP）的嵌入三维模型的脚本，为动态模型添加了新功能。在半结构化访谈中，我们探究了问卷结果背后的原因、参与者对框架各版本的个人看法，以及他们对该框架可能用例的感知。通过开放式问题，我们从用户的角度探讨了他们对框架的解读。我们使用开放式问题收集用户如何感知和解读框架的数据。对这些问题的回答进行频率映射分析后发现，框架中使用的不同技术带来了多种解读。例如，“游戏”“创意”“乐趣”和“艺术”等词语通常被用于描述PC版本，而VR

版本则更常用“实验性”“设计”“乐趣”“建筑学”“可视化”和“包容性”等词语来描述。另一方面，MR版本通常被描述为“室内设计”“原型”“交互”和“转化”。对频率映射的比较表明，MR和VR技术可能提供更全面、多层次的体验，并涉及具身认知。此外，大多数参与者都根据自身的经历和需求提供了个人案例。

[P.02] “我更愿意在给学生讲授地理和历史时使用这个工具。”

[P.25] “在机械工程学习中，我们可以使用这个工具来设计、展示和讲授相关系统。”

参与者提供的案例丰富多样，这表明该框架适用于各种语境。动态自主层以及基于异托邦的自我塑造理解，为用户提供了设计空间。他们成为“抵抗焦点”，创造出非正式使用场景；这些场景并非由框架构建，而是由用户构建。

异托邦这一概念可以理解为一组复杂的关系；在本例中，它还涉及用户体验，而用户体验会受到从硬件到导航等多种元素的影响。根据受访者的陈述，所提供的不同技术和交互方式对某些话语更为适用。此外，从各项活动来看，用户会改变他们对照明和尺度等环境设置的偏好。

话语空间的多媒体元素采用了不同的表征方法。用户对环境的偏好因媒体类型而异。对于三维模型，用户更喜欢在虚拟现实和混合现实环境中与其交互。参与者表示，与周围环境相比，混合现实能提供更好的尺度感知，而另外两个版本则更令人印象深刻。大多数用户喜欢以人体尺度展示视频和图像。然而，由于混合现实版本中的实体物体会造成干扰，多数用户在观看需要长时间专注的视频时更喜欢虚拟现实版本。对于音频，大多数用户更喜欢虚拟现实环境，认为将音频与完全人工的环境相结合更具吸引力。对于文本交互，多数用户倾向于在 ArtCanvas视图中阅读，这是最传统的选项。因此，话语的主导媒体格式会影响用户对技术的偏好。

创建多媒体系统时，重要的是考虑交互的性质，以及预期在学习、感官和情感参与度及满意度方面取得的成果。手部交互和控制器对于通过具身性开展活动至关重要。手部交互与命令语言有相似之处，用户需要记住手势才能完成操作。用户在交互时大多更倾向于使用控制器，而非手部追踪。使用控制器上的按钮比使用手势更方便、更容易，尤其是对新手用户而言。结果显示，在

MR版本中，更倾向于使用控制器的参与者人数有所增加。这一结果表明，能够从物理位置获取信息会增加用户对身体参与的需求。

在虚拟环境中持续激发人类情感与行为是可能的，这有助于提升异托邦的整体效果。刺激因素在视觉上的完整性带来了高度的沉浸感。本研究考察了参与者在策展人和参观者两种模式／角色下的照明偏好。结果显示，在进行两种不同交互时，照明偏好存在差异。大多数用户在策展过程中偏好自然光和冷光，而在参观模式下则偏好暖色照明设置。在虚拟现实环境中，用户选择冷色温的比例有所上升。策展过程中生理输入与抽象观念之间的关系凸显出，空间感知归根结底是通过体验和亲身经历形成的。空间感知与具身性相融合，可能会改变用户对虚拟元素的感知及其与虚拟元素的融合方式。用户普遍表示，在冷光和中性照明下能够专注于细节，而较暖的色温则让他们在观察时感到更舒适。

控制与权力机制是异托邦和建筑实践的重要组成部分。异托邦重新界定这些关系，并以不同的句法构建一种“话语秩序”，其中句法通过场所构成。技术的融入改变了动态关系，并界定了用户所面对的控制与权力边界。技术自主性的增强引发了建筑实践领域的讨论。建筑设计实践无法与其工具截然分开。随着技术进步，设计与艺术实践已将其系统从实体空间转向数字空间。建筑制图、表现、建筑物建造，以及最重要的建筑设计，都受到现代技术的影响；这些技术改变了生产过程和最终成果。工具的总体趋势表明，抵抗来自技术而非用户。

通过为自动生成算法提供灵活框架和不同程度的自主性，我们旨在理解技术、用户与通过数字媒介呈现的异托邦空间层的转化或构建之间的动态关系。根据赋予用户的手动设计程度，整体结果取决于用户如何引导、约束和改变程序化生成。此外，由于程序化生成本质上具有确定性，融入手动设计步骤对于用户注入多样性和创造力至关重要。我们旨在了解自主性程度对结果和用户偏好的影响。在此，我们尤其关注该方法在多大程度上实现了预期结果并提升了控制水平，同时考虑用户设计过程中的可用性与可理解性之间的张力。因此，探索用户如何感知不同结果是值得的。

根据结果，在数据驱动版本中，生长算法提供了最高的可理解性。在此过程中，用户能够看到自己或算法将要处理的初始区域，这加深了他们对算法工作方式的理解。在用户驱动版本中，用户可以选择生长的起点，但房间的尺寸和形状由算法决定，用户无法加以控制。在BSP版本中，房间的尺寸由用户选择，但房间的位置由算法控制。房间生成算法允许用户控制

最终产品的位置和尺寸。总体而言，生长算法提供的感知控制水平高于BSP，但低于房间生成算法。根据调查结果，BSP与元胞自动机相结合能够产生最佳的设计成果，但其可理解性低于其他算法。当参与者根据自己的偏好生成内容时，提供给用户的选项提高了可理解性；然而，这种方法降低了算法产生的设计结果。这意味着，与用户驱动版本相比，数据驱动版本更能满足用户的空间需求。随着所呈现选项数量的增加，BSP带来的感知控制感和易用性有所降低。房间生成算法的数据驱动版本在设计结果方面的得分低于BSP，但在用户驱动版本中，其感知控制、易用性和设计结果得分更高。

大多数参与者会根据版本、具身程度、视角和尺度采用不同的策略。虚拟环境中的空间体验基于对周围环境的意识，构成一个主动的诠释过程。因此，参与者在不同版本中的设计方法各不相同。比较各算法生成的尺度可见，BSP具备生成大尺度设计的能力，而房间生成只能生成一个空间，生长算法则能够在建筑占地范围内生成空间。因此，用户倾向于在PC版本中使用二叉空间划分算法，因为他们可以通过完全俯视的视角观察结果。用户在MR版本中最常选择房间生成，因为他们可以通过虚拟版本改变周围环境。研究发现，生长算法更适用于VR版本，因为用户可以生成多个房间，同时仍能导航而不迷失方向。结果还表明，方法的可理解性会提升用户感知到的控制程度。

本研究的另一个目标是开发一个基于异托邦的沉浸式技术框架，使其面向大众，易于使用，并让新手和有经验的用户都能借此开展话语实践。可用性和接受度会影响个人对系统的控制程度，而技术带来的阻力越大，这种影响也会越明显。因此，本研究使用技术接受模型（TAM）和系统可用性量表（SUS）对该框架进行了测试。结果显示，该框架的不同版本适用于背景和能力水平各异的用户，这表明数字媒介中的异托邦层次能够为各种情境和个人提供一张“操作台”。研究使用SUS评估系统的复杂性、一致性和易用性，三个版本的得分均处于相近范围。然而，尽管VR版本的可用性得分较低，仍有部分参与者更喜欢该版本，这表明参与度可能是沉浸式技术取得成功的一个因素。

[P.17] “想逃离现实的时候，我可以连续玩上好几个小时的*VR*版本。”

[P.04] “*MR*版本相当有趣，*PC*版本更容易使用，但虚拟现实更有乐趣。”

根据对用户反馈进行的频率分析，参与者认为该框架的混合现实和虚拟现实版本兼具优缺点。它们被描述为“实验性的”“有用的”“快捷的”“功能性的”和“有趣的”，但也被认为“难以”、

“费劲”且“复杂”，不易使用。相比之下，PC版本被描述为“易于”使用，也更像“游戏”。异托邦中丰富的信息为用户创造了一个实验性和创意性的空间，但也形成了可能令系统新手感到不堪重负的界面。一些用户指出，众多功能妨碍了可用性并增加了认知负荷，影响他们充分沉浸于环境中的能力。异托邦中信息的强化既为用户营造了“实验性”和“创意性”的空间，也通过界面呈现出来，使新手用户感到疲惫。一些参与者表示，功能数量增加会降低可用性并加重认知负荷，从而干扰临场感。

[P.25] “我认为功能应该少一些。我觉得可用的功能实在太多了，这让我感到压力很大。”

为了更详细地解读技术接受模型问卷的结果，我们考察了各个子项。尽管PC版本的得分最高，但各版本在感知有用性方面的结果彼此相近。虚拟现实（VR）版本的感知易用性得分最低，而混合现实（MR）版本则被认为更容易理解、所需精力更少。这种差异可能源于虚拟现实的特性：它可能使用户与现实世界隔离。一些用户认为MR版本比VR版本更安全，而VR版本则被认为使用起来更有趣。本研究使用的头戴式显示器会在用户周围形成虚拟边界，并在用户靠近实体物体时显示现实世界。然而，一些不熟悉完全沉浸于虚拟世界的新手用户可能对这项技术的信任度较低，因此更倾向于使用传送选项进行导航，从而减少了他们与虚拟环境的交互。在性能方面，三个版本均基于同一系统制作，因此能够维持相同的可预测性水平。不过，其他因素、可靠性和效用会相互影响。对于VR而言，对技术的信任度较低会导致感知有用性得分较低。

[P.03] “由于我能够看到现实环境，因此我觉得混合现实比虚拟现实更安全。”

[P.19] “我在虚拟现实中迷失了方向，有一刻还觉得头戴设备让我很受束缚，想把它摘下来。*MR*版本没有*VR*版本那么令人印象深刻，但我更愿意使用*MR*版本。”

结果显示，PC的临场感得分高于VR和MR，这一差异归因于用户对这些不同技术的能力和熟悉度各不相同。对真实感、界面质量和可供考察性等各个子类别进行分析后发现，每种技术在这些方面都有各自的优势和不足。例如，PC版本在交互自然度和环境浏览能力方面得分较高，因为对大多数用户而言，键盘和鼠标交互更加自然，而且PC版本提供了多种摄像机选项来浏览环境。另一方面，VR版本在视觉方面以及与现实世界体验的一致性方面得分较高。MR版本

由于手部交互存在问题，以及实体内容与虚拟内容共置所造成的干扰，得分较低。

结果表明，不同技术对认知负荷和用户专注度的影响各不相同，因此在为特定任务选择技术时，考虑这些因素至关重要。总体而言，总分显示，采用多层方法，根据给定特征构建异托邦，能够让不同经验水平的用户在临场感、可用性和接受度方面获得较高评分。

7. 结论

话语空间指通过研究和考察有关世界的专业知识而获得的理解与洞见。随着数字技术的日益普及，多媒体已成为数字时代的主要交流手段，也是话语实践的语言。异托邦是特殊且多面的语境，能够促进信息交流，并通过“涌现面”与其他系统相连接。它们具有独特的能力，能够连接并整合不同的视角和知识库。本研究提出了一种方法，用于为虚拟现实和混合现实环境以及个人电脑构建框架，使人们能够基于异托邦构建多层数字空间，从而交流知识与信息。该框架旨在弥补档案实践中因某些层次（尤其是空间层）消失而留下的空缺；这种消失源于人们日益依赖排斥具身性的技术。我们提出将虚拟博物馆作为话语方法论的“操作台”，并以动态的“流动建筑”取代静态设置；这些建筑围绕由多媒体元素构成的个人档案形成各自的形态。

该框架经30名参与者测试，结果表明它实用、易于使用，并能适应各种职业和个人情境。我们通过定性和定量方法的结果，呈现了该框架的有效性以及异托邦的变革性影响。我们提供了多种排序与分组算法，以及二元空间分割、元胞自动机、生长算法和程序化房间生成等程序化内容生成算法。这些算法为自动生成算法提供了不同程度的自主性，使用户有机会反思、修改并控制设计。结果表明，场所的生成、转化与档案实践之间存在相互关系，这对“自我形成”活动至关重要。将异托邦中发现的层次与特征融入数字技术，能够在多个现实层级上带来空间性的“审美生成”；研究发现，这有助于在数字栖居地中开展话语实践。我们将元设计与终端用户开发方法和异托邦的层次相结合，提供了若干场所，使用户成为“抵抗焦点”。

为了提供能够指导人机交互领域未来研究的设计特征与成果，我们分析了可能影响用户体验和偏好的各种因素。问卷和访谈的结果表明，评估的三个版本各不相同，各有其特点、优势与不足。通过比较研究，我们展示了如何

通过设计并策展记录用户活动的虚拟博物馆，不同层次的现实可能增强用户的不同能力。不同用户在虚拟现实、混合现实和个人电脑环境中，可以重新诠释物理空间与数字空间的混合程度、交互、空间的意义与感知，以及空间所包含的元素。

8. 未来方向

该框架以核心特征为目标，旨在为多种语境提供一个系统。因此，我们没有为特定实践添加详细的技术要求。基于框架结构，可以添加模块以服务于不同的职业。根据文献综述，大多数建筑师和设计师更倾向于使用多屏幕处理多种类型的表征。借助这些附加功能，该框架可以解决设计过程中的协同定位问题，并提供更详尽的制作支持。为了重新编排内容，我们采用了博物馆学中的四个变量，用户可以对其进行重新诠释。不过，对于更复杂的结构，还可以针对不同的重新编排方法生成相应功能。影响环境真实感的因素之一，是音频资源未能根据物理距离进行呈现。为了增强环境的真实感，并以更加逼真、沉浸的方式在这些环境中导航，可以提供声音定位功能。根据参与者的陈述，提供的功能数量可能会让一些新手用户感到不堪重负。因此，可以针对不同经验水平分别提供功能。

在本研究中，我们分别考察了用户在每种技术中的个人体验，以比较并了解具体的偏好和影响。未来的研究可在个人电脑与沉浸式技术之间引入社交层和更具变革性的系统，从而丰富用户创建的异托邦所提供的内容及其关联，并提高该框架的可用性。未来的研究还可纳入非对称和对称的协作方法，将社会关系融入实践之中。

利益披露声明

作者未报告任何潜在利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据可向通讯作者索取，[E.S.], 在提出合理请求后即可获取。

参考文献

Akin, S., Ergun, O., Surer, E., & Dino, I. G. (2020). 一种结合日光模拟的沉浸式表演型建筑设计工具：一种基于建筑信息模型的方法。《工程、建筑与建筑管理》。

Araghi, S. K., & Stouffs, R. (2015). 探索元胞自动机在高密度住宅建筑形态生成中的应用。《建筑自动化》，49，152-162。Cruz, C., Karakiewicz, J., & Kirley, M. (2016). 探索设计空间的复合元胞自动机模型的实现。Baron, J. R. (2017, 4月). 程序化地牢生成的分析与改编。载于《东南会议论文集》（第168-171页）。Basaraba, N. (2021). 创意与数字场所营造的兴起：一项跨学科范围综述。《新媒体与社会》，14614448211044942。Boldi, A., Rapp, A., & Tirassa, M. (2022). 危机期间的游戏：商业电子游戏对新冠肺炎疫情期间人们生活重构的影响。《人机交互》，1-42。Braun, V., & Clarke, V. (2019). 反思反思性主题分析。《体育、运动与健康定性研究》，11(4)，589–597。Brooke, J. (1996). SUS——一种快速简便的可用性量表。《工业领域的可用性评估》，189(194)，4-7。Camozzato, D. (2015). 基于生长的程序化平面图生成方法（硕士论文，南里奥格兰德天主教大学）。Cecotti, H. (2022, 9月). 完全沉浸式虚拟现实中的文化遗产。《虚拟世界》（第1卷，第1期，第82-102页）。MDPI。Davis, F. D. (1987). 信息系统的用户接受度：技术接受模型（TAM）。Fischer, G., Giaccardi, E., Ye, Y., Sutcliffe, A. G., & Mehandjiev, N. (2004). 元设计：终端用户开发宣言。载于《美国计算机协会通讯》，47(9)，33-37。Foo, S., Theng, Y. L., Goh, D. H. L., & Na, J. C. (2009). 从数字档案到虚拟展览。载于《数字图书馆研究手册：设计、开发与影响》（第88-100页）。IGI Global。福柯, M. (1972).《知识考古学与话语论》。译者：AM Sheridan Smith。纽约：万神殿出版社。福柯, M. (2005).《事物的秩序》。劳特利奇。福柯, M. (2008).《另类空间》（1967年）。载于《异托邦与城市》（第25-42页）。劳特利奇。福柯, M. (2019).《美学、方法与认识论：福柯重要著作：1954—1984》。企鹅英国。Gilbert, R. M. (2019). 面向数字世界的包容性设计：以可达性为核心的设计。Apress。Gonizzi Barsanti, S., Caruso, G., Micoli, L. L., Covarrubias Rodriguez, M., & Guidi, G. (2015). 利用虚拟现实设备对文化遗产文物进行三维可视化。载于《第25届国际CIPA研讨会2015》（第40卷，第5W7期，第165-172页）。Copernicus Gesellschaft mbH。Hammady, R., Ma, M., & Powell, A. (2018, 6月). 文化遗产博物馆中无标记增强现实应用的用户体验：“MuseumEye”案例研究。载于《增强现实、虚拟现实与计算机图形学国际会议论文集》（第349-369页）。Springer，尚贝里。Hayashi, M., Bachelder, S., & Nakajima, M. (2016). 个人虚拟博物馆的自动生成。载于《2016年国际网络世界会议论文集》（第219-222页）。IEEE。Haydar, M., Roussel, D., Maïdi, M., Otmane, S., & Mallem, M. (2011). 用于文化计算与遗产的虚拟现实和增强现实：水下考古遗址虚拟探索案例研究。《虚拟现实》，15(4)，311-327。Hepp, A., & Hasebrink, U. (2018). 深度媒介化时代传播转型研究：一种构型方法。《传播构型》（第15-48页）。帕尔格雷夫·麦克米伦，尚贝里。Herr, C. M., & Kvan, T. (2007). 调整元胞自动机以支持建筑设计过程。《建筑自动化》，16(1)，61-69。Kersten, T., Tschirschwitz, F., & Deggim, S. (2017, 2月). 开发虚拟博物馆：在虚拟现实中四维呈现建筑史。TC II & CIPA《复杂建筑的三维虚拟重建与可视化》，2017年3月1–3日，希腊纳夫普利翁（第361-367页）。Copernicus。

Komianos, V., & Oikonomou, K.（2018年6月）。个性化虚拟博物馆的自适应展览拓扑。载于《IOP会议系列：材料科学与工程》（第364卷，第1期，第012011页）。IOP出版社。Komianos, V., & Oikonomou, K.（2018年6月）。个性化虚拟博物馆的自适应展览拓扑。载于《IOP会议系列：材料科学与工程》（第364卷，第1期，第012011页）。IOP出版社。L. Manovich（2001）。什么是电影？《新媒体语言》，第390-446页。Odom, W., Zimmerman, J., & Forlizzi, J.（2014）。无地方性、无空间性与无形态性：虚拟拥有物的体验特质。载于《2014年交互系统设计会议论文集》（第985-994页）。LaValle, S. M., Yershova, A., Katsev, M., & Antonov, M.（2014）。Oculus Rift的头部追踪。Lee, J. G., Seo, J., Abbas, A., & Choi, M.（2020）。终端用户在建筑设计审查中对增强现实的运用。《应用科学》，10(15)，5363。Lehtinen, M., & Brunila, T.（2021）。疫情的政治本体论：通过战争的政治本体论实现主权权力与情感管理。《政治学前沿》，3，674076。Lehtinen, S.（2022）。作为审美妥协的城市体验。载于《艺术与日常生活中的非完美主义美学》（第363-374页）。劳特利奇。Lippert, S. K., & Michael Swiercz, P.（2005）。人力资源信息系统（HRIS）与技术信任。《信息科学杂志》，31(5)，340-353。Lopes, R., Tutenel, T., Smelik, R. M., De Kraker, K. J., & Bidarra, R.（2010年11月）。一种用于程序化平面图生成的受约束生长方法。载于《第11届智能游戏与模拟国际会议论文集》（第13-20页）。Citeseer。Luck, R.（2014）。在行动中观看建筑：在具身交互中设计、唤起和描绘空间与形态。《国际设计创意与创新期刊》，2(3)，165-181。Maciag, R.（2018）。话语空间及其对知识与信息理解的影响。《哲学》，3(4)，34。马尔罗（1967）。《无墙博物馆》。Stuart Gilbert和Francis Price法译英。Mann, S.（2002）。媒介现实及其在日常生活中的应用。《Presence Connect》，1，2002。Mcknight, D. H., Carter, M., Thatcher, J. B., & Clay, P. F.（2011）。对特定技术的信任：其组成要素与测量方法研究。《ACM管理信息系统汇刊》，2(2)，1-25。Milgram, P., & Kishino, F.（1994）。混合现实视觉显示分类法。《电子信息通信学会信息与系统汇刊》，77(12)，1321-1329。Novak, M.（1997）。传输建筑：超物理城市。《数字狂热》，260-271。Pietroni, E., Pagano, A., & Rufa, C.（2013年10月）。伊特鲁里亚扫描项目：雷戈利尼-加拉西墓虚拟重建中的基于手势的交互与用户体验。载于《2013年数字遗产国际大会》（数字遗产）（第2卷，第653-660页）。IEEE。Porter, D., & Hanna, R.（2006）。建筑研究方法：从物理到数字。《WIT建成环境汇刊》，90。Prabhakaran, A., Mahamadu, A. M., Mahdjoubi, L., & Boguslawski, P.（2022）。基于建筑信息模型的沉浸式协作环境：家具、固定装置及设备设计。《建筑自动化》，142，104489。Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A.（2012）。《植物的算法之美》。施普林格科学与商业媒体。Rasmussen, S. E.（1964年）。《体验建筑》（第2卷）。麻省理工学院出版社。Rheingold, H.（1991年）。《虚拟现实：探索令人振奋的新技术》。西蒙与舒斯特成人出版集团。Rousseaux, F., & Thouvenin, I.（2009）。通过米歇尔·福柯的异托邦理论探索知情虚拟场所。《国际人文与艺术计算期刊》，3(1-2)，175-191。Safikhani, S., Keller, S., Schweiger, G., & Pirker, J.（2022）。用于拓展建筑、工程与施工行业中建筑信息模型潜力的沉浸式虚拟现实：系统综述。《国际数字地球期刊》，15(1)，503-526。

Salanitri, D., Hare, C., Borsci, S., Lawson, G., Sharples, S., & Waterfield, B.（2015）。虚拟环境中的信任与可用性之间的关系：一项持续进行的研究。载于《人机交互国际会议》（第49-59页）。Springer，尚贝里。Schultze, U.（2010）。虚拟世界中的具身性与临场感：综述。《信息技术杂志》，25(4)，434-449。Schultze, U.（2010）。虚拟世界中的具身性与临场感：综述。《信息技术杂志》，25(4)，434-449。Schweibenz, W.（2019）。虚拟博物馆：其起源、概念与术语概述。《博物馆评论》，4(1)，1-29。Shneiderman, B.（1983年3月）。交互式软件的人因。载于《IBM德国科学研讨会系列》（第9-29页）。Springer，柏林、海德堡。Spence, C.（2020）。地方感官体验：面向多感官心智的建筑设计。《认知研究：原理与启示》，5(1)，1-26。Summerville, A., Snodgrass, S., Guzdial, M., Holmgård, C., Hoover, A. K., Isaksen, A., ... & Togelius, J.（2018）。通过机器学习实现程序化内容生成（PCGML）。《IEEE游戏汇刊》，10(3)，257-270。Tavakol, M., & Dennick, R.（2011）。理解克ронбаха系数。《国际医学教育杂志》，2，53。Thompson, K.（2003）。抵抗的形式：福柯论策略性逆转与自我塑造。《大陆哲学评论》，36(2)，113-138。Venkatesh, V., & Davis, F. D.（2000）。技术接受模型的理论扩展：四项纵向实地研究。《管理科学》，46(2)，186-204。Wang, X. Y., Yang, Y., & Zhang, K.（2018）。基于图变换的平面图定制与生成。《建筑自动化》，94，405-416。Witmer, B. G., & Singer, M. J.（1998）。测量虚拟环境中的临场感：临场感问卷。《Presence》，7(3)，225-240。Yamada, Y., Irie, K., Gushima, K., Ishizawa, F., Sada, M. A., & Nakajima, T.（2017）。HoloMoL：利用混合现实技术增强人类记忆。载于《第21届国际学术Mindtrek会议论文集》（第235-238页）。Yang, F., Li, Y., Che, M., Wang, S., Wang, Y., Zhang, J., ... & Zhang, C.（2022）。通过基于体素的房间分割与空间划分实现室内环境的多边形三维布局重建。《ISPRS国际地理信息杂志》，11(10)，530。Yee, N.（2016）。玩家动机档案：我们从25万名玩家身上学到了什么。载于《2016年计算机与人类游戏交互年度研讨会论文集》（第2-2页）。