© 2023 IEEE。本文是作者版本，文章已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。最终版本可在以下网址获取：xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

arXiv:2302.01966v1 [cs.HC] 3 Feb 2023

迈向理解问题解决中的分布式非对称协作可视化

Wai Tong* Meng Xia† Kam Kwai Wong‡ Doug A. Bowman§ Ting-Chuen Pong¶香港科技大学 卡内基梅隆大学 香港科技大学 弗吉尼亚理工大学 香港科技大学 Huamin Qu‖ Yalong Yang** 香港科技大学 弗吉尼亚理工大学

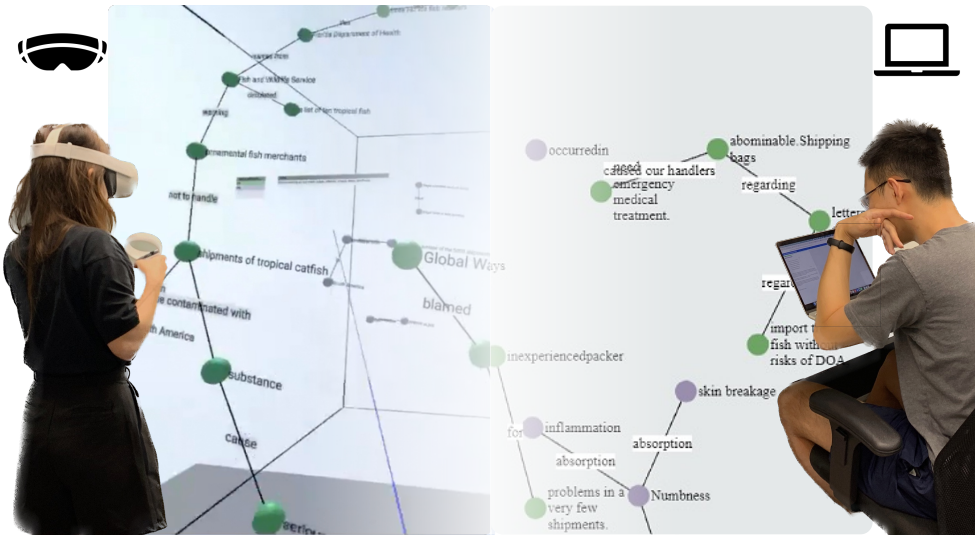

图 1：我们研究了非对称环境下问题解决的协作可视化权衡。本图展示了两位协作者如何通过两种不同的设备感知并与可视化进行交互：虚拟现实（左）和个人电脑（右）。可视化采用不同维度，以适配不同设备（即虚拟现实中的三维和个人电脑上的二维），并可通过定制技术融合在一起（如中央所示），以支持协作感知。

摘要

本文通过受控用户研究，提供了有关在分布式非对称场景中使用协作可视化的用户体验的实证知识。随着人们能够使用各种计算设备（如虚拟现实（VR）头戴式显示器），协作者可能不得不或更愿意在不同地点使用不同的计算环境。然而，我们仍然缺乏对在非对称设置中使用虚拟现实进行协作可视化的理解。为了初步了解这一问题，并为非对称系统的设计提供更好的依据，我们首先对 12 对参与者开展了形成性研究。所有参与者都在非对称设置（PC-VR）和对称设置（PC-PC 和 VR-VR）中进行协作。随后，我们根据第一项研究的主要发现和观察结果改进了非对称设计。在后续研究中，另外 10 对参与者在改进后的 PC-VR 和 PC-PC 条件下进行协作。我们发现，设计良好的非对称协作系统可以与对称系统同样有效。令人惊讶的是，使用 PC 的参与者感受到的心理负担较低——非对称设置（PC-VR）中的需求和努力程度与对称设置（PC-PC）相比。我们详细讨论了不同协作场景之间的权衡。

索引词： 以人为中心的计算——可视化——可视化技术；以人为中心的计算——协作与社会计算——协作与社会计算中的实证研究

1 引言

协作可视化 [27]通过提供一种可扩展的解决方案来分工解决日益复杂的数据问题，在现代数据工作流中变得至关重要。此外，许多复杂的数据问题本质上具有跨学科性质，需要具备不同专业知识、可能来自不同地点的人员同步开展分析。尤其是，出于合理的原因，人们对非对称协作越来越感兴趣（即，不同协作者使用不同的计算设备 [18]）。首先，不同的计算设备具有各自的经济性，可以相互补充。例如，配备鼠标和键盘的个人计算机（PC）是最熟悉的设置，能够精确控制视觉元素。虚拟现实（VR）头戴式显示器（HMDs）具有大显示空间 [24, 37, 49], 具身交互 [11, 55, 65, 67, 69],和三维渲染 [1, 9, 17, 31, 32, 68]。其次，人们拥有个人计算机之外的不同设备。他们在使用不同设备时具有不同的偏好、可及性和空间能力 [43]。

然而，我们对人们远程使用可视化进行问题求解时的非对称协作体验缺乏实证理解。现有研究几乎已全面探讨了对称协作（即，在相同平台上协作）

*电子邮箱：wtong@connect.ust.hk
†电子邮箱：mengxia@andrew.cmu.edu
‡电子邮箱：kkwongar@connect.ust.hk §电子邮箱：bowman@vt.edu
¶电子邮箱：tcpong@ust.hk‖电子邮箱：huamin@ust.hk **电子邮箱：yalongyang@vt.edu

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。该记录的最终版本可见于：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

在不同设备上，例如个人计算机 [2, 39, 41], 桌面设备 [54], 和虚拟现实 [8,12,13,34]。与我们的工作最为接近的是，Reski 等人 [45] 测试了在个人电脑与虚拟现实之间进行非对称协作、使用基于地图的可视化分析空间数据的可用性。结果表明，参与者普遍认为非对称协作易于使用。尽管如此，他们并未比较非对称协作与对称协作在任务表现和用户体验方面的差异。为此，我们提出了以下问题：与对称设置相比，分布式非对称环境如何影响使用节点链接图进行协作可视化时的任务表现和用户体验？

为回答这一研究问题，我们开展了一项被试内研究，邀请 12 对参与者，比较非对称设置（PC-VR）与两种对称设置（PC-PC 和 VR-VR）下的协作。我们选择个人电脑与虚拟现实作为研究背景，因为个人电脑是大多数人最熟悉的计算设备，而虚拟现实在沉浸式分析方面已展现出良好的前景 [15]。我们依据以往文献设计了协作问题解决任务 [2, 39]。参与者需要根据文本文件构建节点链接图，并利用该图回答分析性问题。尽管针对这类任务设计个人电脑用户界面已得到广泛探索 [2, 39], , 但针对非对称协作的虚拟现实端界面设计，相关指导仍然有限。作为探索这一设计空间的第一步，我们考虑尽可能使虚拟现实界面隐喻与个人电脑端保持一致，以减轻个人电脑界面与虚拟现实界面之间的通信负担。由于我们通过镜像个人电脑界面来设计虚拟现实界面，因此将其称为镜像虚拟现实。我们发现，非对称条件在绩效和沟通方面与对称条件同样出色。然而，参与者普遍不喜欢这种镜像设计，这表明仍有改进空间，可以进一步调整个人电脑用户界面，使其适用于虚拟现实。

第一项形成性研究帮助我们提炼出非对称设置下协作可视化与交互所需的设计需求。基于这些需求，我们在第二项研究中对非对称条件进行了大幅改进。具体而言，我们优化了文档的呈现方式和虚拟现实交互，并为协作提供了额外的感知支持。因此，虚拟现实中的界面不再与个人电脑上的界面相似。相反，VR界面充分发挥了其固有优势，即大显示空间、空间记忆与导航，以及直观的具身交互。随后，我们与另外十对参与者开展了另一项被试内研究，比较 PC-PC 和 PC-VR。正如预期，大多数参与者发现与更新后的虚拟现实用户界面交互并不困难，而且阅读文档的表现更好。此外，在非对称设置下，使用个人电脑的参与者报告称，完成任务所需的心理负荷和努力程度低于对称设置下的情况。我们还观察到，非对称设置可能会使协作工作中出现隐性角色分配。

总体而言，我们的贡献包括三方面：第一，我们开展了一项形成性研究，以提炼分布式非对称环境下协作可视化的设计需求；第二，我们开发了一款跨虚拟性网络应用，以支持使用个人电脑和虚拟现实的对称与非对称协作可视化；第三，我们开展了一项受控用户研究，探究非对称与对称协作可视化之间的权衡。

2 相关工作

桌面之外的数据可视化。几十年来，数据可视化一直应用于传统桌面环境。随着各类计算设备的发展，研究人员不再局限于个人电脑，开始探索各种设备 [46], , 例如桌面型设备 [28], 、移动设备 [33], 和沉浸式头戴显示器 [51]。每种设备在数据可视化方面都有其优势。例如，移动设备和智能手机便于携带，而大型显示屏和桌面型设备则能轻松支持多人在共享表面上分析数据。因此，可视化设计者和研究人员热衷于探究不同设备在数据可视化中的应用 [40]。近年来，沉浸式头戴显示器发展迅速，数据可视化研究人员也开始探究沉浸式显示器的独特之处及其在数据可视化方面的潜在优势。沉浸式显示器的三大主要优势是大显示空间 [24, 37, 49], 、具身交互 [11, 55, 65, 67, 69], 和三维渲染 [1, 9, 17, 31, 32, 68]。

尽管用于数据可视化的设备类型各不相同，但它们应相辅相成，而非彼此不兼容。例如，Wang 等人 [56] 提出了一种个人电脑与增强现实混合配置，而不是仅使用个人电脑或增强现实来进行三维数据分析。Hubenschmud 等人 [26]也构建了一个可视分析系统，通过现场虚拟现实视图和非现场个人电脑视图来分析混合现实用户研究。此外，增强现实中的数据探索绩效会因个体差异而异，例如空间理解能力和手眼协调能力 [1]。我们设想，未来用户会根据工作环境和个人偏好，选择自己偏好的设备进行数据探索与分析。

协作可视化。数据可视化已广泛应用于复杂问题解决和意义建构任务中的协作 [2, 39], 、环境科学 [6], 以及应急管理协作 [62]。Isenberg 等人 [27] 将协作可视化定义为“多人共同使用计算机支持的（交互式）数据视觉表征，以共同参与联合信息处理活动。”它能够提升同步远程协作的效率和准确率 [2]。

以往研究探讨了个人电脑对个人电脑和 VR-VR 环境下的协作可视化。例如，在个人电脑对个人电脑环境中，Mahyar 和 Tory [39] 通过将笔记链接到数据可视化中的节点链接图，引入了外化支持，以增强沟通与协调。在 VR-VR 环境中，若干研究从可行性和绩效角度考察并评估了协作可视化 [12,34]。Cordeil 等人 [12]开展了一项用户研究，表明群体可以在沉浸式环境中利用 CAVE 和 VR 进行三维图可视化协作数据分析。Lee 等人 [34] 继续研究使用 VR头戴式显示器进行协作，并表明人们能够在协作虚拟环境中创建和使用二维及三维可视化来开展数据探索。除了个人电脑对个人电脑和 VR-VR 环境，研究人员还利用增强现实（AR）支持基于地理数据的有效分布式协作 [38] 以及基于多变量数据的同地协作 [7]。

大多数协作可视化研究都聚焦于对称协作，即所有用户仅在个人电脑、虚拟现实或增强现实环境中共同工作。然而，每种设备类型都有其特点和优势，而且人们可以使用不同的设备。因此，人们可以使用不同类型的设备进行协作 [15]。不过，协作可视化中的非对称视角仍未得到充分探索。

非对称协作。除了对称协作 [50]之外，近年来也有研究探讨非对称协作，即通过不同设备进行交互并查看内容以开展协作 [18], 。不对称性并非需要克服的挑战或限制，而是一种常见的社会互动形式 [43]。研究者开展了多项研究，以支持使用不同设备进行协作。例如，ShareVR [20]和 ShARe [29]被提出，用于支持沉浸式用户（分别使用虚拟现实和增强现实头显）与非沉浸式用户（使用投影设备和移动设备）之间的沟通，以及远程用户与本地用户之间的沟通 [42]。此外，Sugiura [53] 提出了 Dollhouse VR，以支持客户与建筑师之间的非对称协作。具体而言，建筑师可以使用桌面设备修改房间，而客户则可以沉浸其中，体验不同的房间设置。类似地，Welsford 等人 [60] 实现了一个协作系统，使用户能够在半沉浸式大型显示器上观看并与另一位使用虚拟现实头戴式显示器的沉浸式用户交流。此外，Grandi 等人 [18] 发现，处于非对称设置（虚拟现实-增强现实）中的参与者

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。该记录的最终版本见：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

表现显著优于增强现实对称设置，与虚拟现实对称设置相近。

然而，关于数据可视化情境下的非对称协作，相关研究仍然有限 [45]。作为第一步，我们开展研究，以加深对非对称协作可视化的理解，尤其关注设备的非对称使用。我们的研究结果有助于指导未来非对称协作可视化系统的设计。

3 形成性研究

我们开展了一项形成性研究，以了解人们如何在非对称环境中利用数据可视化进行协作，以及与对称设置下的协作相比有何不同。我们纳入了两种对称条件（即PC-PC 和 VR-VR）和一种非对称条件（即 PC-VR）。本研究已获作者所在大学的机构审查委员会批准。

3.1 参与者

我们通过向当地大学发送招募邮件并口耳相传，招募了24名参与者（7名女性、17名男性，年龄为18至34岁），他们均为本科生或研究生。24名参与者中有18名主修计算机科学。其余六人分别来自生物学、机械工程、计算机工程、工程学、地理信息系统以及建筑与设计专业。关于数据可视化和虚拟现实经验，参与者报告称，他们使用交互式数据可视化（例如阅读交互式信息图文章和使用可视化仪表板）以及VR头戴式显示器（例如玩VR游戏和使用VR应用程序）的时间分别为两年以上（可视化12人、VR 3人）、一至两年（4人和6人）、一个月至一年（4人和4人）、不足一个月（1人和9人）以及从未使用过（3人和2人）。研究确认，三名没有可视化背景的参与者能够阅读和创建节点链接图。研究还确认，两名没有虚拟现实经验的参与者具有相关经验，即使用过VRChat电脑版和智能手机式VR头戴式显示器。参与者组成了12对。组员之间的熟悉程度如下：彼此非常熟悉（3对）、相识（5对）和陌生人（4对）。关于协作经验，五名参与者表示他们每天都有协作活动，13人每周都有，四人每月都有，两人每月不到一次。

3.2 任务与数据

我们借鉴了研究协作式可视化的相关研究 [2, 39], , 在本研究中采用了类似的问题解决任务。在每种条件下，小组都需要阅读一组文档，并从中推断出一起非法事件。参与者需要通过回答谁、什么、何地、何时、如何以及为何等问题，指出相关细节。他们还需要创建并操作节点链接图，以便解决问题。我们选择这项任务有以下原因。首先，节点链接图不需要较高的可视化素养 [64]，且常用于问题解决和意义建构任务，以揭示不同实体之间的关系 [36]。尤其是在协作中，节点链接图有助于外化用户思维，并提升任务表现和准确率 [2,39]。此外，研究发现，三维节点链接图在虚拟现实中效果良好，这进一步增强了我们在本研究中使用虚拟现实的动机 [3, 57–59]。借助虚拟现实中的运动和深度线索，人们观察节点间路径时的错误率低于使用个人电脑时的错误率 [59], , 这可能为非对称设置带来益处。

我们使用了来自 VAST 2007 挑战赛的 Blue Iguanodon 数据集 [19], , 其中约有 1700 份文档。该数据集曾用于研究生阶段的教育，因此其难度适合本科生和研究生 [61]。任务是从提供的文档中找出针对野生动物的意外非法活动。为避免在同一数据集上产生学习效应，我们提取了三个包含不同非法活动的子集（即毒品贩运、野生动物走私和生物恐怖主义），并将每个子集分别对应到一个小组的三个条件之一。考虑到用户研究会话 [70], 的时间限制，我们检索并提供了与每个子集最相关的文档。最后，每个子集都包含六份文档，且总字数相近（即分别为 813、779 和 805 字）。

3.3 设计与实现

为支持在上述任务中使用文档和节点链接图，我们设计了一个原型系统，包含两个主要视图：文档视图和节点链接图视图，分别适用于个人电脑和虚拟现实，如图 2 所示。我们的个人电脑用户界面主要借鉴了以往的研究 [2, 39]。与此同时，由于设计此类虚拟现实用户界面的指导有限，我们将镜像虚拟现实 作为探索这一设计空间、降低两种不同计算环境之间沟通成本的第一步。镜像虚拟现实是指虚拟现实应用在交互和视觉界面方面的设计与个人电脑应用相似。两者的主要区别在于工作环境的维度以及图可视化方式（即，个人电脑上为二维，虚拟现实中为三维）。这一决定基于实证证据，该证据表明，在虚拟现实中，三维图可视化优于二维图可视化 [32, 66]。

文档视图。 文档视图包含四个组件：用户列表、任务描述、文档列表和选中文档。用户列表（图 2；A1、B1）显示当前房间内的所有用户。每位用户都有专属颜色，用于标示其创建的节点和视锥体。任务描述（图 2；A2、B2）显示用户需要完成的任务。此视图的加入是为了明确提醒参与者需要回答的关键要素，即谁、什么、何时、何地、如何以及为何。文档列表（图 2；A3、B3）显示所有可用文档，包括文档ID、文档标题以及所有用户当前的阅读状态。用户可以从文档列表中选择一份文档，并在下方查看（图 2；A4、B4）。

节点链接图视图。 节点链接图视图（图 2；A5、B5）是用户创建和阅读节点链接图的空间。二维和三维图可视化分别呈现给个人电脑用户和虚拟现实用户。所有用户共享该可视化，因为它能提升绩效、鼓励协作者使用该工具，并促进讨论 [2]。该可视化包含：

- 节点：用户可以移动、添加、修改、合并和删除 图可视化中的节点。用户可以在文档中选取文本，并将其放入图可视化中，从而为文档中的实体添加节点。节点的颜色表示创建该节点的用户。
- 连线：用户可以通过添加连线来定义两个节点之间的关系。同样，连线的标签也取自文档。用户可以在图可视化中添加、修改和删除 连线。

为了在协作过程中保持相似的图布局，我们首先计算节点链接图的三维布局。我们为虚拟现实用户应用三维力导向图布局，然后将其投影到二维 XY 平面，为个人电脑用户呈现。为避免特定节点重叠，我们对二维投影布局再次应用参数相同的力导向布局，同时保持未重叠节点的位置不变。此外，我们为节点链接图视图提供了一个概览窗口。在个人电脑上，我们使用小地图（图 2(A6)）；在虚拟现实中，我们使用 World In Miniature [52]（图 2(B6)）。

交互设计。 用户可以在个人电脑上使用鼠标与应用程序交互，也可以在虚拟现实中使用虚拟现实控制器进行交互。

- 鼠标：用户可以捏合 和拖动，在个人电脑上缩放和平移图可视化。随后，右键单击 节点，即可打开上下文菜单，执行删除、合并、移动、引用文档和高亮等操作。

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。本文最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

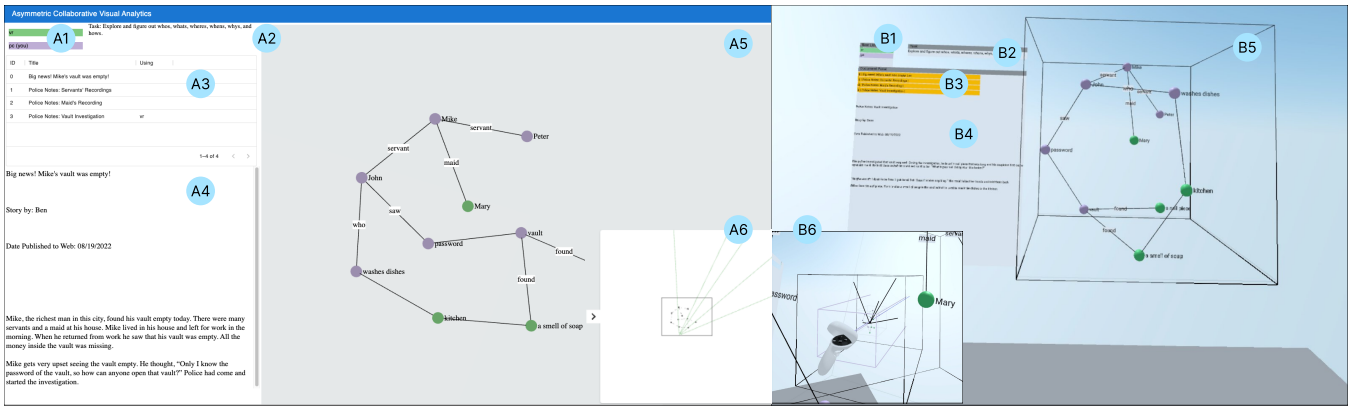

图 2：该图展示了形成性研究中使用的原型，包括个人电脑平台（A1-A6）和虚拟现实平台（B1-B6）。个人电脑和虚拟现实中的应用均由五个组件构成：用户列表（A1、B1）、任务描述（A2、B2）、文档列表（A3、B3）、选中文档（A4、B4）以及节点链接图（A5、B5）。个人电脑（A6）和虚拟现实（B6，连接在左手上）均提供了一个概览窗口（即节点链接图的迷你版本）。个人电脑上使用小地图（A6），而虚拟现实中使用迷你立方体（B6）。黑色线条表示当前用户的视锥体，其他颜色则表示相应颜色的其他用户视锥体。

- 虚拟现实控制器：用户可以使用双手操控缩放和旋转图形可视化内容。此外，用户可以通过按下扳机按钮并拖动文档中的文本来选择单词。与个人电脑类似，我们在虚拟现实中提供了相同的上下文菜单。不过，用户需要长按节点 1 秒，才能对节点执行“右键单击”。

协作感知支持。我们在文档列表视图、节点链接图视图和概览窗口中提供了感知支持。首先，我们在文档列表视图中通过在图 2(A3) 的“使用者”列列出用户姓名，显示所有用户的文档阅读状态。其次，我们添加了视觉提示，以显示所有用户的节点选择状态，从而在支持图可视化感知的同时，尽量减少对分析的干扰 [41]。如图 4 所示，当用户选择一个节点时，其他所有用户都能看到该节点上方出现一个方块（在虚拟现实中为立方体），其颜色为该用户的代表色。第三，我们使用节点创建者的代表色对节点进行编码，这与先前的研究类似 [39]。最后，我们在概览窗口中提供了头部射线和视锥体，以支持感知 [65]。在个人电脑上，其他协作者的头部射线和视锥体会被投影显示（图 2(A6)）；而在虚拟现实中，它们会直接显示出来 [44]。这些颜色代表不同的用户。

实现。我们使用 React.js、d3.js、three.js 和 WebXR 实现了 PC 和 VR 应用程序。为了支持不同应用程序之间的沟通，我们采用了客户端-服务器架构。我们使用 Node.js 和 gRPC 实现了服务器

以实现快速数据传输。所有操作和布局计算均在服务器上完成，结果通过流式传输发回客户端。我们在扩展版 d3-force[1] 提供的二维和三维节点链接图上使用了力导向布局算法。代码已开源，地址为 https://github.com/asymcollabvis/ asymcollabvis。

3.4 实验设备与设置

如图3所示，我们的实验设置包含三种条件：PC-PC (A)、PC-VR (B) 和 VR-VR (C)。我们在参与者之间放置了一块标准办公白板，以模拟分布式协作场景，但允许他们像使用在线通信工具时一样相互交谈。

3.5 流程

研究分为四个部分：引言、培训、主要研究和总结访谈。研究持续约 120 分钟，并向每位参与者提供一张价值 20 美元的亚马逊电子礼品卡作为报酬。研究过程进行了录音，并记录了系统操作。

[1]https://github.com/vasturiano/d3-force-3d

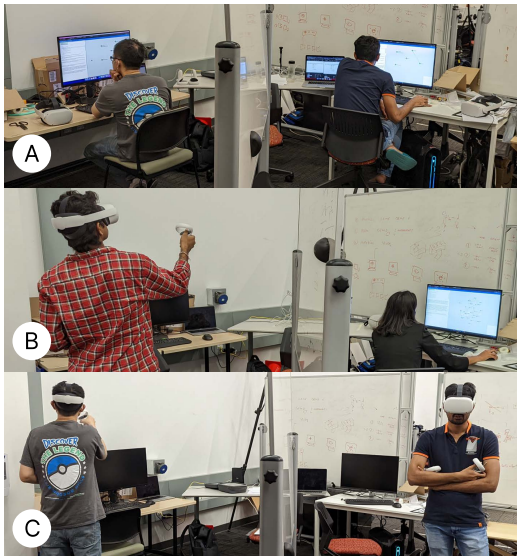

图3：图中展示了两位参与者在 PC-PC（A）、PC-VR（B）和 VR-VR（C）条件下协同工作的情形。中间放置了一块标准办公白板，以模拟远程环境。

引言（5 分钟）。一对参与者受到欢迎，并获知研究目的、研究时长以及相关设置。随后，参与者阅读知情同意书；如果同意并愿意继续参与研究，便在同意书上签字。参与者获知，他们可以随时休息，也可以在研究的任何阶段退出。

训练（30分钟）。主持人根据既定指南 [64]介绍了 PC 和 VR 可视化系统。由于部分参与者缺乏使用 VR 头戴式显示器的经验，因此先介绍 PC 系统，再介绍 VR 系统，以降低学习曲线。主持人使用相同的数据和任务演示了 PC 和 VR 交互，展示参与者在两个系统中都能完成哪些操作。随后，参与者练习所介绍的功能，并分别在 PC 和 VR 系统中完成训练任务。训练任务是找出潜在犯罪，与主要任务相同，但使用了一个更简单的数据集，其中仅包含四份文档（共318个单词）。

主要研究（75分钟）。每对参与者都在主要研究中体验了全部三种条件。我们使用平衡拉丁方方法平衡了条件的顺序 [5]并进行了

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。本记录的最终版本可在此处获取：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

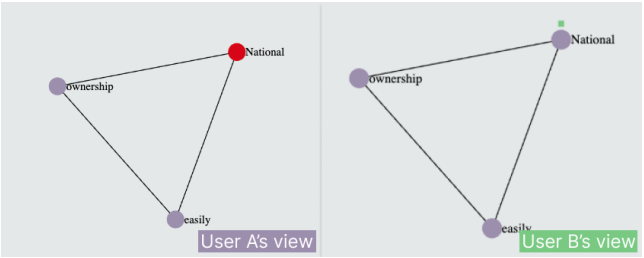

图4：该图展示了选择节点时的高亮功能。当用户 A 选择一个节点（红色节点）时，用户 B 可以看到所选节点上方出现一个方块（在虚拟现实中为立方体），其颜色为用户 A 的代表色。

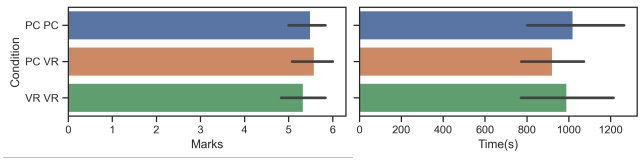

图5：该图展示了三种条件下任务平均完成得分和完成时间的均值及 95% 置信区间。

控制数据集的顺序。向小组介绍了任务的大致背景。每种条件开始前，我们都会提醒参与者任务背景和任务内容。我们鼓励他们：1）尽早开展协作；2）分发文档；3）共同讨论如何使用图可视化。每种条件结束后，参与者休息 5 分钟。休息期间，他们需要填写 NASA 任务负荷指数（TLX）问卷 [22] 和行为投入问卷 [4],，以测量任务负荷和社会临场感，这些问卷改编自先前的研究 [18]。随后，我们针对每种条件下的协作策略、益处、挑战和建议进行了简短访谈。

总结访谈（10分钟）。完成主要研究后，我们让参与者填写问卷，为各项条件排序。随后，我们讨论了他们的偏好，以及他们参与研究并使用原型系统所获得的潜在灵感。

3.6 偏好

17名参与者更喜欢在对称环境中协作（16名选择PC-PC，1名选择VR-VR），另有7名参与者更喜欢非对称协作，而非对称设置。我们利用亲和图分析法，根据参与者的定性反馈进一步分析了原因 [23]。我们将24名参与者标记为P1-24，将12对参与者标记为G1-12。

对称协作。所有参与者都认为，对称协作是“最熟悉的”协作环境，尤其是PC-PC。对于PC-PC，参与者也喜欢PC界面“易于控制”。参与者形容VR-VR“沉浸感强”且“很酷”，但也“学习曲线较陡”，并且“难以交互和阅读文档”。

非对称协作。PC-VR总体上被参与者接受，7名参与者更喜欢非对称协作——

与两种对称设置相比，非对称设置更.....五位参与者（P8、P15-17、P21）认为，在协作过程中使用不同设备可以兼得两种设备的优势。例如，P21评论道“用二维方式交互很自然；如果两个人都使用三维方式，视觉呈现会更容易，但通过*PC-VR*，我们能同时获得两者的优点。”基于非对称设置带来的优势，四位参与者（P4-6、P8）表示，非对称协作促使他们进行沟通并分工。例如，P6解释道“*PC*用户可以轻松获取信息，而*VR*用户则有助于引导会议和讨论。”最后，三位参与者（P18、P20、P23）肯定非对称协作有助于参与者使用自己偏好的设备进行协作。例如，P18

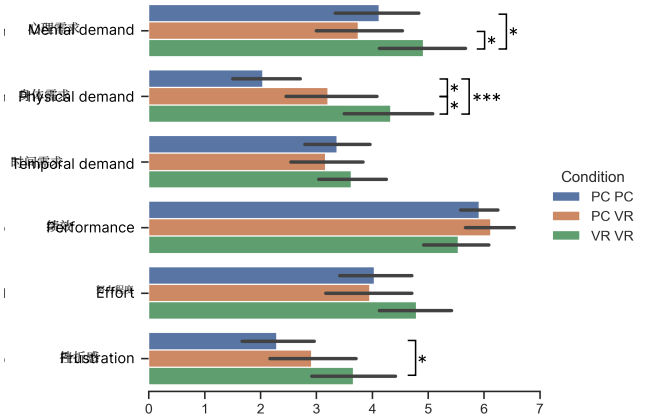

图6：该图显示了三种条件下NASA任务负荷问卷的均值和95%置信区间。

指出，“我认为这主要是因为他（*P17*）更习惯使用个人电脑，所以他负责放置节点；而我更习惯使用虚拟现实，所以我负责放置节点并连接它们.....我看到他添加了很多节点，这也激励了我把这些节点连接起来。”这与先前研究的发现一致：非对称设置能够提升动机 [14]。然而，谈及协作经验时，P1和P11表示，他们不适应非对称工作空间。P1表示，她不习惯在不同环境中协作。P1还补充道，“这让人很不自在，因为我的搭档身处不同的环境，我没法帮助他。”P14认为，“如果我们都处于视觉空间中并使用相同模式，或许更容易与他人协作”。

3.7 主要发现

我们收集了各条件下的任务完成时间和准确率，以及关于任务负荷和社会参与的反馈。对于任务完成准确率，我们记录了对谁、什么、哪里、何时、为什么和如何 [19]的回答。每个正确答案计一分，满分为六分。下文报告形成性研究中发现的主要结果。

F1. 非对称设置不会影响绩效和沟通。在形成性研究中，无论用户使用何种平台，他们获得的用户界面和交互几乎完全相同。唯一的不对称之处在于图可视化的维度。通过使用弗里德曼检验比较收集的数据，我们发现，如图5所示，各条件之间的正确性（$\chi^2 = 0.167$，$p = 0.920$）和耗时（$\chi^2 = 0.667$，$p = 0.717$）没有显著差异。然而，尽管我们预期使用虚拟现实会显著增加身体负荷（$\chi^2 = 22.6$，$p = 1.25e^{-5}$），但我们发现，非对称设置与虚拟现实对称设置之间的心理负荷存在显著差异（$\chi^2 = 8.22$，$p = 0.0164$），如图6所示。一个可能的原因是，虚拟现实用户能够获得个人电脑用户的支持，而后者更熟悉控制操作。

F2. 口头沟通和共享数据可视化对于非对称设置十分重要。根据访谈反馈，参与者表示，当其搭档使用不同设备时，他们并未感到有任何区别。一个主要原因是，参与者仍然能够彼此交谈。例如，P12说：“我觉得其他人用什么设备进行协作都没有区别。原因之一是我们可以交谈。如果我们不能彼此交谈，情况可能就不同了。”此外，参与者还提到，共享数据可视化也是人们在不同环境中协作的重要因素。例如，P22说：“对我来说，因为我能看到她画的内容，所以我觉得在这种情况下，协作相当简单。”

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。最终版本请见：xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

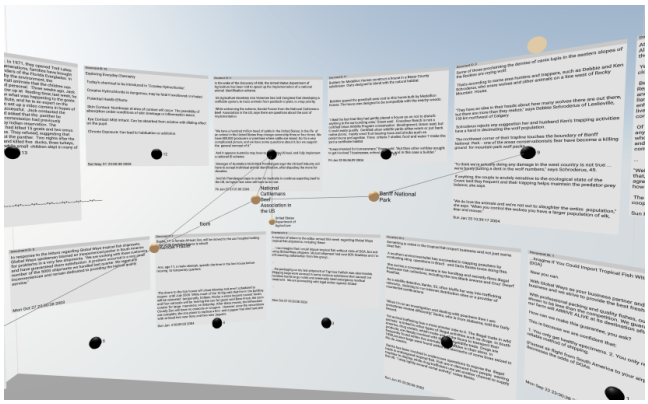

图7：在虚拟现实中，文档以半圆形布局排列。黑色节点分别代表各个文档，并在初始阶段创建。为保持更好的空间布局，系统会在创建的节点（棕色节点）与当前选中的文档之间添加一条默认链接。

F3. 优化协作双方。通过采用镜像设置，我们观察到，与对称设置相比，参与者在沟通和使用图可视化方面并无差异。不过，参与者提出了一些功能建议，以改善他们使用设备的体验。首先，参与者建议允许在个人电脑上使用键盘自定义输入（G10）。此外，半数小组（6/12）指出，当前的虚拟现实设计未能充分发挥虚拟现实的优势。例如，G2和G7提到，虚拟现实中的三维空间并未得到充分利用；G9则评论道："要让我们逐个添加点，或者专门添加连线，真的很难。"因此，系统应增强各个平台的能力，尤其是个人电脑上的图创建能力，以及虚拟现实中对空间和交互的利用。

F4. 参与者更倾向于使用明确的视觉提示来增强协作感知。参与者希望获得更明确的感知提示。他们认为，目前引导另一位协作者注意力的方式不够明显，也不易察觉。P14 表示："我的伙伴选中某个节点时，该节点会高亮显示，但我看不出伙伴的注意力如何在图（可视化）中持续移动。"P21 提议："我认为，如果能在屏幕（个人电脑）上看到其他人的光标，会更好。"此外，G3 的两位参与者都指出，如果虚拟现实用户不说话，个人电脑用户就会完全忽略对方。参与者也更希望在虚拟现实中以化身的形式看到其他人，而不是在概览窗口中通过视锥体来感知对方。

F5. 不足之处。尽管第一项研究提供了富有启发性的发现，但也存在一些不足之处。首先，我们观察到参与者对 VR-VR 的偏好意外地低。主要原因是在面对面研究中很难找到精通虚拟现实的参与者，尤其是在 COVID-19疫情期间。参与者重-

指出，较高的学习曲线和不熟悉的控制方式是他们使用 VR 界面协同工作的障碍。其次，大多数参与者倾向于口头交流，而不是使用可视化来解决问题。原因之一可能是当前任务过于简单，因为数据量较小；因此，用户可以记住不同文档中的实体，或快速搜索这些实体。根据任务负荷问卷，参与者报告的努力程度仅为中等（PC-PC：$m = 4.04$，$sd = 1.68$；PC-VR：$m = 3.96$，$sd = 1.90$；VR-VR：$m = 4.79$，$sd = 1.64$）。这项研究可能存在天花板效应。

4 面向问题解决的非对称协作可视化设计

基于第一项研究的关键发现，我们尝试优化个人体验，以探究这是否能改善协作体验。

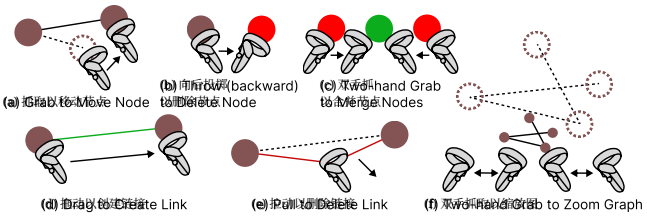

图8：VR应用程序中提供的具身交互：用户可以 (a) 抓取节点并移动；(b) 将节点向后投掷以移除节点；(c) 同时使用两个控制器抓取两个节点，以合并节点；(d) 将一个节点拖动到另一个节点上以创建链接；(e) 向后拉动链接以移除该链接；(f) 使用两个控制器抓取图可视化并将其拉近以放大。绿色表示将要添加的节点/连线。红色表示将要删除的节点/连线。箭头表示控制器的移动方向。

我们改进了原型，并进行了以下调整，以优化双方的信息呈现和交互（F3），并增强协作感知（F4）。具体而言，针对 F3，我们（1）在个人电脑条件下添加了输入功能，以支持自定义标签；（2）调整了文档在空间中的分布，以支持虚拟现实中的空间意义建构；（3）在虚拟现实中添加了用于添加/删除节点/连线的具身交互。针对 F4，我们通过在个人电脑和虚拟现实中显示光标，并在虚拟现实空间中显示视锥体，使协作感知提示更加明确。

4.1 优化个人电脑和虚拟现实端

在个人电脑端提供自定义标签。总体而言，个人电脑提供了最熟悉的输入设备——鼠标和键盘，便于进行精确控制，本研究中也是如此。例如，大多数参与者表示，相比在虚拟现实中，他们更擅长在个人电脑上操控图可视化，因为他们对虚拟现实控制器还不熟悉，也不习惯用它来与图可视化交互。此外，参与者建议，支持自定义标签输入有助于利用图可视化解决问题。因此，我们在个人电脑端启用键盘，以便创建和重命名标签。具体来说，我们添加了一个输入文本框，让用户可以为节点和连线输入标签，而不只是从文档中选择词语。

在虚拟现实中支持空间意义建构。形成性研究中的参与者建议提供更具沉浸感的 VR 经验。此外，近期研究探讨了利用虚拟现实中的大显示空间进行意义建构和数据分析的益处 [16,37]。例如，借助空间参照，用户对文档内容的记忆有所增强 [63]。此外，Hayatpur 等人 [24] 提出了 DataHop，以支持空间数据探索，并展示了对工作流程进行空间映射能够鼓励用户探索数据，同时清晰地呈现分析聚类，避免产生混淆。因此，我们优化了空间使用，以支持问题解决和意义建构。

我们首先将分布在空间中的文档排列成半圆形，如图 7 所示。半圆形布局是沉浸式可视化和文档阅读中最常见的布局 [24, 49]。此外，我们将文档空间与可视化空间结合起来。用户可以在空间中的任意位置创建节点。为了加强文档与图可视化之间的空间关系，我们在每个文档前放置了一个节点，并通过在新创建的节点与当前选中的文档节点之间添加默认链接，将新创建的节点与文档之间的关系外化，以获得更好的空间布局（图 7）。

支持虚拟现实中的具身交互。除了利用不受限制的空间外，我们还为虚拟现实中的节点链接图部署了更自然、更具身的交互，而非类 WIMP 交互。具身交互有望为沉浸式分析带来益处 [16]。近期研究 [11, 55, 65, 67, 69] 利用具身交互提升了数据分析过程中的有效性和参与度。Sim-

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。本文记录的最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

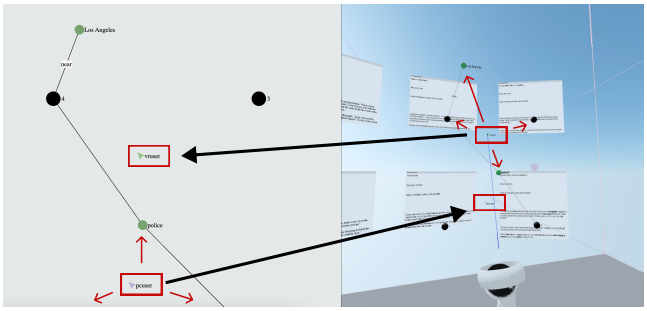

图 9：用户可以在个人电脑或虚拟现实中看到其他用户的深度自适应光标。光标的标签表示光标所属的用户。红色箭头表示通过沃罗诺伊图找到的自然邻居。我们将计算得出的节点权重和 ID 发送到另一个平台（沿黑色箭头所示）。另一个平台可以根据收到的 ID 的位置及其对应权重重新定位光标。

类似地，如图 8 所示，我们将球的隐喻用于节点，将橡皮筋的隐喻用于连线。用户可以移动和抓取节点，也可以通过投掷节点将其删除，这类似于移动并扔开一个球。对于连线，用户可以先选中一端，再拉向另一端，从而在两个节点之间添加连线，就像用橡皮筋将多个物体捆在一起一样。要移除连线，用户可以抓住它并将其拉至连线断开处，这类似于扯断橡皮筋。

4.2 在个人电脑和虚拟现实中明确呈现感知信息

在第一项研究中，参与者没有使用高亮功能来查看协作者选中的节点。相反，为了保持感知和沟通，参与者更直接地希望在图可视化中看到协作者注意力的视觉提示。此外，个人电脑和虚拟现实应用程序之间的不对称性越高，沟通方面的挑战就越大，因为两者的界面差异更大。我们决定在二维和三维环境中都实现一种更加明确、始终显示的感知提示——光标；这种提示也常用于 Miro 和 Microsoft Whiteboard 等商业协作软件中，如图 9 所示。

我们借鉴了用于在虚拟现实中使用鼠标输入的深度自适应光标 [71]，通过根据协作者的光标位置、视点和节点，在二维和三维中对光标位置进行插值，为所有用户提供适用于两个平台的深度自适应光标。具体来说，我们首先通过计算沃罗诺伊图，找出个人电脑中光标或虚拟现实中射线的自然邻居。随后，我们使用拉普拉斯权重计算每个邻居的权重。最后，将权重和邻居信息发送给所有其他用户。通过对其他用户在个人电脑中的光标或虚拟现实中的射线所对应的节点位置进行插值，我们在另一个环境中重新定位光标。

此外，我们将视锥体直接放置在空间中，以显示其他用户在 VR 中的视野范围。最初，我们在 VR 的概览窗口中提供视锥体（图 2(B6)）。然而，我们观察到，大多数用户会隐藏 VR 中的迷你立方体，并表示难以理解其含义。参与者提到，他们希望在 VR 空间中看到其他人。因此，我们将视锥体和头部射线从概览窗口移至工作空间。视锥体和头部射线可以充当简化的化身，并提高用户对协作者存在及其行为的感知。

5 用户研究

我们开展了一项受控被试内研究，探索并评估改进的非对称条件如何影响问题解决任务中的协作。我们分析了对称环境（即，PC-PC）和改进的非对称环境（即，PC-VR）对协作的优缺点。根据形成性研究，我们发现，大多数参与者会口头报告自己的发现，而不是阅读图可视化来进行协作，因为文档数量较少，他们能够记住这些发现。因此，我们提高了任务难度，并将每种条件下的实验时长设定为平均一小时。我们没有纳入 VR-VR 条件，因为 VR经验水平的差异会给先前的研究引入混杂因素。排除 VR-VR 的另一个原因是将实验时间控制在合理范围内。此外，找到两名 VR经验充足且相近的参与者颇具挑战，尤其是在 COVID-19疫情期间。在 PC-VR 条件下，我们确保 VR 参与者具备一定的 VR经验。由于没有 VR-VR 条件，参与者在研究过程中没有感到不适或疲劳。

5.1 参与者

我们通过发送招募邮件和口耳相传的方式招募了 20 名参与者（6 名女性、14 名男性，年龄 18–39 岁），他们均为本科生或研究生。12 名参与者主修计算机科学，其余参与者分别来自工程学（6 人）、计算机工程（1 人）和生物学（1 人）。在数据可视化和 VR 经验方面，参与者报告称，他们使用交互式数据可视化和 VR 头戴式显示器的时间分别为两年以上（可视化 7 人，VR 1 人）、一至两年（7 人和 5 人）、一个月至一年（3 人和 4 人）、不足一个月（1 人和 5 人）以及从未使用过（2 人和 5 人）。经确认，两名没有可视化背景的参与者能够阅读和创建节点链接图。为避免因不熟悉 VR 设备而导致结果偏差，未向五名没有 VR 经验的参与者分配 VR 头显。参与者被分为十组，每组两人。各组成员之间的熟悉程度如下：彼此非常熟悉（3 组）、相识（3 组）和陌生人（4 组）。关于协作经验，三名参与者表示他们每天都会进行协作活动，一名表示每周进行，三名表示每月进行，另有三名表示每月少于一次。

5.2 任务与数据

我们选择了与初步研究相同的任务，以及其中两个数据集（即贩毒和野生动物走私）。为了增加任务的复杂度和图可视化的使用，我们在原始数据集中加入了额外的背景文档或无关文档。每种条件下的文档总数从 6 份增至 15 份，词数分别为 2583 和 2518。

5.3 设备、设置与流程

设备和设置与第一项研究相同。不过，每对参与者只需在两种条件下完成任务；鉴于任务复杂度提高，我们为每种条件提供了更多时间（即约 35 分钟）。与第一项研究相同，我们使用平衡拉丁方方法 [5] 对条件顺序进行平衡，并控制数据集的顺序。

5.4 测量与研究问题

为了回答研究问题：不对称性如何影响分布式协作可视化的用户体验，我们主要考察绩效和协作。具体而言，我们关注五个方面：任务效率、感知任务负荷、图可视化使用情况、行为参与度和沟通过程，这些方面改编自以往研究 [39]。最后，我们还通过排序收集了参与者对两种条件的偏好。

为了衡量绩效，我们主要依据先前的研究，关注任务效率、感知任务负荷和图可视化使用情况 [2, 39]。与形成性研究相同，在任务效率方面，我们收集了关于谁、什么、哪里、何时、为什么和如何的答案。我们还使用 NASA-TLX 问卷 [22] 收集了用户感知的任务负荷。此外，与形成性研究不同，在图可视化使用情况方面，我们记录了所有场次中的交互行为。第 3.3 节中提到的所有操作均已记录。

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。本文的最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

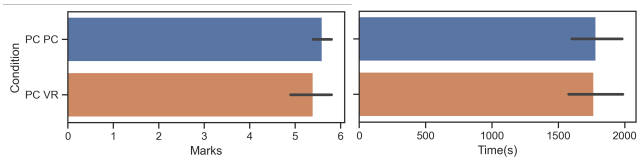

图10：该图显示了两种条件下平均得分和完成时间的均值及其 95% 置信区间。

为了衡量协作，我们考察了行为参与度和沟通过程。我们使用 Networked Minds 社会临场感测量量表的答复来衡量行为参与度 [4]。为了分析沟通过程，我们对各场次进行了录音，并将转录文本编码为六类：假设讨论（DH）、提及可视化（RV）、协调（CO）、寻求认知（SA）、口头表达发现（VF），以及询问另一位组员的发现（QF） [39]。

6 结果

我们采用 Wilcoxon符号秩检验，检验 PC-PC 与 PC-VR 之间是否存在显著差异。此外，我们还关注个体差异。我们进一步将分别在 PC-PC 和 PC-VR 条件下使用 PC 的**个体**记为**I1**，并将使用不同设备（即，在 PC-PC 中使用 PC、在 PC-VR 中使用 VR）的个体记为 I2。我们又进行了一次 Wilcoxon符号秩检验，以检验以下各组之间的成对差异（即，PC-PC 中的 I1（PC-PC_{I1}）与 PC-VR 中的 I1（PC-VR_{I1}）、PC-PC 中的 P_{I2}（PC-PC_{I2}）与 PC-VR 中的 P_{I2}（PC-VR_{I2}），以及 PC-VR 中的 P_{I1}（PC-VR_{I1}）与 PC-VR 中的 P_{I2}（PC-VR_{I2}））。为了分析定性数据，我们采用亲和图分析 [23] 来整理反馈。

6.1 绩效

在准确率和时间方面，我们未发现 PC-PC 与 PC-VR 之间存在显著差异（图 10）。

就感知任务负荷而言，我们也未发现 PC-PC 与 PC-VR 之间存在显著差异。不过，如图 11 所示，我们发现不同个体之间以及同一个体在不同条件下均存在显著差异。对于不同条件下的个体比较，P_{I1} 发现自己在非对称条件（PC-VR_{I1}）下的心理需求较低（$p = 0.0412$），付出的努力程度也较少（$p = 0.0235$），而在对称条件（PC-PC_{I1}）下则不然。然而，P_{I2} 发现自己在非对称条件（PC-VR_{I2}）下更加困惑（$p = 0.0473$），身体需求也更高（$p = 0.0260$），相比之下，在对称条件（PC-PC_{I2}）下则较低。对于非对称条件内的个体比较，P_{I2}（PC-VR_{I2}）的身体需求更高（$p = 0.0144$），付出的努力程度也更高（$p = 0.0278$）高于 P_{I1}（PC-VR_{I1}）。

我们统计了交互日志中的操作次数（由于遗漏了 G2 和 G3 的交互日志，我们仅统计了 8/10 组的数据）。除虚拟现实中的文档检索平均次数显著高于个人电脑外（$m = 137$，$sd = 111$）与（$m = 44.4$，$sd = 35.6$）（即，参与者在个人电脑上点击文档，以及参与者在虚拟现实中查看文档）（$p = 0.00854$，效应量 = 0.467），我们未发现不同条件和个体之间的操作使用存在显著差异。

6.2 沟通

我们未发现对称条件与非对称条件之间，不同类型实例的平均数量和行为投入度存在显著差异。

6.3 偏好

11 名参与者偏好 PC-VR，另有 9 名参与者偏好 PC-PC。与第一项研究类似，我们根据他们的定性反馈分析了偏好的原因。

对称协作。偏好对称设置的主要原因是，它能营造平等的协作环境

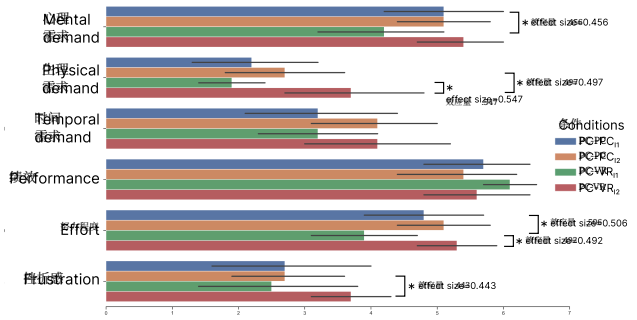

图 11：该图展示了两种条件下参与者的 NASA任务负荷问卷均值和 95% 置信区间。I1 表示在两种条件下都使用 PC 的参与者；I2 表示在 PC-PC 条件下使用 PC、在 PC-VR 条件下使用 VR 的参与者。我们还报告了根据公式 $z\sqrt{N}$ [47] 计算的效应量。

以及人们对该环境的熟悉程度。四位参与者（P3、P8、P13 和 P16）表示，在对称设置下，他们的协作更加顺畅。例如，P16 赞赏道：“工作分配得很均等，而且能够交流文档的相关内容。”P8 抱怨道：“我更难弄清楚对方在虚拟现实中做什么。”此外，四位参与者（P3、P5、P7、P15）注意到，他们的搭档在对称协作中表现得更好。例如，P3 评论道：“我的搭档也使用个人电脑时，回应更快了。在虚拟现实中，他读得比以前慢。”而 P7 则表示：“处于虚拟现实条件下的人可能更专注于使用工具，而不是协作本身。”

非对称协作。偏好 PC-VR 而非 PC-PC 的主要原因是能够实现分工并提升文档阅读体验。8 名参与者（P1、P9、P11-12、P15、P17-18、P19）表示，非对称设置隐式地划分了他们的角色，并为协作带来了益处。例如，在 G9 中，P17 评论道：“我认为 *PC-VR* 条件下的协作经验效率更高，因为一名参与者可以掌握故事的全貌，而另一名参与者则可以专注于每份文档。”P18 补充道：“就协作而言，同时使用 *VR* 和 *PC* 能让我们的优势互补。我可以在 *VR* 中同时查看所有文档，而我的搭档可以在 *PC* 上轻松管理节点。”P15 还表示：“既然我知道 *VR*用户有一些限制（无法输入自定义标签），我就愿意多帮帮他，从而促进更多协作。……我认为这很好，因为这让我更有动力参与协作。”

此外，三位使用虚拟现实的参与者（P6、P10、P18）也很欣赏这种空间使用方式，它便于查看文档和图可视化。例如，P18 提到：“虚拟现实环境让我可以同时看到所有文档。它还让我能够轻松记住哪些文档是我感兴趣的，以及它们位于哪里。”P6 进一步补充道：“在虚拟现实中阅读不同的文档很容易，因为它们都显示在同一个屏幕上，我只需在它们之间跳转。”P10 也评论道：“相比个人电脑，我更喜欢在虚拟现实中工作，因为我可以看到所有文章和图。故事就在我眼前。”

7 讨论

优化两端能够提升用户对非对称协作可视化的偏好。从这些研究中，我们发现，优化个人电脑和虚拟现实有助于提升用户对非对称协作可视化的偏好。与镜像虚拟现实相比，我们发挥了两端各自的优势：通过增强空间意义建构和具身交互来优化虚拟现实，并通过增强打字功能来优化个人电脑。目前这种非对称实现有一个显而易见的问题：不同设备之间增加的视觉和交互差异可能会导致更多沟通努力。

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。本文最终版本可见：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

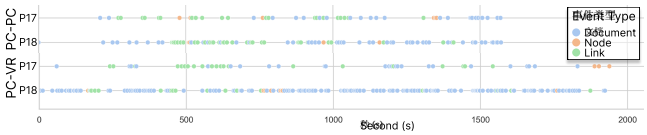

图12：G9（P17-P18）的交互日志。P17专注于链接操作，而P18阅读文档并进行节点操作。其他组的日志见补充材料。

然而，我们发现，对非对称协作可视化的偏好从29.2%（7/24）上升至55%（11/20）。一个主要原因是，虚拟现实用户能够发现使用虚拟现实进行问题解决任务的益处。更重要的是，他们能够将这些优势运用到任务中。协作过程中，组内的两位参与者都能感受到改善。此外，我们认为，新实现的感知提示改善了隐式沟通体验，弥补了可能增加的沟通成本。

非对称设置并未妨碍任务表现和协作。无论任务复杂度和不对称程度如何（即，界面采用 PC-VR 与镜像虚拟现实，或 PC-VR 与改进型虚拟现实），非对称协作可视化对任务表现和沟通方面的协作影响都不大。根据结果，我们发现，在两项研究中，非对称协作与对称协作在任务完成时间和准确率方面均无显著差异，这与先前的发现相似 [14]。一个可能的原因是，所有条件下提供的分析功能几乎相同。在沟通和社交行为方面，我们也未发现显著差异。一个可能的原因是，通过提供类似的感知提示，参与者可以不受设备影响地进行沟通。

非对称协作可视化中的权衡。 根据第二项研究，我们发现，与PC-PC相比，PC用户在PC-VR中完成任务时感知到的心理负荷和努力程度显著更低。一个可能的原因是，VR用户可以同时查看所有文档和图，因此能够更好地把握故事脉络并引导讨论。与另一位PC用户协作相比，这减少了PC用户查找相关文档或记忆这些文档所需的努力程度。

尽管我们可以利用不同设备在非对称协作中的优势，但仍需应对两种设备带来的挑战，才能提供更好的协作体验。例如，虚拟现实中的身体需求始终高于PC环境，因为交互通常发生在三维空间中。参与者在使用虚拟现实时感到挫折，并承受较大的体力需求，这可能抵消其为PC用户带来的益处。VR用户长时间使用后感到疲劳，也会进一步限制PC用户的协作体验。此外，非对称协作，尤其是在界面和交互方式更加多样化时，容易导致团队协作失衡。正如第二项研究所示，非对称设置中协作者的努力程度存在显著差异，而对称设置中的努力程度则更加均衡。工作负荷不均可能会对团队协作质量产生负面影响 [25]。

用户对对称与非对称协作式可视化的偏好。参与者对对称或非对称协作的偏好各占一半。偏好对称协作，尤其是 PC-PC 协作的原因在于，它是所有参与者最熟悉的协作方式。参与者能够轻松上手并取得良好表现。PC 用户熟练掌握鼠标输入和鼠标支持，能够进行精确选择。另一方面，非对称协作提供了两种不同的界面，让协作任务能够充分发挥两种设备各自的优势。一些参与者认为这很有帮助，而另一些参与者则发现，与伙伴协作时绩效有所下降。此外，一些参与者喜欢以相同的节奏和环境共同工作，而另一些参与者则认可分工。与先前研究的发现一致， [1], 对称或非对称协作的偏好可能取决于个人能力与特征的组合。

非对称协作可视化中的角色。根据两项研究中参与者的反馈以及第二项研究中的个人交互日志，我们发现，不对称性可能会促使团队协作中的角色分工。具体而言，第一项研究中的四位参与者和第二项研究中的四位参与者都表示，不对称性促使他们在问题解决过程中进行角色分工。例如，在 G9 的 PC-VR 条件下（图12），P18 负责创建节点，P17 则专注于操作连线。但在 PC-PC 条件下，P17 和 P18 并没有采用这种分工模式。此外，参与者还有其他角色分工方式，例如，一人负责梳理故事概览，另一人则处理细节。这一发现与 Chung 等人提出的 [10] 使用不同设备承担不同角色的设想相呼应。

局限性与未来工作。本研究迈出了第一步，比较了非对称条件（PC-VR）与对称条件（PC-PC）下的协作可视化，为虚拟现实和可视化社区提供了有价值的见解。尽管我们发现非对称协作是可行的，但若能开展参与者更多的纵向研究，或许可以获得更深入的见解。此外，还需要更多研究来探讨绩效、沟通和偏好之外的影响，例如群体感知 [48]。此外，由于参与者的 VR 经验存在差异，且研究时长有限，我们未在第二项研究中考察 VR-VR 条件。未来研究可以纳入 VR-VR 条件。最后，本研究仅考虑了分布式场景，也就是说，人们在不同地点协作。其他协作场景，如同地协作和混合在场设置（将同地团队与分布式团队结合） [30], , 也应在未来工作中加以探索。不同场景可能需要采用不同的信息共享设计。混合在场设置中也可以纳入更多设备，例如增强现实头戴式显示器。

本研究为非对称协作可视化的未来发展方向带来了一些启发。未来工作可以进一步探究非对称角色是否有益于协作可视化，因为明确的非对称角色可能会增强社会临场感和沉浸感 [21,35]。此外，深入了解采用相同的视觉表征是否有助于非对称设置下的沟通，也很有意义；本研究仅展示了一种非对称设置方案（在个人电脑上使用二维图可视化，在虚拟现实中使用三维图可视化）。

8 结论

本文探讨了非对称设置如何影响分布式环境中协作可视化的用户体验。我们首先开展了两项研究，以收集非对称协作可视化的设计需求；随后，我们将其与对称设置进行比较，以了解非对称设置对问题解决中的绩效和沟通的影响。我们构建了一个跨虚拟性网络原型，支持用户使用节点链接图开展协作式问题解决。通过定量与定性方法分析结果，我们发现，非对称设置并未损害任务表现和沟通，同时降低了PC用户的心理需求和努力程度。我们还讨论了针对非对称设置优化两种设备界面对用户偏好的积极影响、非对称协作可视化方面的权衡与偏好，以及非对称协作中的潜在角色。我们希望本研究能够为使用不同设备的协作可视化提供参考，并启发更多相关研究。

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。该记录的最终版本见：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxxx/

致谢

本研究部分由香港研究资助局卓越学科领域计划项目（编号：AOE/E-603/18）资助。

参考文献

[1] B. Bach、R. Sicat、J. Beyer、M. Cordeil 和 H. Pfister。《我手中的全息图：在沉浸式实体增强现实中，交互式探索三维可视化的效果如何？》*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，24(1):457–467，2018。doi: 10.1109 2017 2745941 /TVCG. . A. D. Balakrishnan、S. R. Fussell 和 S. Kiesler。可视化能否改善同步远程协作？见*CHI*论文集，第1227–1236页。ACM，纽约， 2008 10 1145 1357054 1357246 。doi: . / . D. Belcher、M. Billinghurst、S. Hayes 和 R. Stiles。利用增强现实可视化三维复杂图。见*ISMAR*论文集，第84–93页。IEEE，洛斯阿拉米托斯，2003。doi: 10.1109/ISMAR.2003. 1240691[4] F. Biocca、C. Harms 和 J. Gregg。Networked Minds社会临场感测量量表：因子结构与同时效度的初步测试。第4届国际临场感研讨会，2001年1月。[5] J. V. Bradley。在拉丁方设计中完全平衡即时序列效应。美国统计协会杂志，53(282):525–528，1958。doi: 10.1080/01621459.1958. 10501456[6] I. Brewer、A. MacEachren、H. Abdo、J. Gundrum 和 G. Otto。协作地理可视化：促进对环境过程的共同理解。见信息可视化研讨会论文集，第137–141页。IEEE，洛斯阿拉米托斯， 2000 10 1109 2000 885102 。doi: . /INFVIS. . S. Butscher、S. Hubenschmid、J. Muller、J. Fuchs 和 H. Reiterer。聚类、趋势与离群值：沉浸式技术如何促进多维数据的协作分析。见*CHI*论文集，第 1 12 2018 10 1145 3173574 3173664 –页。ACM，纽约，。doi: . / . M. Cavallo、M. Dolakia、M. Havlena、K. Ocheltree 和 M. Podlaseck。沉浸式洞察：用于协作式探索性数据分析的混合分析系统。见虚拟现实软件与技术研讨会论文集。ACM，纽约，2019。doi: 10.1145 3359996 3364242 / . X. Chu、X. Xie、S. Ye、H. Lu、H. Xiao、Z. Yuan、Z. Chen、H. Zhang 和 Y. Wu。Tivee：在沉浸式可视化中探索并解释羽毛球战术。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，28(1):118–128，2022。doi: 10.1109/TVCG.2021. 3114861[10] H. Chung、C. North、J. Z. Self、S. Chu 和 F. Quek。Visporter：促进多显示屏上的协作式意义建构中的信息共享。个人与普适计算，18(5):1169–1186， 2014 10 1007 00779 013 0727 2 年6月。doi: . /s - - - M. Cordeil、A. Cunningham、T. Dwyer、B. H. Thomas 和 K. Marriott。Imaxes：作为交互式多变量数据可视化具身可供性的沉浸式坐标轴。见*UIST*论文集，第71–83页。ACM，纽约，2017。doi: 10 1145 3126594 3126613 . / . M. Cordeil、T. Dwyer、K. Klein、B. Laha、K. Marriott 和 B. H. Thomas。网络连通性的沉浸式协作分析：CAVE式还是头戴式显示器？*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，23(1):441–450，2017。doi: 10.1109/TVCG. 2016 2599107 。C. Donalek、S. G. Djorgovski、A. Cioc、A. Wang、J. Zhang、E. Lawler、S. Yeh、A. Mahabal、M. Graham、A. Drake、S. Davidoff、J. S. Norris 和 G. Longo。利用虚拟现实平台进行沉浸式协作数据可视化。见大数据论文集，第609–614页。IEEE，洛斯阿拉米托斯， 2014 10 1109 2014 7004282 。doi: . /BigData. . T. Drey、P. Albus、S. der Kinderen、M. Milo、T. Segschneider、L. Chanzab、M. Rietzler、T. Seufert 和 E. Rukzio。迈向虚拟现实中的协作学习：对比同地对称式与非对称式配对学习。见*CHI*论文集。ACM，纽约，2022。doi: 10. 1145 3491102 3517641 / . B. Ens、B. Bach、M. Cordeil、U. Engelke、M. Serrano、W. Willett、A. Prouzeau、C. Anthes、W. Büschel、C. Dunne、T. Dwyer、J. Gru-bert、J. H. Haga、N. Kirshenbaum、D. Kobayashi、T. Lin、M. Olaose-bikan , F. Pointecker , D. Saffo , N. Saquib , D. Schmalstieg , D. A. Szafir , M. Whitlock, and Y. Yang. 沉浸式分析的重大挑战. 收录于*Proc. CHI*. ACM, 纽约, 2021 10 1145 3411764 3446866 . doi: . / . B. Ens, M. Cordeil, C. North, T. Dwyer, L. Besanc.on, A. Prouzeau, J. Liu, A. Cunningham, A. Drogemuller, K. A. Satriadi, and B. H. Thomas. 沉浸式分析 2.0：空间与具身意义建构. 收录于*Proc. CHI EA*. ACM, 纽约, 2022 10 1145 3491101 3503726 . doi: . / . J. A. W. Filho, W. Stuerzlinger, and L. Nedel. 评估用于直观轨迹数据探索的沉浸式时空立方体地理可视化. *IEEE*可视化与计算机图形学汇刊, 26 1 514 524, 2020 10 1109 2019 2934415 ( ): – . doi: . /TVCG. . J. G. Grandi, H. G. Debarba, and A. Maciel. 描述虚拟现实与增强现实中的非对称协作交互特征. 收录于*Proc. VR*, pp. 127–135. IEEE, 洛斯阿拉米托斯, 2019. doi: 10.1109/VR.2019. 8798080[19] G. Grinstein, C. Plaisant, S. Laskowski, T. O'Connell, J. Scholtz, and M. Whiting. VAST 2007 挑战赛——Blue Iguanodon. 收录于*Proc. VAST*, pp. 231 232 2007 10 1109 2007 4389032 – . IEEE, 洛斯阿拉米托斯, . doi: . /VAST. . J. Gugenheimer, E. Stemasov, J. Frommel, and E. Rukzio. ShareVR：支持头戴式显示器用户与非头戴式显示器用户在虚拟现实中的同地体验. 收录于*Proc.CHI*, p. 4021–4033. ACM, 纽约, 2017. doi: 10. 1145 3025453 3025683 / . J. Harris and M. Hancock. 超越不对称性！通过增强合作式游戏中的设计相互依存来改善社会联结. 收录于*Proc. CHI*, p. 1–12. ACM, 纽约, 2019. doi: 10.1145/3290605. 3300239[22] S. G. Hart. NASA任务负荷指数（NASA-TLX）；20年后。人因与工效学学会年会论文集, 50 9 904 908, 2006 10 1177 154193120605000909 ( ): – . doi: . / R. Hartson and P. Pyla. 《用户体验之书：确保优质用户体验的流程与指南》. 摩根考夫曼出版社公司，旧金山，加利福尼亚州，美国，第1版，2012年。[24] D. Hayatpur, H. Xia, and D. Wigdor. DataHop：虚拟现实中的空间数据探索. 收录于*Proc. UIST*, p. 818–828. ACM, 纽约, 2020. doi: 10. 1145 3379337 3415878 / . M. Hoegl and H. G. Gemuenden. 团队协作质量与创新项目的成功：理论概念与实证证据. 《组织科学》, 12(4):435–449, 2001. doi: 10.1287/orsc.12.4.435. 10635[26] S. Hubenschmid, J. Wieland, D. I. Fink, A. Batch, J. Zagermann, N. Elmqvist, and H. Reiterer. Relive：连接原位与异位可视分析，以分析混合现实用户研究. 收录于*Proc. CHI*, CHI ' 22 2022 10 1145 3491102 3517550 . ACM, 纽约, . doi: . / . P. Isenberg, N. Elmqvist, J. Scholtz, D. Cernea, K.-L. Ma, and H. Ha- gen. 协作可视化：定义、挑战与研究议程. 《信息可视化》, 10(4):310–326, 2011. doi: 10.1177/ 1473871611412817[28] P. Isenberg, T. Isenberg, T. Hesselmann, B. Lee, U. von Zadow, and A. Tang. 交互式表面上的数据可视化：研究议程. *IEEE*《计算机图形学与应用》, 33(2):16–24, 2013. doi: 10 1109 2013 24 . /MCG. . P. Jansen, F. Fischbach, J. Gugenheimer, E. Stemasov, J. Frommel, and E. Rukzio. Share：为增强现实头戴式显示器支持同地非对称多用户交互. 收录于*Proc. UIST*, p. 459 471 2020 10 1145 3379337 3415843 – . ACM, 纽约, . doi: . / . K. Kim, W. Javed, C. Williams, N. Elmqvist, and P. Irani. Hugin：用于混合在场协作信息可视化中的感知与协调框架. 收录于*Proc. ITS*, p. 231–240. ACM, 纽约, 2010 10 1145 1936652 1936694 . doi: . / . M. Kraus, N. Weiler, D. Oelke, J. Kehrer, D. A. Keim, and J. Fuchs. 沉浸感对簇识别任务的影响. *IEEE*可视化与计算机图形学汇刊, 26(1):525–535, 2020. doi: 10 1109 2019 2934395 . /TVCG. . O.-H. Kwon, C. Muelder, K. Lee, and K.-L. Ma. 沉浸式图可视化的布局、渲染和交互方法研究. *IEEE*可视化与计算机图形学汇刊, 22 7 1802 1815, 2016 10 1109 2016 2520921 ( ): – . doi: . /TVCG. . B. Lee, M. Brehmer, P. Isenberg, E. K. Choe, R. Langner, and R. Dachselt. 移动设备上的数据可视化. 收录于*Proc. CHIEA*, p. 1 8 2018 10 1145 3170427 3170631 – . ACM, 纽约, . doi: . / . B. Lee, X. Hu, M. Cordeil, A. Prouzeau, B. Jenny, and T. Dwyer.

© 2023 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议论文集。该文献的最终版本请见：
xx.xxxx/VR.20xx.xxxxxx/

共享表面与空间：同地沉浸式环境中的协作式数据可视化. IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 27(2):1171–1181, 2021. doi: 10.1109/TVCG.2020.3030450[35] J. Lee, M. Kim, and J. Kim. Rolevr：同地头戴式显示器用户与非头戴式显示器用户在沉浸式虚拟现实中的多体验. 《多媒体工具与应用》, 79(1–2):979–1005, 2020 年 1 月 . doi: 10.1007/ s11042-019-08220-w[36] Y. Lin, K. Wong, Y. Wang, R. Zhang, B. Dong, H. Qu, and Q. Zheng. Taxthemis：可疑逃税团伙的交互式挖掘与探索. IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 27 2 849 859, 2021 10 1109 2020 3030370 ( ): – . doi: . /[37] TVCG. . L. Lisle, X. Chen, J. Edward Gitre, C. North, and D. A. Bowman. 评估沉浸式思考空间的益处. 收录于Proc. VRW, pp. 331–337. IEEE, 洛斯阿拉米托斯, 2020. doi: 10.1109/VRW50115.2020. 00073[38] T. Mahmood, W. Fulmer, N. Mungoli, J. Huang, and A. Lu. 利用混合现实改进远程地理空间可视化中的信息共享与协作分析. 收录于Proc. ISMAR, pp. 236–247. IEEE, 洛斯阿拉米托斯, 2019. doi: 10.1109/ISMAR.2019.00021[39] N. Mahyar and M. Tory. 支持协作式意义建构中的沟通与协调. IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 20(12):1633–1642, 2014. doi: 10.1109/TVCG.2014. 2346573[40] T. Munzner. 《可视化分析与设计》. CRC出版社, 2014. [41] R. Neogy, J. Zong, and A. Satyanarayan. 在可视化中呈现实时多用户协作. 收录于Proc. VIS, pp. 146–150. IEEE, 洛斯阿拉米托斯, 2020. doi: 10.1109/VIS47514.2020.00036[42] O. Oda, C. Elvezio, M. Sukan, S. Feiner, and B. Tversky. 用于虚拟现实与增强现实远程协助的虚拟副本. 收录于Proc. UIST, p.
405 415 2015 10 1145 2807442 2807497 – . ACM, 纽[43] 约, . doi: . / . K. M. Ouverson and S. B. Gilbert. 同地非对称虚拟现实的复合框架. Proc. HCI, 5(CSCW1):1–20, 2021年4月. doi: 10.1145/3449079[44] T. Piumsomboon, A. Dey, B. Ens, G. Lee, and M. Billinghurst. 在协作混合现实中共享感知提示的影响. 《机器人与人工智能前沿》,
6 5, 2019 10 3389 2019 00005 : . doi: . /frobt. .[45] N. Reski, A. Alissandrakis, and A. Kerren. 在沉浸式分析情境下，结合沉浸式与非沉浸式界面的非对称同步协作实证评估. 《虚拟现实前沿》,
2 1 29, 2022 10 3389 2021 743445 : – .[46] doi: . /frvir. . J. C. Roberts, P. D. Ritsos, S. K. Badam, D. Brodbeck, J. Kennedy, and N. Elmqvist. 超越桌面端的可视化——下一个重大趋势. IEEE《计算机图形学与应用》, 34(6):26–34, 2014. doi:
10 1109 2014 82 . /MCG. . R. Rosenthal, H. Cooper, L. Hedges, et al.[47] 效应量的参数测量. 《研究综合手册》, 621(2):231–244, 1994. [48] D. Saffo, A. Batch, C. Dunne, and N. Elmqvist. 透过他们的双眼，设身处地体验：在虚拟现实与桌面平台之间开展协作时提供群体感知. 收录于Proc. CHI. ACM, 纽约, 2023 10 1145 3544548 3581093 . doi: . / . K. A. Satriadi, B. Ens,[49] M. Cordeil, T. Czauderna, and B. Jenny. 我周围的地图：沉浸式空间中的三维多视图布局. Proc. HCI, 4 1 20, 2020 10 1145 3427329[50] (ISS): – 11月 . doi: . / M. Sereno, X. Wang, L. Besanc.on, M. J. McGuffin, and T. Isenberg. 增强现实中的协作工作：综述. IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 28(6):2530–2549, 2022. doi: 10 1109 2020 3032761 . /TVCG. .[51] M. Serrano, K. A. Satriadi, Y. Yang, B. Ens, A. Prouzeau, and S. Zollmann. 沉浸式分析空间与表面. 收录于Proc. ISS, pp. 68–71. ACM, 纽约, 2022年11月. doi: 10.1145/3532104.3571471[52] R. Stoakley, M. J. Conway, and R. Pausch. WIM中的虚拟现实：微缩交互世界. 收录于Proc. CHI, p. 265–272. ACM出版社/Addison-Wesley出版公司, 纽约, 1995. doi: 10.1145/223904. 223938[53] Y. Sugiura, H. Ibayashi, T. Chong, D. Sakamoto, N. Miyata, M. Tada, T. Okuma, T. Kurata, T. Shinmura, M. Mochimaru, and T. Igarashi. 用于建筑尺度空间设计的非对称协作系统. 收录于Proc. SIGGRAPH. ACM, 纽约, 2018. doi: 10.1145/3284398.3284416 [54] M. Tobiasz, P. Isenberg, and S. Carpendale. Lark：协调同地协作——将协作与信息可视化相结合。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊, 15(6):1065–1072，2009。doi: 10 1109 2009 162 。/TVCG。[55] W. Tong、Z. Chen、M. Xia、L. Y.-H. Lo、L. Yuan、B. Bach 和 H. Qu。探索增强现实中与印刷数据可视化的交互。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊,
29 1 418 428, 2023 10 1109 2022 3209386 ( ): –。doi: 。/TVCG。[56] X. Wang、L. Besanc.on、D. Rousseau、M. Sereno、M. Ammi 和 T. Isen- berg。探索现有三维数据分析工具的增强现实扩展。载于*Proc. CHI*，第 1–13 页。ACM，纽约，2020。doi: 10.1145/3313831.3376657[57] C. Ware 和 G. Franck。在虚拟现实显示器中查看图，比查看二维图示效果好三倍。载于*Proc.VL*，第 182–183 页。IEEE，洛斯阿拉米托斯，1994。doi: 10.1109/VL.1994.363621[58] C. Ware 和 G. Franck。评估用于三维信息网络可视化的立体和运动线索。*ACM Transactions on Graphics*,
15 2 121 140, 1996 10 1145 234972 234975 ( ): –, 4月。[59] doi: 。/。C. Ware 和 P. Mitchell。重新评估用于三维图可视化的立体和运动线索。载于*Proc. APGV*，第 51–58 页。ACM，纽约，2005。doi: 10.1145/1080402.1080411[60] F. Welsford-Ackroyd、A. Chalmers、R. Kuffner dos Anjos、D. Medeiros、H. Kim 和 T. Rhee。观众视图：通过大屏幕实现头戴式显示器佩戴者与观众之间的非对称交互。*Proc. HCI*,
5 1 17, 2021 10 1145 3486951 (ISS): –, 11月。doi: 。/ M.[61] A. Whiting、C. North、A. Endert、J. Scholtz、J. Haack、C. Varley 和 J. Thomas。VAST竞赛数据集在教育中的应用。载于*Proc. VAST*，第 115–122 页。IEEE，洛斯阿拉米托斯，2009。doi: 10.1109/VAST.2009.5333245[62] A. Wu、G. Convertino、C. Ganoe、J. M. Carroll 和 X. L. Zhang。通过地理可视化支持应急管理中的协作式意义建构。《国际人机研究杂志》, 71(1):4–23，2013。专题：支持协作活动中的共享表征。doi:
10 1016 2012 07 007 。/j.ijhcs。。. F.[63] Yang、J. Qian、J. Novotny、D. Badre、C. D. Jackson 和 D. H. Laidlaw。虚拟现实记忆宫殿的一个变体有助于从学术文章中检索知识。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，27(12):4359–4373，2021。doi: 10.1109/TVCG.2020.3009003[64] L. Yang、C. Xiong、J. K. Wong、A. Wu 和 H. Qu。以实例进行解释：从众包式信息可视化入门描述中汲取的经验。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，29(03):1638–1650，2023年3月。doi: 10.1109/TVCG.2021.3128157[65] Y. Yang、M. Cordeil、J. Beyer、T. Dwyer、K. Marriott 和 H. Pfis- ter。沉浸式抽象数据可视化中的具身导航：对于三维散点图，概览+细节还是缩放更好？*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，27 1224，2021 2 1214 10 1109 2020 3030427 ( ): –。doi: 。/TVCG。.[66] Y. Yang、T. Dwyer、B. Jenny、K. Marriott、M. Cordeil 和 H. Chen。沉浸式环境中的起讫点流向图。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，25(1):693–703，2019。doi: 10 1109 2018 2865192 。/TVCG。Y. Yang、T.[67] Dwyer、K. Marriott、B. Jenny 和 S. Goodwin。倾斜地图：沉浸式环境中分级统计地图、棱柱地图与条形图之间的交互式转换。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，27(12):4507–4519，2021。doi: 10.1109/TVCG.2020.3004137[68] Y. Yang、B. Jenny、T. Dwyer、K. Marriott、H. Chen 和 M. Cordeil。虚拟现实中的地图与地球仪。*Computer Graphics Forum*,
37 3 427 438, 2018 10 1111 13431 ( ): –。doi: 。/cgf。S. Ye、Z.[69] Chen、X. Chu、Y. Wang、S. Fu、L. Shen、K. Zhou 和 Y. Wu。Shuttlespace：在沉浸式可视化中探索和分析运动轨迹。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊,
27 2 860 869, 2021 10 1109 2020 3030392 ( ): –。doi: 。/[70] TVCG。V. Yoghourdjian、Y. Yang、T. Dwyer、L. Lawrence、M. Wybrow 和 K. Marriott。从认知负荷角度看网络可视化的可扩展性。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊,
27 2 1677 1687, 2021 10 1109 2020 3030459 ( ): –。[71] doi: 。/TVCG。Q. Zhou、G. Fitzmaurice 和 F. Anderson。深度鼠标：将桌面鼠标集成到虚拟现实中。载于*Proc. CHI*。ACM，纽约，2022。doi: 10.1145/3491102.3501884