arXiv:2603.09294v1 [cs.MM] 10 Mar 2026

联网虚拟现实白板中延迟对多维体验质量的影响

Jiarun Song Yongkang Hou 和 Fuzheng Yang

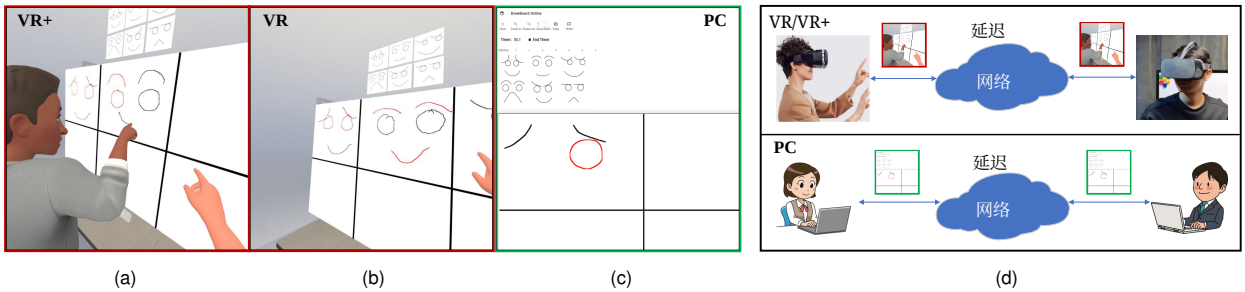


图 1：研究中使用的协作白板平台和实验设置。(a) 带有具身化身的联网 VR 白板（VR+）。(b) 不带虚拟化身的联网 VR 白板（VR）。(c) 基于PC的协作白板（PC）。(d) 网络延迟下的 VR/VR+ 和 PC 协作场景。

摘要——联网虚拟现实（NVR）白板对于帮助地理位置分散的用户开展实时创意分享、协作设计和讨论，正变得日益重要。然而，由网络限制、渲染延迟或同步问题引起的延迟，可能会显著降低白板协作中的体验质量（QoE）。为系统地研究延迟的影响，本研究将体验质量划分为实用性和享乐性两个方面，每个方面又包含多个子维度。研究通过受控实验确定最受延迟影响的子维度，并将其作为主要体验质量指标，以揭示延迟影响体验质量的过程和机制。在此基础上，我们进一步考察了这些影响如何随不同协作模式而变化，即用于结构化设计工作流的顺序协作（SC）和用于开放讨论的自由协作（FC）。我们还比较了两种 VR 白板：一种带有虚拟化身（VR+），另一种不带虚拟化身（VR），并将传统的基于PC的白板作为基线。这种多维设计能够全面评估延迟对不同协作模式和平台下体验质量的影响，并为在真实网络和系统约束下优化 NVR 白板系统提供实践指导。

索引词—白板、体验质量、协作、延迟、虚拟现实

1 引言

网络虚拟现实（NVR）白板能够支持远程协作、讨论和沉浸式交互。它们已成为物理白板和传统电子白板的一种颇具前景的替代方案 [6, 19, 29]。与物理白板不同，NVR白板克服了空间限制，使用户无论身处何地都能实时交互。与通常仅提供有限且僵化交互的传统电子白板相比，NVR白板采用具有大视场角（FOV）的头戴式显示器（HMD），并支持通过控制器和手势识别进行手写输入，从而带来与真实书写极为相似的交互体验 [8, 21, 25]。这种设计提升了交互的舒适度与真实感，同时支持在共享虚拟空间中进行实时多用户协作。

NVR 白板系统的一项关键能力是支持远程用户之间的实时沉浸式协作，如图 1所示。然而，传输和处理方面的限制不可避免地会引入用户的白板输入与其远程显示之间的延迟，这可能会显著降低用户体验。以往研究主要比较了本地环境中基于虚拟现实的白板与传统电子白板的性能 [6, 14, 26, 44]。相比之下，在延迟会显著影响交互与协调的 NVR 白板协作中，体验质量（QoE）仍未得到充分理解。

在白板应用中，用户的体验质量可从实用性和享乐性两个方面进行评估 [3, 10, 27, 46]。实用性维度侧重于功能有效性和任务支持，涵盖交互性、效率和可信度等维度 [10, 27]。相比之下，享乐性方面强调愉悦感、沉浸感、可探索性和新颖性等体验特质 [10, 45]。尽管已有证据表明，延迟会损害协作体验质量，但它如何差异化地影响这两个方面，尤其是其影响是否集中于特定子维度，仍不明确。这一研究空白既限制了我们对延迟导致体验质量下降的理解，也制约了具备延迟适应能力的 NVR 白板系统的设计。

然而，研究延迟对 NVR 白板中体验质量的影响颇具挑战，因为其影响不仅取决于延迟本身，还取决于上下文因素，尤其是协作模式和平台形式。在白板应用中，两种常见的协作模式是顺序协作（SC）和自由协作（FC）。顺序协作反映了具有结构化工作流和交替输入的场景，使交互紧密耦合，因此对延迟引起的延时更加敏感。相比之下，自由协作允许同时贡献，耦合程度较低，提供了更大的灵活性，但也增加了延迟情况下输入遗漏、重复或重叠的风险。这些差异表明，

• *Jiarun Song*就职于西安电子科技大学通信工程学院。电子邮箱：*jrsong@xidian.edu.cn*（通信作者）
• *Yongkang Hou* 任职于西安电子科技大学通信工程学院。电子邮箱：*waterhou1221@gmail.com*。
• *Fuzheng Yang* 任职于西安电子科技大学通信工程学院。电子邮箱：*fzhyang@mail.xidian.edu.cn*。稿件收到日期：*201x* 年 *xx* 月 *xx* 日；录用日期：*201x* 年 *xx* 月 *xx* 日。出版日期：*201x* 年 *xx* 月 *xx* 日；当前版本日期：*201x* 年 *xx* 月 *xx* 日。若需获取本文的抽印本，请发送电子邮件至：*reprints@ieee.org*。数字对象标识符：*xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx*

顺序协作和自由协作对延迟表现出不同的敏感性。此外，数字化身的存在或缺失可能进一步调节用户对延迟的感知及其对体验质量的影响。

本研究采用两阶段方法，考察延迟对 NVR 白板系统体验质量的影响。首先，将体验质量划分为实用性和享乐性方面，每个方面又包含多个子维度。通过受控实验，我们分析这些子维度对延迟的敏感程度，并确定受影响最大的三个实用性维度，即交互性、效率和可信度，因此将其作为主要的体验质量评估指标。具体而言，交互性反映与系统及协作者互动的自然程度；效率体现投入的时间和精力与任务成效之间的关系；可信度则表示用户对系统及协作者的信任。基于这些体验质量指标，我们设计了分别对应顺序协作（SC）和自由协作（FC）模式的两种协作场景。为考察与平台相关的影响，我们在两种 VR 白板配置上实现了这些场景：（1）可见用户化身和具身行为的 VR 模式（VR+）；（2）不显示虚拟化身、仅显示绘图笔划的 VR 模式（VR），从而能够分析在缺少与虚拟化身相关的社交线索时，延迟所产生的影响。此外，我们将传统的基于PC的白板作为基线参照。这一实验设计能够系统评估延迟如何影响不同协作模式和平台下的体验质量，为理解延迟如何塑造协作体验，以及在现实约束下优化 NVR 白板系统提供了参考。本文的主要贡献如下：

- 我们开发了一套可自主控制的RCVR白板系统，能够精确操控延迟，以复现现实世界中的协作场景。尽管现有平台提供了实用功能，但在实验用途所需的延迟控制、任务定制、参数获取和评分数据收集方面往往存在局限。该系统旨在成为灵活的研究工具，并将以开源形式发布，以促进未来对白板交互中延迟敏感性的研究。
- 我们从实用性和享乐性两个角度分析了体验质量，并确定了三个对延迟尤为敏感的实用性子维度，即交互性、效率和可信度。在此基础上，本研究进一步阐明了在不同延迟等级下，这些维度对整体体验质量的相对贡献，从而揭示了延迟影响协作白板体验的作用机制。
- 我们通过设计具有代表性的协作模式，并在多种平台类型上实施这些模式，系统评估了延迟的影响。该设置使我们能够全面比较不同协作模式和平台设置下的体验质量结果。

本文其余部分安排如下：第 2 节回顾相关工作并阐述本研究的动机。第 3 节介绍实验设计，包括实验平台、设计的任务、体验质量指标、参与者和实验流程。第 4 节首先介绍一项试点研究，以确定对延迟敏感的体验质量子维度；随后分析正式用户研究，以考察不同协作模式和白板平台下，延迟对交互性、效率、可信度和整体体验质量的影响。第 5 节讨论本研究的局限性，并概述未来工作的方向。最后，第 6 节总结全文。

2 相关工作与研究动机

白板在协作和通信中发挥着极其重要的作用，通过视觉表达和共同交互帮助弥合认知差距。随着沉浸式技术的发展，白板系统逐渐从传统的二维形式演变为更具沉浸感的三维空间交互工具。本节重点介绍白板系统、延迟对感知的影响以及本研究动机方面的相关研究。

2.1 白板系统

实体可擦白板支持通过自然手写进行本地协作，是工作和学习等社交场所中常用的重要辅助工具 [17, 23, 32]。然而，它们不支持远程协作，内容也不会自动数字化以供存储或共享。先前关于白板的研究探讨了将白板内容数字化的方法 [41]。

随着通信技术和社交媒体的发展，电子白板已广泛应用于远程协作和会议 [9, 11, 30, 33]。例如，“Zoom Whiteboard”是远程会议软件“Zoom”中的一项公共白板功能[33]，，而 neXboard 是一款基于浏览器的应用程序，为远程协作提供数字白板 [9]。这些电子白板通常依赖鼠标操作，导致书写或绘图效率较低且令人不适，因此难以还原自然手写体验。另一种常用于支持远程协作的白板设备是数字平板电脑，或配有触控笔的触摸屏。Rekimoto 建议在公共白板中使用二维触摸屏来共享信息 [34]。然而，其尺寸限制是一个问题。研究人员已对电子白板开展了大量研究。例如， [35] 开发了一款 Web 应用程序，以提升协作能力，且不受地点、操作系统平台或设备的限制。该应用程序允许用户通过文字、图像、聊天、音频和视频进行互动与信息共享。 [22] 中的作者研究了人们对不同白板交互功能的感知，以及使用不同白板交互功能对学习态度的影响。结果表明，使用白板的基本交互功能有助于培养学习兴趣和学习意愿。

近年来，虚拟现实技术和硬件的进步使虚拟现实白板受到了广泛关注 [2, 4, 25, 37, 40]。用户可以通过头戴式显示器在虚拟空间中书写和绘图，突破传统物理空间与物体的限制，从而获得更加灵活且富有创造性的体验。例如，Sakuraba等人采用头戴式显示器进行协作三维模型设计 [37]。然而，由于硬件限制，虚拟现实白板往往仅支持单机操作，缺乏远程协作功能，而这正是白板应用的核心需求之一。因此，关于远程协作虚拟现实白板的研究已成为一个突出课题。Meta的协作办公应用Workrooms包含VR白板功能，使远程用户能够在共享白板上进行协作 [2]。近期研究聚焦于开发并优化远程协作虚拟现实白板系统。例如，[13] 提出了一种通过在VR白板中进行手绘草图，为建筑软件重新设计做准备的方法。在 [45], 中，作者比较了虚拟现实白板与传统电子白板的协作效率。结果表明，与基于鼠标的电子白板相比，虚拟现实白板显著提高了协作效率，并且与传统白板相当。尽管如此，诸如Workrooms之类的商用虚拟现实白板系统可能对实验研究构成一定限制，尤其是在延迟控制、任务定制、性能参数获取以及主观评分收集方面。

2.2 延迟对感知的影响

人机交互（HCI）研究表明，可接受延迟的阈值会因交互情境不同而显著变化。早期具有重要影响力的研究系统分析了网络游戏和虚拟环境中不同用户动作对延迟的敏感度 [5, 39]。例如，研究报告称，全身虚拟化身动作的容忍度约为 75 ms [43]。相比之下，在电脑游戏中需要进行角色控制的任务，可接受的延迟范围为 50 至 200ms [5, 15, 28]。对于用户按下按钮后观察视觉刺激的任务，低于 50ms 的延迟通常不会被用户察觉 [31]。此外，延迟不仅会增加任务的主观难度，也会影响适应能力。当任务具有可预测性时，用户更容易适应延迟 [36]。延迟会影响用户在虚拟环境中的临场感，

延迟越高，临场感越弱 [24]。然而，这些研究发现主要局限于关注人与系统之间交互的人机交互（HCI）场景，而非多个用户之间的协作交互。此外，既有研究通常只考察延迟与单一体验质量（QoE）因素之间的关系，而在协作情境中，全面分析延迟如何影响多个QoE维度的研究仍然少见。

为考察延迟对虚拟现实中用户交互的影响，Vlahovic 等人 [42] 研究了网络延迟如何影响用户在一款第一人称射击类虚拟现实多人游戏中的体验。他们的研究结果表明，当往返时间（RTT）超过约 100ms 时，所选游戏的用户体验便开始恶化。同样，Kojic 等人 [18] 探讨了不同延迟等级对虚拟现实多人体育游戏体验质量的影响。他们发现，用户对延迟的感知和体验质量会因各自所处的延迟等级而异。参与者即使只在对手一方受到延迟影响，也能察觉到延迟；而体验质量评分只有在延迟等级较高时才会显著下降。Kusonose [20]推出了一款支持触觉反馈的双人网络空气曲棍球游戏，并报告称，随着延迟增加，感知交互性和质量均显著下降。Sithu 等人 [38] 对一款双人实时气球爆破游戏的可操作性和公平性进行了体验质量评估。结果表明，可操作性主要取决于网络延迟；当延迟达到 300ms 或更高时，主观评分会降至 3 分以下。尽管这些研究为了解延迟的影响提供了宝贵见解，但它们聚焦于竞争场景，其特点与协作工作情境并不完全一致。因此，在白板协作等强调团队合作和效率的应用中，直接考察延迟的影响至关重要，因为交互性质可能会带来不同的敏感度。

2.3 研究动机

本研究的动机可概括为以下三个方面：

- NVR白板尤其容易受到延迟的影响，原因包括带宽限制、并发用户以及渲染复杂度等。因此，准确评估延迟的影响至关重要，因为这能为延迟优化提供指导。一旦充分满足延迟要求，服务提供商便可

  通过提高带宽效率、容纳更多用户或支持更复杂的渲染来进一步提升性能。

- 与传统电子白板相比，NVR白板提供了更大的自由度和沉浸感，这可能会改变延迟对用户体验的影响方式。然而，对延迟最为敏感的具体QoE维度，尤其是在实用性与享乐性方面，仍不明确，因此有必要研究NVR白板场景中的延迟效应。

- 在NVR白板中，协作模式以及平台条件（例如是否启用虚拟化身）可能会影响用户对延迟的敏感度和整体体验质量。然而，这些因素尚未得到系统性研究，凸显了开展针对性研究的必要性，以厘清延迟的影响如何随协作模式和平台设置而变化。

3 实验设计

为评估不同延迟条件下的主观体验质量，我们开展了一系列实验研究。首先，我们开发了一个 NVR 白板测试平台，该平台提供核心协作功能，并支持精确控制延迟。基于两种具有代表性的白板使用场景，即适用于结构化设计工作流的顺序协作（SC）和适用于开放讨论的自由协作（FC），我们设计了相应的实验。随后，我们开展了一项试点研究，以确定在协作式白板交互中对延迟最敏感、且最受用户重视的体验质量子维度。根据这些发现，我们开展了一项正式实验，系统地收集用户在不同白板类型、协作模式和延迟条件下的主观体验质量评分。

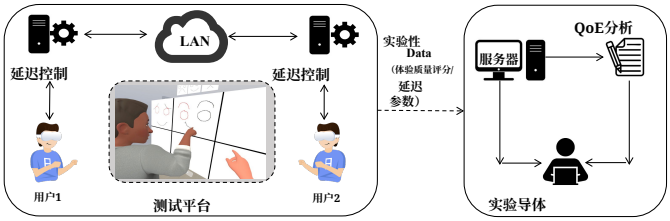


图 2：实验设置与数据处理工作流程概览。左侧：具有受控网络延迟的协作白板测试平台。右侧：集中收集和处理实验数据，以供后续体验质量分析。

3.1 实验平台

鉴于商用虚拟现实白板系统在延迟控制、任务定制、参数访问和主观评分收集方面存在局限，本研究开发了一个可控制延迟的实验平台，并配备了集中的数据收集（例如延迟参数和体验质量评分）与处理工作流，用于后续的体验质量分析，如图 2所示。该平台基于四个核心要素构建：虚拟现实环境设计、协作场景模拟、远程连接支持，以及可调节的端到端（E2E）模拟延迟。接下来将详细介绍这四个核心要素的功能与实现。

虚拟现实环境设计： 该系统使用 Unity引擎开发，运行于搭载 Meta Horizon 的 Meta Quest 2 上。系统提供了一个三维虚拟房间，中央设有共享白板。用户进入应用并与伙伴建立网络连接后，系统会将两位用户分别安排在白板两侧，以便协同完成任务。如图1所示，用户化身由 Meta Avatars SDK 生成，并借助手部追踪技术和内部算法增强真实感。系统采用了不含下半身表现形式的早期版本 Avatar SDK。为确保实验一致性，虚拟化身外观固定，仅允许选择男性或女性两种性别。随后，系统根据用户在虚拟空间中的初始位置，以确定性方式分配预定义的虚拟形象模型；实验期间不允许进一步自定义虚拟化身。为便于比较，系统还允许从白板环境中移除虚拟化身。详细的系统配置列于表1。

协作场景模拟： 该虚拟现实系统旨在基于自然手势模拟真实的白板协作场景。用户使用右手食指在白板上进行绘图、擦除、切换画笔颜色或清除表面内容，所有动作均得到实时跟踪和记录。为引导参与者，白板上方显示了任务模板，以确保任务执行的一致性。系统构建了两种典型的协作场景，以反映现实世界中的使用情况：在SC场景中，参与者按照结构化工作流程交替输入，每个人都在其协作伙伴贡献的基础上继续完成任务。在FC场景中，参与者同时进行操作，并行绘图和批注，以模拟开放讨论。总体而言，这些场景为协作式白板使用提供了受控且逼真的模拟环境，从而能够系统地研究延迟对用户体验质量的影响。为确保实验控制，本系统当前未纳入语音交流，研究重点聚焦于以视觉为主导的协作场景。

远程连接支持： 该平台旨在让两位用户通过点对点连接协作书写和绘画，并能够观察彼此的虚拟化身动作和白板内容。每位用户的虚拟化身都由头戴式显示设备内置跟踪算法捕获的运动数据驱动。用户真实的手部动作通过头戴式显示设备摄像头捕获，并映射到数字化身上。该系统采用基于 WebRTC 的点对点（P2P）通信模型。对等连接通过

表 1：实验平台的系统配置

组件	规格
VR设备	Meta Quest 2
操作系统	Meta Horizon OS v74.1021
Unity引擎	Unity 2021年.3.9f1
Avatar SDK	Oculus虚拟形象SDK v20.1
WebRTC库	com.unity.webrtc 3.0.0-pre.4
网络模型	基于 WebRTC 的点对点（P2P）

部署在局域网内的信令服务器建立连接，随后笔画和虚拟化身数据通过 WebRTC 数据通道在设备之间直接交换。参与者的动作通过局域网捕获并传输，以驱动其数字化身，从而实现双方在共享虚拟空间中的协作。同时，白板内容数据（坐标、颜色等）与虚拟化身数据一并传输，以确保白板交互同步。网络连接和实时数据传输通过 WebRTC for Unity 库实现 [7]。

可调端到端延迟模拟：为了定量分析延迟的影响，NVR 白板系统实现了一种精确的端到端延迟控制机制。在局域网环境下，系统的基线端到端延迟约为 80 ms。在此基础上，系统通过基于时间的缓冲机制引入人为延迟，如图 3所示。接收实时数据（例如虚拟化身运动或白板笔画）时，系统会记录其到达时间戳 Tr，并将数据放入等待队列（WaitQueue）。随后，系统以每秒 60 帧的固定速率监控该队列。每一帧中，系统都会检查队列首部数据的时间戳。当满足以下条件时，数据便会出队并在虚拟环境中渲染：

$$Tc - Tr \geq Dt - Di \tag{1}$$

其中，Tc 是当前系统时间，Tr 是数据到达时间，Di 是系统固有延迟。Dt 是预设的目标延迟。该机制通过考虑固有延迟，确保对总延迟进行细粒度控制，并始终应用于交互动作（例如绘图或手势输入）。延迟模拟期间，处理缓冲数据所采用的固定逻辑更新速率为 60 Hz。尽管该速率与 Meta Quest 2 的原生显示刷新率不同，但由此产生的时间偏移极小，不会明显影响白板任务期间的交互；这些任务主要涉及缓慢且连续的用户动作，例如手写和

手臂动作。

此外，为便于比较，我们还开发了一款可控制延迟的传统个人电脑电子白板，如图 1所示。该系统基于 Node.js 构建，支持通过鼠标输入执行各种绘图功能，并通过基于 socket.io 的数据传输实现多用户协作，基线系统延迟约为 27 毫秒。其延迟控制机制与虚拟现实白板系统相同，包括对绘图事件进行同步处理。

3.2 协作设计

为探究不同条件下延迟对NVR白板体验质量的影响，我们旨在受控实验环境中模拟真实的使用场景。为此，我们分别设计了两种协作场景，以代表顺序协作（SC）和自由协作（FC）。参与者两人一组，共同在共享白板上指定的区域内复现六个预定义的线条绘图模板（图1）。开始绘图前，参与者可以通过语音通信进行协调，例如示意准备开始。然而，绘图开始后，不允许进行口头讨论，以确保协作仅依靠白板交互。在SC场景中，参与者严格按照顺序轮流绘制笔画；每位参与者只有在搭档完成上一笔后才能继续，从而确保协作紧密耦合

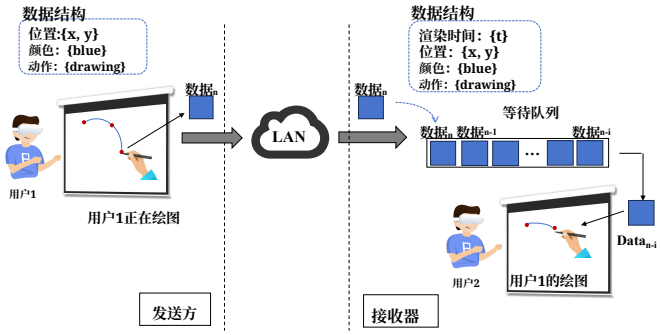


图 3：使用基于时间的缓冲机制进行可调端到端延迟模拟。

。在FC场景中，两位参与者同时绘图，可以不受顺序限制，自由选择任意模板中尚未完成的笔画。所有模板中的笔画全部完成后，即视为本次任务结束。

3.3 参与者

本研究共招募了36名参与者（12名女性、24名男性）。研究分为两个实验阶段：试点研究和正式用户研究。18名参与者（6名女性、12名男性，年龄23–26岁，M = 23.83，SD = 0.69）参与了试点研究，以验证实验设置。在正式阶段，研究招募了24名参与者（8名女性、16名男性，年龄23–25岁，M = 23.58，SD = 0 49 6 .），开展主要的主观评价，其中包括也参加过试点研究的参与者。

参与者均为视力和听力正常或矫正后正常的大学生。选择这一群体，是因为大学生更有可能在教育和协作情境中使用虚拟现实白板，因此能够代表一类重要的用户群体。他们还具备足够的数字素养，能够有效操作虚拟现实系统，从而减少因缺乏技术熟悉度造成的混杂效应。尽管对参与者进行这种受控筛选可能会限制结果的可推广性，但较窄的年龄范围和受控的感官条件减少了与实验操控无关的变异，确保结果主要反映延迟和平台差异的影响。参与者两两分组完成协作任务，这与白板的自然使用方式一致。

本研究涉及一项低风险用户实验，不包含任何侵入性操作，也不收集可识别个人身份的信息或敏感数据。所有参与者在参与前均提供了知情同意。实验任务仅限于在受控实验室条件下开展的基于虚拟现实或个人电脑的白板协作，对参与者造成的风险极小。鉴于研究的低风险性质及其范围，实验方案无需接受正式的机构审查委员会（机构审查委员会）审查，而是经过内部审核，以确保符合既定的伦理原则和机构指南。

3.4 实验流程

实验采用两阶段方法，包括试点研究和正式实验。试点研究有两个主要目的：使参与者熟悉测试流程，并确定在NVR白板交互中对延迟最敏感且最受用户关注的体验质量子维度。在此基础上，随后开展正式实验，以系统地收集不同延迟条件下、跨多种白板类型和协作模式的主观体验质量评分。

3.4.1 试点实验

在试点研究中，NVR白板应用的体验质量首先被划分为实用性和享乐性两个方面。实用性方面包括三个子维度：交互性、效率、

以及可信度。享乐性方面包括愉悦感、沉浸感、可探索性、合理性和新颖性等子维度。参与者在延迟条件下根据这些子维度评估自己的体验。各子维度的定义如下：

- **交互性** 指用户与白板系统进行交互以及与同伴协作时的自然程度和流畅程度。
- **效率** 反映任务过程中投入的时间与任务完成之间的匹配程度。
- **可信度** 体现用户对<白板系统>及其同伴的信任感，以及对协作过程的信心。
- **愉悦感** 表示用户在协作过程中体验到的愉快、放松或轻松程度。
- **沉浸感** 指用户感觉自己置身于白板环境中或沉浸其中的程度，仿佛亲身成为系统的一部分。
- **可探索性** 表示用户在白板协作环境中的移动自由度，以及对空间和宽敞感的体验。
- **合理性** 指所执行的动作和收到的反馈与现实世界物理定律相一致的程度。（例如，手是否能直接穿过白板）。
- **新颖性** 指使用白板系统时感受到的新鲜感或独特感。

在试点阶段，我们进行了先验功效分析。分析结果表明，假设效应量（f=0.25）、显著性水平（α）为 0.05、统计功效（1-β）为 0.95，并采用 2×3 被试内设计（延迟：无延迟与 1000 毫秒；平台：VR+、VR、个人电脑），对八个体验质量子维度进行评估，至少需要 18 名参与者。首先，向参与者介绍实验目标和流程，并培训他们如何操作不同的实验平台。接着，参与者体验了三种协作白板上的无延迟和 1000 毫秒两种条件，分别为 VR+、VR 和个人电脑。随后，要求参与者评估延迟是否会对各个体验质量子维度产生显著影响（是/否），以及用户是否非常重视白板协作中的这些子维度（是/否）。

3.4.2 正式实验

在正式阶段，我们首先针对实验设计进行了先验功效分析。假设效应量为中等（f=0.25），α=0.05 时，18 至 20 名参与者的样本可达到 90%–95% 的统计功效。由于协作任务以两人一组的方式进行，每组内的观察值并非严格独立。因此，作为一种实用的近似方法，功效分析以参与者为单位进行。相应地，主观测试招募了 24 名参与者，其中 6 人也参加过试点研究。参与者被随机配对，并安排在不同房间，以确保所有通信都仅通过实验平台进行。每组所使用的三个实验平台的顺序均随机安排。在每个平台上，参与者按照随机顺序体验两种协作场景（顺序协作和自由协作）。在每种场景中，测试了七个延迟等级：100 毫秒、300 毫秒、600 毫秒、1000 毫秒、1500 毫秒、2000 毫秒和 2500 毫秒。选择这些延迟等级是为了涵盖广泛的条件，包括极端情况，从而捕捉用户体验质量随延迟增加而下降的完整趋势。为尽量减少顺序效应，这些延迟等级的测试顺序经过随机安排。在给定延迟等级下完成一种场景后，参与者使用 ITU-T P.910 [1]定义的 5 点绝对类别评定法（ACR），对一组体验质量子维度进行评价。根据试点研究结果，所选子维度包括交互性、效率、可信度和整体体验质量。每个指标的评分等级为“极佳”“良好”“一般”“较差”和“糟糕”，分别对应 5 至 1 分。随后，对参与者在各条件下的评分取平均，计算平均意见分（MOS） [1]。在一个平台上完成全部七种延迟条件的测试后，参与者休息 15 分钟，再继续测试下一个平台。重复这一流程，直至所有平台均完成测试，实验随即结束。

4 延迟对体验质量影响的分析

本节首先报告一项试点研究，以识别对延迟最为敏感的体验质量子维度。基于这些结果，我们进一步分析正式用户研究，考察延迟在不同协作模式和白板平台上对交互性、效率、可信度和整体体验质量的影响，并进一步探讨这些子维度在不同延迟条件下如何相互关联并塑造整体体验质量。

4.1 试点研究分析

在考察延迟效应之前，我们对两组评分进行了初步效应量分析，以科恩 h 对照 0.5 基线来评估参与者一致性的强度。对于受延迟影响的评分，在效率（h = 1.57）、可信度（h = 0.85）和交互性（h 0.85 .）等实用维度上观察到大效应，表明参与者的反应较为一致。在享乐性维度中，愉悦感（h = 1.07）也显示出大效应，而沉浸感（h = 0.39）较弱，其余维度几乎被一致评为未受影响。对于用户关注度评分，效率（h = 1.07）和可信度（h = 0.85）再次成为最强项，交互性（h = 0.68）显示出中等效应。相比之下，沉浸感（h = -0.85）等享乐性维度被部分参与者视为重要，而愉悦感和合理性较弱，可探索性和新颖性则几乎没有变异。总体而言，实用维度显示出更为一致的用户评分，而享乐性维度的效应较弱且可靠性较低。

结果表明，当某些 QoE 维度与协作白板上的主要任务密切相关时，用户会优先关注这些维度。如图 4所示，所有参与者都认为效率受到了延迟的影响（100%），且几乎所有参与者也认为效率很重要（94%）。同样，可信度被认为既高度受延迟影响（89%），也受到高度重视（91%），凸显了其在维持协作中的信任和一致性方面的作用。交互性受到影响的比例（86%）和关注度（81%）也都很高，这表明响应性和同步受到干扰会直接影响用户体验。相比之下，愉悦感呈现出有趣的差异：尽管大多数参与者认为延迟会影响愉悦感（94%），但只有少数人（17%）认为它很重要。这表明，虽然延迟可能会降低乐趣，但在以任务为导向的协作中，愉悦感并非关键因素。沉浸感也呈现出类似模式：67% 的参与者报告称其受到延迟影响，但只有 9% 的参与者表示关注，这意味着沉浸感的优先级低于有效性。对于其余的享乐性维度——可探索性、合理性和新颖性——几乎没有参与者报告受到延迟影响（0%），表示关注的参与者也很少（6~28%）。这些结果表明，这些子维度在基于白板的协作中相对处于次要地位。

总体而言，研究结果表明，用户主要关注实用维度，包括效率、可信度和交互性，因为这些维度不仅对延迟高度敏感，而且对于有效的任务完成和协作连贯性至关重要。相比之下，享乐性维度（如愉悦感和沉浸感）虽然有时会被认为受到影响，但在塑造用户优先事项方面所起的作用更为次要。这表明，在NVR白板等对延迟敏感的环境中，用户倾向于优先考虑那些直接支持功能性能和可靠协调的维度，而不是主要用于提升体验特质的维度。这些见解凸显了系统设计者围绕实用维度优化延迟处理策略的必要性，以保障核心协作成效；同时也应认识到，享乐性方面虽处于次要地位，但在满足基本功能需求后，仍可能有助于提升整体用户满意度。

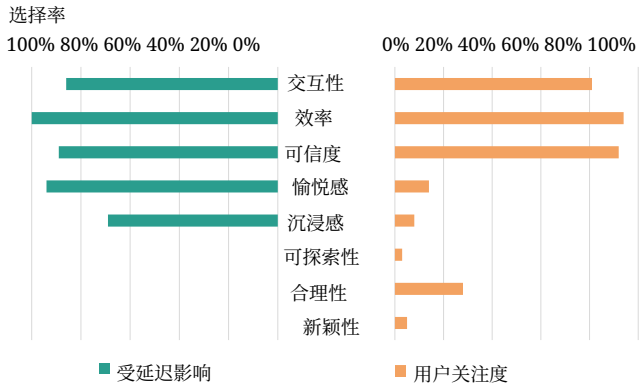


图4：预测试的评分结果。

4.2 交互性的影响分析

首先采用Shapiro-Wilk检验 [12] 评估不同协作模式（SC和FC）及平台（虚拟现实+、VR和个人电脑）下交互性得分的正态性。结果表明，数据服从正态分布（所有p >0值均大于.05）。因此，进行了重复测量方差分析 [16]，以进一步考察两种条件下的差异：（1）同一白板平台内不同协作模式之间的差异；（2）同一协作模式下不同白板平台之间的差异。

如图5a和图5e所示，在顺序协作和自由协作场景中，所有平台的交互性都随着延迟增加而下降。不过，虚拟现实+平台始终表现出显著高于另外两个平台的交互性（F=33.99，p <0.01，η^2=0.85）。这一优势可归因于数字虚拟化身的使用，它使用户能够感知伙伴在虚拟环境中的动作、姿势和空间位置。这种具身体验更贴近现实世界中的白板协作，从而增强了交互感。相比之下，当延迟超过300毫秒时，虚拟现实平台的交互性得分略高于个人电脑平台，但差异未达到统计显著性（F=3.20，p=0.15，η^2=0.44），这表明在高延迟条件下，观察到的优势并不稳健。这一发现表明，仅有虚拟现实环境可能不足以提升协作交互性。相反，加入虚拟化身才是增强交互性的关键因素。

从协作模式的角度来看，如图6a、图6e和图6i所示，在所有平台上，延迟对不同场景交互性的影响各不相同。当延迟较低（ <300毫秒）时，FC场景与SC场景的交互性没有显著差异（p >0.05）。然而，随着延迟增加（ >300毫秒），用户报告称，FC场景的交互性高于SC场景（F=77.58，p <0.01， η^2=0.95），且延迟越高，这种差异越明显。这一趋势在三个平台上均一致，反映了其底层交互动态：SC依赖紧密耦合的轮替，每个动作都取决于协作伙伴即时输入，因此延迟升高时极易受到干扰。相比之下，FC采用较为宽松的并行交互结构，使参与者能够异步调整，并容忍中等程度的延迟。总体而言，这些发现表明，协作模式决定了对延迟的敏感程度，而300毫秒是差异开始显现的重要阈值。

4.3 效率影响分析

效率反映了用户对任务绩效的感知，尤其是他们在不同延迟水平下有效完成任务的能力。如图5b所示，在顺序协作情境中，随着延迟增加，三个平台的效率评分均稳步下降。当延迟较低（≤ 300 毫秒）时，影响很小，分数保持在4左右。3~4.7，且平台间无显著差异（F=1.12，p>0.05， η^2=0.09）。然而，到1000毫秒时，虚拟现实+下降至2.79，显著低于虚拟现实（3.25）和个人电脑（3.29），并且这种差异在1500-2000毫秒时变得更加明显，此时虚拟现实+ 的效率进一步下降（1.6~2.0），而虚拟现实和个人电脑仍保持相对较高水平（2.1~2.6）。重复测量方差分析证实，在较高延迟条件下存在显著的平台主效应（F =6.84，p <0.01， η^2=0.36），表明虚拟现实+ 受到了不成比例的更大影响。一种可能的解释是，在虚拟现实+中，虚拟化身与具身线索的额外同步放大了延迟的感知显著性，使延迟增大时效率低下更加明显。

相比之下，在 FC场景中，如图5f 所示，随着延迟增加，评分有所下降，但下降趋势更为平缓，且受平台影响较小。当延迟低于 600ms 时，其对效率的影响也很小，效率评分下降速度相对缓慢。即使延迟达到 1000 ms，虚拟现实+ (4.21)、虚拟现实 (3.83) 和个人电脑 (3.54) 的评分仍相对较高，高于顺序协作。重复测量方差分析显示，在所有延迟等级下，各平台之间均无显著差异（F=0.94，p >0.05， η^2=0.07）。这表明，FC 松散耦合、并行进行的特点能够缓冲延迟的影响：参与者主要专注于自己的笔画，对即时伙伴反馈的依赖有限，因此效率在不同平台上更为稳定。

顺序协作与自由协作的直接比较（图6b、图6f 和图6j）凸显了协作相关的敏感性。当延迟较低时（≤ 600 ms），顺序协作与自由协作的效率几乎相同（p >0.05）。超过 600 ms 后，顺序协作的评分下降得更快，协作模式与延迟之间出现显著交互作用（F=12.47，p <0.05，η^2=0 51 2000 2500 1 4~2 0, .）。到 ms 时，顺序协作降至 . .，而自由协作仍为 2。7~3.2，表明自由协作始终更具韧性。效率差距在虚拟现实上最大，在虚拟现实上居中，在个人电脑上最小，这反映了各平台可提供的耦合程度和同步线索。

总体而言，效率对延迟高度敏感，但其下降同时受到协作模式和平台的影响。SC采用紧密耦合的轮替，在延迟条件下更为脆弱；而FC即使在中等延迟下仍能保持较高效率。在各平台中，VR+在高延迟下的效率下降更为明显，这可能是由于延迟的虚拟化身同步更加突出所致。这些发现表明，为保持效率，应将延迟控制在600毫秒以下，同时界面设计应致力于减轻延迟反馈对虚拟化身支持的VR的影响。

4.4 可信度影响分析

如图5c所示，在SC场景中，随着延迟增加，各平台的可信度均稳步下降。当延迟较低时（≤ 300 毫秒），可信度仍然较高（4。0~4.7），且各平台之间变化不大。然而，一旦延迟超过600毫秒，可信度下降速度加快，平台差异也变得更加明显。到1000毫秒时，VR+ 仍保持相对较高的可信度（4.13），而VR降至3.25，PC降至2.75。在1500至2000毫秒时，VR和PC大幅下降（1。5~2.3），而VR+ 仍保持相对较高的得分（3。1~3.3）。重复测量方差分析证实，在较高延迟下平台的主效应显著（F=8.27，p <0.01， η^2=0.41），表明VR+ 比VR和PC更能保持可信度。一个可能的解释是，VR+ 中的虚拟化身提供了额外的社交线索，例如可见的伙伴在场和动作；即使在延迟响应的情况下，这些线索也有助于维持协作中的信任和可信性。

在FC场景中，如图5g所示，随着延迟增加，可信度也随之下降，但虚拟现实+ 始终保持着高于虚拟现实和个人电脑的数值。当延迟低于600毫秒时，所有平台的表现都很好（>4.1），且评分保持稳定。然而，超过1000毫秒后，差异变得更加明显：虚拟现实+ 仍保持较高的可信度（4.6），而虚拟现实和个人电脑分别下降至3.7和3.9。在2000至2500毫秒时，差距进一步扩大，虚拟现实+ 仍高于2.9，而虚拟现实和个人电脑则降至2。1~2.4。统计分析证实，在较高延迟下，平台主效应显著（F=7.65，p <0.01， η^2=0.39），表明虚拟现实+ 在延迟条件下更能维持信任和参与度。这说明，在精确时序不太关键的FC场景中，虚拟现实中的虚拟化身+ 通过使伙伴参与度更加明显，进一步增强了可信度。

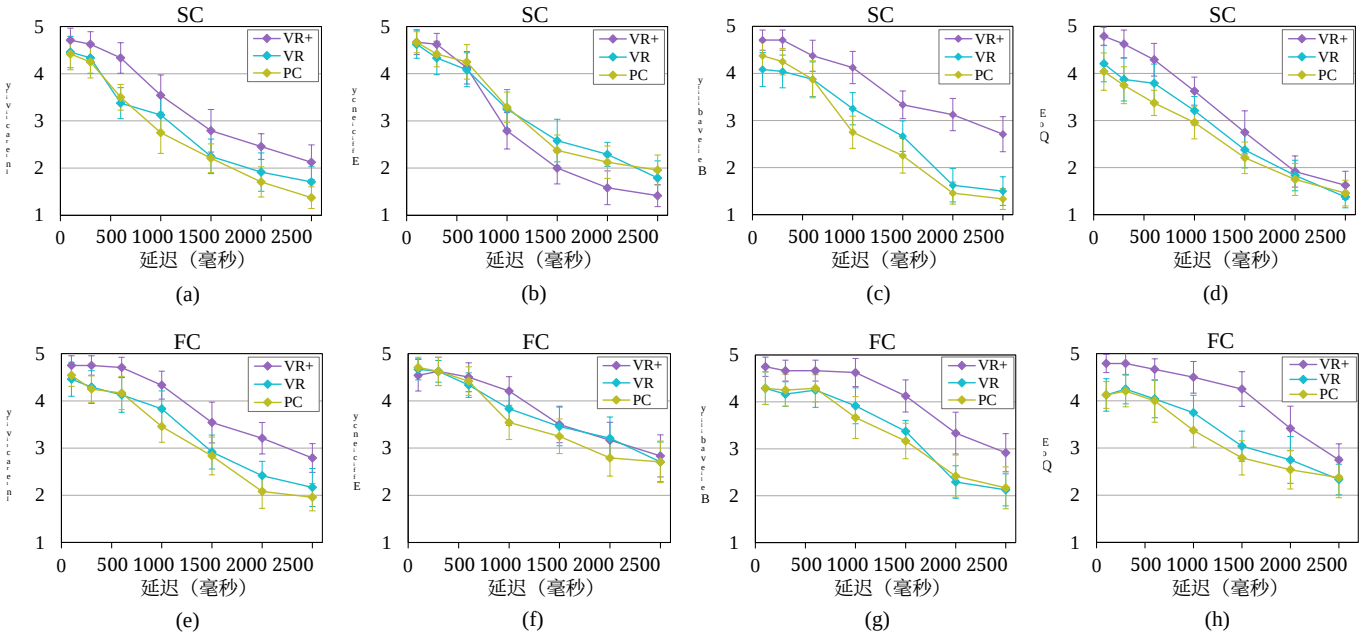


图5：不同白板平台上延迟对体验质量影响的比较。（a）顺序协作的交互性，（b）顺序协作的效率，（c）顺序协作的可信度，（d）顺序协作的体验质量，（e）自由协作的交互性，（f）自由协作的效率，（g）自由协作的可信度，（h）自由协作的体验质量（95%置信区间）。

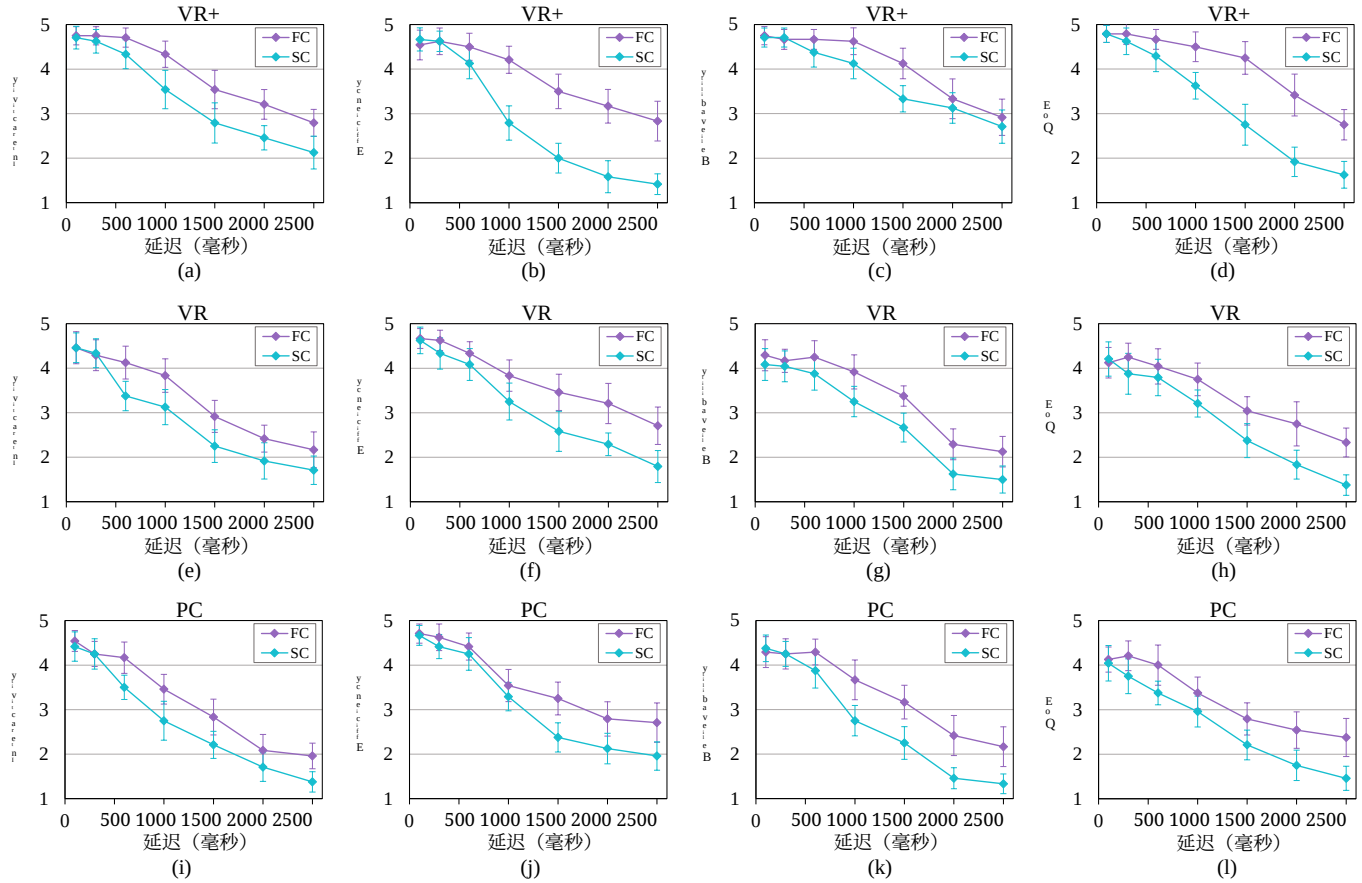


图6：不同协作场景中延迟对体验质量影响的比较。（a）VR+ 平台上的交互性，（b）VR+ 平台上的效率，（c）VR+平台上的可信度，（d）VR+平台上的体验质量，（e）VR平台上的交互性，（f）VR平台上的效率，（g）VR平台上的可信度，（h）VR平台上的体验质量，（i）PC平台上的交互性，（j）PC平台上的效率，（k）PC平台上的可信度，（l）PC平台上的体验质量（95%置信区间）。

表 2：不同延迟条件下体验质量研究结果汇总

条件	顺序协作（SC）	自由协作（FC）	影响
Low 延迟（≤600 ms）	所有平台的体验质量均保持较高水平，而虚拟现实+ 始终显示出最高评分。	各平台的体验质量均保持稳定，但虚拟现实+ 表现出明显优势。	在此范围内，协作可靠，虚拟形象支持可进一步提升用户体验。
中等延迟（600–2000 毫秒）	体验质量迅速恶化，协作一致性也随之瓦解。	自由协作的韧性相对较强，仍然可用。。	600 毫秒似乎是一个重要的阈值。顺序协作应保持在这一限制。
高延迟（>2000 ms）	各平台的体验质量均急剧下降，且差异变得微不足道。	体验质量仍然较差，但略微高于顺序协作。	协作变得不切实际，而这种极端延迟必须避免。
平台效应	VR+在以下条件下优于 VR 和个人电脑低至中等延迟，但表现不如它在极端延迟下的优势。	VR+在低至中等延迟下表现最佳，VR 和个人电脑呈现出大体相似的模式。	虚拟化身能够提升信任和交互性，但其益处最为明显当延迟保持在可管理范围内时。

图6c、图6g，以及图6k比较了各平台上不同协作模式中，感知可信度随延迟变化的情况。结果表明，SC中的可信度对延迟比FC更敏感。当延迟为 ≤600 毫秒时，两种情境下的可信度评分相近。然而，随着延迟增加，SC的评分下降得更明显，导致显著的模式-延迟交互作用（F=10.92，p<0.01， η^2=0.48）。SC与FC之间的可信度差异在PC和VR上最为明显：延迟较高时，SC的可信度下降更剧烈，而FC则相对稳定。在VR+上，两种情境下的可信度评分始终较高，因此差距较小。

总体而言，可信度会随着延迟增加而下降，但下降幅度取决于交互模式和平台。SC由于依赖同步的合作伙伴响应而更脆弱；FC则因结构较为宽松而更具韧性。在两种情境下，VR+始终能保持较高的可信度，这表明基于虚拟化身的具身化提供了重要的社交线索，有助于即使在存在延迟的情况下也维持可信度。

4.5 对整体体验质量的影响分析

本节首先分析不同协作模式和平台类型下延迟对整体体验质量的影响。在此基础上，进一步分析各子维度与整体体验质量之间的关系，并阐明不同延迟下子维度影响体验质量的过程。

4.5.1 不同模式和平台下的体验质量

如图5（d）所示，在三个≤300 平台中，随着延迟增加，SC场景下的体验质量评分均大幅下降。在低延迟（8∼4毫秒）下，评分仍相对较高（3.+ .8），其中虚拟现实+ 始终优于虚拟现实和个人电脑。在600毫秒时，虚拟现实+ 的评分仍高于4.2，而虚拟现实降至3.8，个人电脑降至3.4。当延迟达到1000毫秒时，体验质量下降得更加明显，虚拟现实2000∼2500 为3.63，虚拟现实为3.21，个人电脑为2.96。在更高延迟（4∼1毫秒）下，所有平台的体验质量评分均降至极低水平（1.+ .9）。尽管虚拟现实仍略高于虚拟现实和个人电脑，但这一优势已不再具有实际意义，因为体验质量已经下降到平台差异几乎可以忽略的程度。

相比之下，在 FC场景中，如图5(h) 所示，体验质量评分随着延迟增加而下降，但与 SC 相比，下降趋势更为平缓。在 ≥600 ms 时，所有平台上的体验质量评分始终保持较高水平（>4.0），其中 VR+ 取得了最高分（4.7∼4.8）。延迟增至 1500∼2000ms 时，VR+ 仍保持相对较高的评分（3.4∼4.3），而 VR 和个人电脑的评分则更大幅度地降至约 2.5∼3.0。到 2500 ms 时，所有平台的表现均有所恶化，VR+ 为 2.75，VR 和个人电脑则约为 2.3。

不同协作模式之间的比较（图6d、图6h 和 图6l）表明，自由协作比顺序协作更能抵御延迟的影响。在 ≤300 毫秒时，顺序协作和自由协作在各平台上的体验质量水平相似。然而，随着延迟增加，顺序协作的得分下降得更快，导致显著的模式-延迟交互（F=11.8，p <0.01， η^2=0.5）。这表明，自由协作较为松散的并行结构使用户在延迟条件下仍能维持较好的体验质量，而顺序协作的紧密耦合特性则使其更容易受到影响。

不同延迟条件下体验质量研究结果的总结见表2。随着延迟增加，体验质量显著下降，但协作模式和平台类型都会调节这一影响。SC更为脆弱，超过 600 ms 后评分急剧下降，而 FC 则更具韧性。VR+始终比 VR 和个人电脑取得更高的体验质量，尤其是在延迟较高时。这可能是因为虚拟化身提供了额外的社交和情境线索，使用户即使面对较慢的响应，仍能保持参与度和信任。这些发现表明，将端到端延迟控制在 600 ms 以下对 SC 至关重要；而 FC场景能够容忍稍高的延迟，尤其是在由虚拟化身支持的 VR+平台上。

4.5.2 子维度与 QoE 的关系

为进一步探究在不同延迟条件下，各体验质量子维度与整体体验质量之间的关系及其对整体体验质量的影响，我们聚焦于 VR+ 白板条件。相关性分析显示，在不同协作模式下，整体体验质量与各子维度之间均存在很强的关联（r >0.95）。

如图 7a 所示，在 SC 场景中，当延迟较低（<300 毫秒）时，所有子维度的水平都保持较高，因此体验质量始终较高。然而，随着延迟增加，体验质量显著下降，主要是由于效率和交互性降低。值得注意的是，在 600 毫秒至 2000 毫秒之间，体验质量与交互性的关联最强（T 检验，p >0.05），这表明在中等延迟下，用户对实时响应性和轮替受到的干扰尤为敏感。延迟超过 2000 毫秒后，效率成为体验质量的主要预测因素（T 检验，p >0.05），这表明当性能严重下降时，用户更关注能否在合理的精力投入和时间内完成任务。这反映出，SC 场景中的协作联系紧密，既要求响应性，也要求高效完成任务；但随着延迟变得难以忍受，关注重点会从交互性转向效率。

在 FC场景中，如图 7b 所示，体验质量与可信度的关联最为显著（T 检验，p >0.05）。尽管效率和交互性仍是重要影响因素，但 FC 交互较为宽松、并行的结构意味着，延迟造成的干扰通常仍在用户的容忍范围内。相反，可信度成为影响整体体验质量的决定性因素。即使响应有所延迟，虚拟化身也能让参与者感知到伙伴的参与，从而维持对协作过程的信任。因此，在 FC场景中，与其他维度相比，可信度的变化对体验质量的影响要大得多。

表 3：不同延迟等级和协作模式下的主导体验质量子维度

延迟范围	顺序协作（SC）	自由协作（FC）	解释
低延迟（<300 毫秒）	所有子维度均保持较高水平且体验质量稳定。	所有子维度均保持较高水平且体验质量稳定。	用户感知到的干扰极小，且延迟的影响在很大程度上可忽略。
中等延迟（600–2000 毫秒）	**交互性占主导**：体验质量与交互性最为密切相关。	**可信度占主导**：体验质量与信任最为密切相关以及伙伴参与度。	SC 用户对互动流程高度敏感，而自由协作用户则更关注伙伴看起来是否专注的。
高延迟（>2000 ms）	**效率占主导**：任务完成能力变得至关重要，因为延迟严重阻碍了进展。	可信度仍然是最影响力最大的维度，尽管整体体验质量有所下降。	当响应性崩溃时，SC 用户会根据效率来评判体验质量，而 FC 用户仍会权衡伙伴参与度的可信性。伙伴参与度。

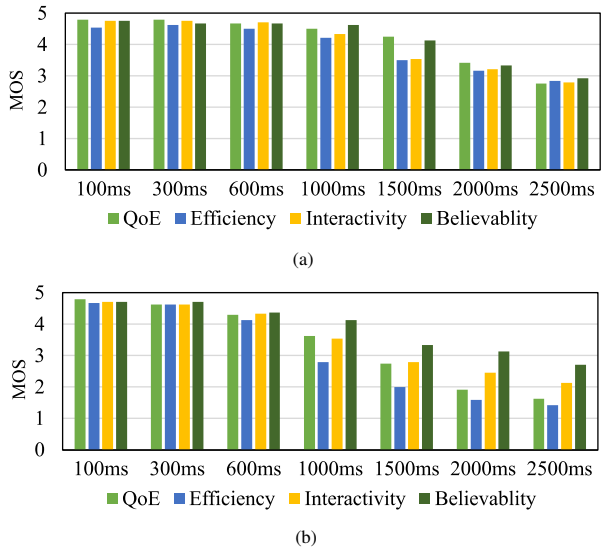


图 7：VR+中各子维度与体验质量的比较：(a) SC 和 (b) FC。

这些发现表明，体验质量的主导子维度会因延迟水平和协作模式而异。主导体验质量子维度汇总见表 3。在 SC场景中，中等延迟下交互性最为关键，而严重延迟下效率则占主导地位。在 FC场景中，可信度是关键因素，因为对伙伴参与度的信任胜过效率的中度损失。这种差异不仅阐明了延迟影响体验质量的机制，也提供了可操作的参考：支持 SC 的系统应着力将交互延迟控制在 600 毫秒以下；支持 FC 的系统则应确保具备增强伙伴可见性和信任的机制，例如使用虚拟化身，即使网络条件保持不变也应如此。

5 局限性与未来工作

本节总结了本研究的主要局限性，并重点介绍了旨在拓展研究发现适用范围的未来工作方向。

- **参与者多样性**：参与者样本由年龄范围相对狭窄的大学生组成。尽管这种受控选择有助于减少与实验操纵无关的变异，但它可能限制研究发现对更广泛且更加异质的用户群体的外部效度。
- **交互模态**：当前研究未纳入语音交流，其与延迟效应的潜在交互仍有待探索。
- **网络条件**：实验在受控的局域网条件下进行。尽管这能够精确调控端到端延迟，但真实世界的网络环境可能引入抖动和丢包等额外因素，这些因素可能进一步影响用户体验，因此在实际部署场景中值得考虑。
- **评估指标**：本研究的评估主要依赖主观体验质量评分。尽管主观评估对于捕捉用户感知至关重要，但缺乏客观性能指标，例如任务完成时间、错误率或交互重叠，限制了对延迟影响进行更加系统的刻画。

未来工作将把研究扩展至更多样化的用户群体、交互模态和网络条件，以进一步验证并推广研究发现。此外，未来研究将重点纳入客观性能指标，并开发客观评估模型，从而更加系统地评估延迟对 NVR 白板协作中体验质量的影响。

6 结论

本研究考察了不同延迟条件下用户在 NVR 白板中的体验质量如何变化，并揭示了驱动这些变化的关键因素。研究结果表明，与享乐性方面相比，用户在 NVR 白板协作中更重视交互性、效率和可信度等实用维度。延迟主要通过损害这些维度来降低整体体验质量。在低延迟条件下，顺序协作和自由协作场景均能带来良好的用户体验，而引入虚拟化身则可通过增强交互性和信任进一步提升协作体验。在中等延迟条件下，顺序协作中的体验质量与交互性关联最为密切，而在自由协作中，可信度起主导作用。在这一阶段，虚拟化身仍有益处，因为它们有助于提升响应性和可信性。然而，在高延迟条件下，虚拟化身的响应延迟往往会加剧用户对效率的负面感知。因此，在延迟严重且交互性较高的场景中，如果效率是首要考虑因素，减少或不使用虚拟化身可能更为合适。本研究采用以用户感知体验质量为视角的研究方法，为在不同网络条件下优化 NVR 白板系统提供了实用指导。

致谢

本工作部分得到了国家自然科学基金（62171353）的资助。

参考文献

[1] ITU-T P. 910号建议书。多媒体应用的主观视频质量评估方法，2023 5。K. Abramczuk、Z.

[2] Bohdanowicz、B. Muczynski、K. H. Skorupska 和 D. Cnotkowski。来虚拟现实中与我相会！VR空间能帮助远程团队建立联系吗：一项为期七周、使用 Horizon Workrooms 的研究。《国际人机研究杂志》，179:103104，2023年。2

[3] Z. Akhtar、K. Siddique、A. Rattani、S. L. Lutfi 和 T. H. Falk。为什么多媒体体验质量评估是一项具有挑战性的问题？IEEE Access，7 117897 117915, 2019 1 : –。B. Chandana、M. V. Kanth、G. [4] Anand 和 M. Jagdish。通过手势变革教与学。载于2024 OPJU智能计算促进产业创新与发展国际技术会议（OTCON），*4 0*， 1 5 2024 2 。第 – 页。IEEE，。M. [5] Claypool 和 K. Claypool。在线游戏中的延迟与玩家操作。《ACM通讯》，49 11 40 45, 2006 2 ( ): –。M. Erofeeva 和 N. O. [6] Klowait。虚拟现实、增强现实和交互式白板对中学 STEM 教学注意力管理的影响。载于2021年第七届沉浸式学习研究网络国际会议（iLRN），第 1 5 2021 1 –页。IEEE，。[7] F. M. García、S. Schez-Sobrino、C. Glez-Morcillo、J. J. Castro-Schez、J. A. Albusac 和 D. Vallejo。Rtc-mr：一种基于 WebRTC 的混合现实实时通信框架。《软件影响》，23 100727, 2025 4 :。J. E. S. [8] Grønbæk、J. Sánchez Esquivel、G. Leiva、E. Velloso、H. Gellersen 和 K. Pfeuffer。融合式白板：远程混合现实协作中的实体性与可重构性。载于2024年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集，第 1 16, 2024 1 –页。R. [9] Gumienny、L. Gericke、M. Quasthoff、C. Willems 和 C. Meinel。Tele-board：促进数字设计空间中的高效协作。载于2011年第15届计算机支持的设计协同工作国际会议（CSCWD），第 47 54 2011 2 –页。IEEE，。[10] A. Hameed、S. Möller 和 A. Perkis。虚拟现实体验的整体质量分类体系。《虚拟现实前沿》，5:1434016，2024年。1[11] H. Handley。使用在线交互式白板的最佳实践。《应用教学设计杂志》，12 4 57 73, 2023 2 ( ): –。Z. Hanusz、J. [12] Tarasinska 和 W. Zielinski。已知均值条件下的夏皮罗–威尔克检验。《REVSTAT统计学杂志》，14 1 89 100, 2016 6 ( ): –。A. [13] Hoff、C. Seidl、M. Lungu 和 M. Lanza。通过虚拟现实中的徒手草图为软件再工程做准备。载于2023年IEEE软件维护与演化国际会议（ICSME），第317–328页。IEEE，2023年。2[14] R. Jahangir、Z. Sultana、N. S. Mohim、M. T. Islam、M. Kamal、I. Islam 和 M. N. Islam。通过可用性评估确定交互式白板界面的设计指南。载于设计与数字传播国际会议，第 94 107 2023 1 –页。施普林格，。[15] S. Jörg、A. Normoyle 和 A. Safonova。响应性如何影响玩家对数字游戏的感知。载于ACM应用感知研讨会论文集，第 33 38, 2012 2 –页。[16] H. Keselman、J. Algina 和 R. K. Kowalchuk。重复测量设计的分析：综述。《英国数学与统计心理学杂志》，54 1 1 20, 2001 6 ( ): –。S. A. [17] Khairullah 和 S. Z. K. Mon。用于白板原型的 Easy-erase。《工程应用与技术进展》，5(1):500–511，2024年。2[18] T. Kojic、S. Schmidt、S. Möller 和 J.-N. Voigt-Antons。网络延迟对虚拟现实多人运动游戏的影响：究竟是谁被延迟了？载于2019年第十一届多媒体体验质量国际会议（QoMEX），第 1 3 2019 3 –页。IEEE，。M. Kumar、[19] G. Rathi、T. Singh、T. NL 等。基于 CNN 的虚拟白板应用。载于2024年第二届信息技术进展国际会议（ICAIT），卷 1， 1 6 2024 1 ，第 – 页。IEEE，。[20] Y. Kusunose、Y. Ishibashi、N. Fukushima 和 S. Sugawara。采用触觉媒体的联网空气曲棍球游戏体验质量评估。载于2010年第九届网络与系统支持游戏年度研讨会，第1–2页。IEEE，2010年。3[21] G. Liu、H. Su、J. Wang、Q. Qi、H. Sun、Z. Zhuang、P. Ren 和 J. Liao。探索虚拟现实中白板协作的徒手交互。《ACM人机交互论文集》，9(2):1–31，2025年。1[22] Y.-F. Luo 和 S. C. Yang。白板交互功能对小学生学习的影响。《教育计算研究杂志》，54 5 680 700, 2016 2 ( ): –。S. McCorkle 和 P. [23] Whitener。Lightboard：预期与体验。《学习设计国际期刊》，11(1):75–83，2020年。2[24] M. Meehan、S. Razzaque、M. C. Whitton 和 F. P. Brooks。延迟对压力性虚拟环境中临场感的影响。载于IEEE虚拟现实会议，*2003* 141 148 2003 3 。论文集，第 – 页。IEEE，。[25] E. Merzhäuser、G. Zimmermann 和 A. Gerlicher。UninotesXR——无障碍扩展现实中的协作：面向视障人士、带有三维音频用户引导的空间白板。载于欧洲辅助技术促进协会国际会议，页码 41 51 2025 1, 2 – 。施普林格，。J. Minnekanti、N. K. Banerjee 和 S. Banerjee。Classesinvr：沉浸式虚拟现实课堂。载于2024年IEEE人工智能、扩展现实与虚拟现实国际会议（AIxVR），页码310–314。IEEE，2024年。1[26] [27] S. Moller、K.-P. Engelbrecht、C. Kuhnel、I. Wechsung 和 B. Weiss。多模态人机交互中服务质量与体验质量的分类法。载于2009年多媒体体验质量国际研讨会，页码 7 12 2009 1 – 。IEEE，。L. Pantel 和 L. [28] C. Wolf。延迟对实时多人游戏的影响。载于第12届数字音视频网络与操作系统支持国际研讨会论文集，页码 23 29, 2002 2 – 。[29] M. Petrykowski、P. Berger、P. Hennig 和 C. Meinel。虚拟现实中借助白板进行数字协作。载于《未来技术会议（FTC）2018：第1卷》论文集，页码962–981。施普林格，2019年。1[30] E. Pikas、B. Pedó、A. Tezel、L. Koskela 和 M. Veersoo。用于支持远程协作设计过程规划与控制的数字化末位规划师系统白板。《可持续发展》，14 19 12030, 2022 2 ( ): 。K. Raaen、[31] R. Eg 和 C. Griwodz。玩家能察觉到云端延迟吗？载于2014年第13届游戏网络与系统支持年度研讨会，页码 1 3 2014 2 – 。IEEE，。R. [32] Rasmussen 和 M. Hertzum。关注细节：一项关于电子白板相较于白板的阅读距离与修订时间的研究。载于第 *12* 2013 2 届丹麦人 [33] 机交互研究研讨会论文集，。E. A. M. Reguera 和 M. Lopez。利用数字白板提升远程教育中的学生参与度。《计算机与电气工程》， 93 107268, 2021 2 : 。J. Rekimoto。支持基于白板交互的多设备方法。载于 SIGCHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集，页码 344 351, 1998 2 – 。[34] S. Ringe、R. Kedia、A. Poddar 和 S. Patel。基于HTML5的实时交互虚拟白板。《计算机科学进展》，49 177，2015 170 2 ： – 。[35] [36] M. Rohde、L. C. Van Dam 和 M. O. Ernst。可预测性是实现闭环视觉反馈延迟适应的必要条件。《视觉学报》，14 4，2014 3 4 2 ( ): – 。[37] Y. Sakuraba、Y. Fujinaga、T. Yamazaki、T. Watanabe、T. Kaneko 和 S. Saga。用于协同工作的基于三维草图的建模界面。IPSJ交互论文集，日本东京，页码 15 17, 2012 2 – 。M. [38] Sithu、Y. Ishibashi、P. Huang 和 N. Fukushima。对具有触觉的联网实时游戏中软物体的可操作性与公平性进行体验质量评估。载于2015年第21届亚太通信会议（APCC），页码 570 574 2015 3 – 。IEEE，。[39] A. Steed 和 M. F. Oliveira。联网图形：构建联网游戏与虚拟环境。爱思唯尔，2009 2 。A. Tepljakov。用于先进 [40] 控制系统设计的扩展现实交互式白板。载于2021年第44届国际电信与信号处理会议（TSP），页码 283 287 2021 2 – 。I [41] EEE，。D. Varona-Marin、J. A. Oberholzer、E. Tse 和 S. D. Scott。使用移动设备采集白板内容的会后整理。载于2018年ACM交互表面与空间国际会议论文集，页码 43 54, 2018 2 – 。S. Vlahovic、M. Suznjevic 和 [42] L. Skorin-Kapov。网络延迟对第一人称射击虚拟现实游戏体验质量的影响。载于2019年第十一届多媒体体验质量国际会议（QoMEX），页码1–3。IEEE，2019年。3[43] T. Waltemate、I. Senna、F. Hülsmann、M. Rohde、S. Kopp、M. Ernst 和 M. Botsch。延迟对虚拟现实闭环交互中的知觉判断与运动表现的影响。载于第22届ACM虚拟现实软件与技术会议论文集，页码 27 35, 2016 2 – 。J. Wang 和 L. Jing。新型协作式虚拟现实白板系统的 [44] 操作效率研究。载于《国际人机交互会议2021年海报集：第23届国际人机交互会议（HCII 2021），线上活动，2021年7月24日至29日，论文集》第III部分 *23*， 629 636 2021 1 页码 – 。施普林格，。[45] J. Wang 和 L. Jing。利用自然手写进行远程协作的虚拟现实白板系统。《电子学》，11(24):4152，2022年。[46] [1, 2] I. Wechsung、K.-P. Engelbrecht、C. Kühnel、S. Möller 和 B. Weiss。

测量多模态人机交互的服务质量和体验质量。《多模态用户界面》期刊，6(1):73–85，2012年。 1