有限视野对扩展现实中虚拟化身音乐协作体验的影响

Suibi Che-Chuan Weng*ATLAS* 研究所 科罗拉多大学博尔德分校博尔德，美国
suibi.weng@colorado.edu

Torin Hopkins
SolJAMM 研究机构
丹佛，美国
0000-0001-7359-2906

Shih-Yu Ma
计算机科学系
科罗拉多大学博尔德分校
博尔德，USA
shih-yu.ma@colorado.edu

Amy Bani´c*InteractiveRealities* 实验室 电气工程与计算机科学系 怀俄明大学拉勒米，美国
abanic@uwyo.edu

Ellen Yi-Luen Do
ATLAS 研究所
科罗拉多大学博尔德分校
博尔德，美国
ellen.do@colorado.edu

arXiv:2601.00333v1 [cs.HC] 1 Jan 2026

摘要——**在音乐协作过程中，视觉线索对于音乐家之间的沟通至关重要。扩展现实（XR）应用通常搭配增强现实（AR）眼镜等头戴式显示器使用，这可能会限制演奏者的视野（FOV）。我们开展了一项研究，探究视野受限对共同在场感、手势识别、整体愉悦度和反应时间的影响。**

最初，我们观察了经验丰富的音乐家在有无视觉遮挡的情况下进行非正式协作，发现视场受限会损害协作效果。随后，我们对19名参与者开展了一项被试内研究，将视场不受限制的全息布置HoloJam与视场受限的NReal AR眼镜（ 52° ）进行比较。在AR布置中，我们测试了两种条件：标准AR（视场为 52° ）和一种名为Mini Musicians的改进版AR 通知系统。

结果显示，HoloJam带来了更强的共同在场感、更快的手势识别速度和更高的愉悦度。与标准AR布置相比，Mini Musicians应用缩短了反应时间，同时保持了愉悦度。我们得出结论：视场受限会影响音乐协作，但通知可以改善反应时间，未来的扩展现实音乐协作应考虑采用通知。

索引词—**音乐元宇宙、音乐扩展现实、数字音频工作站、受限交互**

I. 引言

在 COVID-19 疫情期间，人们继续寻求通过音乐与他人建立联系的方式，包括使用联网音乐平台 [1]–[3]。Jacktrip [3] 和 Jamulus [2]等远程音乐协作软件，让人们能够远距离合奏，并致力于重现真实的听觉音乐体验。联网视频有助于实现视觉协作 [3], ，而扩展现实（XR）应用则提供了另一种途径，可用于探索三维空间中的社交动态 [4], [5]。

在音乐协作中，演奏者之间的沟通会以空间方式进行，通常涉及有指向性的手势、面部表情和眼神注视 [1]。这些信息对于音乐过渡和集体音乐协作至关重要。

近年来，AR头显的使用大幅增加，激发了人们对增强现实中人与虚拟内容之间交互的浓厚兴趣。随着AR技术不断发展，了解人们如何感知并与虚拟元素互动变得愈发重要，尽管当前技术仍存在视野（FOV）受限等局限。该领域的研究通常会考察用户如何处理位于其视野之外的信息 [6], [7]。这类研究大多着眼于通过消息通知提升任务表现，而非增强视野之外虚拟化身的社会临场感 [8]–[11]。音乐协作高度依赖交流手势，因此为研究人与虚拟化身的互动提供了宝贵场景 [1], [12]。在面对面互动中，手部动作和眼神交流等手势很容易观察到；但在多虚拟化身协作中，如果虚拟化身位于用户视野之外，识别这些社交线索就会变得困难。

在本研究中，我们在 Weng 等人关于视场限制对音乐协作影响的研究基础上，进行了更深入的探讨。 [13], [14]

为深入探究这一问题，我们开展了一项分为三个部分的调查，如图 2 所示。研究人员从这些环节以及此前关于增强现实通知的研究中获得启发，进而测试了一种全息音乐家系统，并将其与一种已知的周边视野通知类型——蓝色球体进行比较。[9], [13]。研究人员发现，参与者使用该通知系统时反应时间更短，但他们表示自己感到分心。 [13]

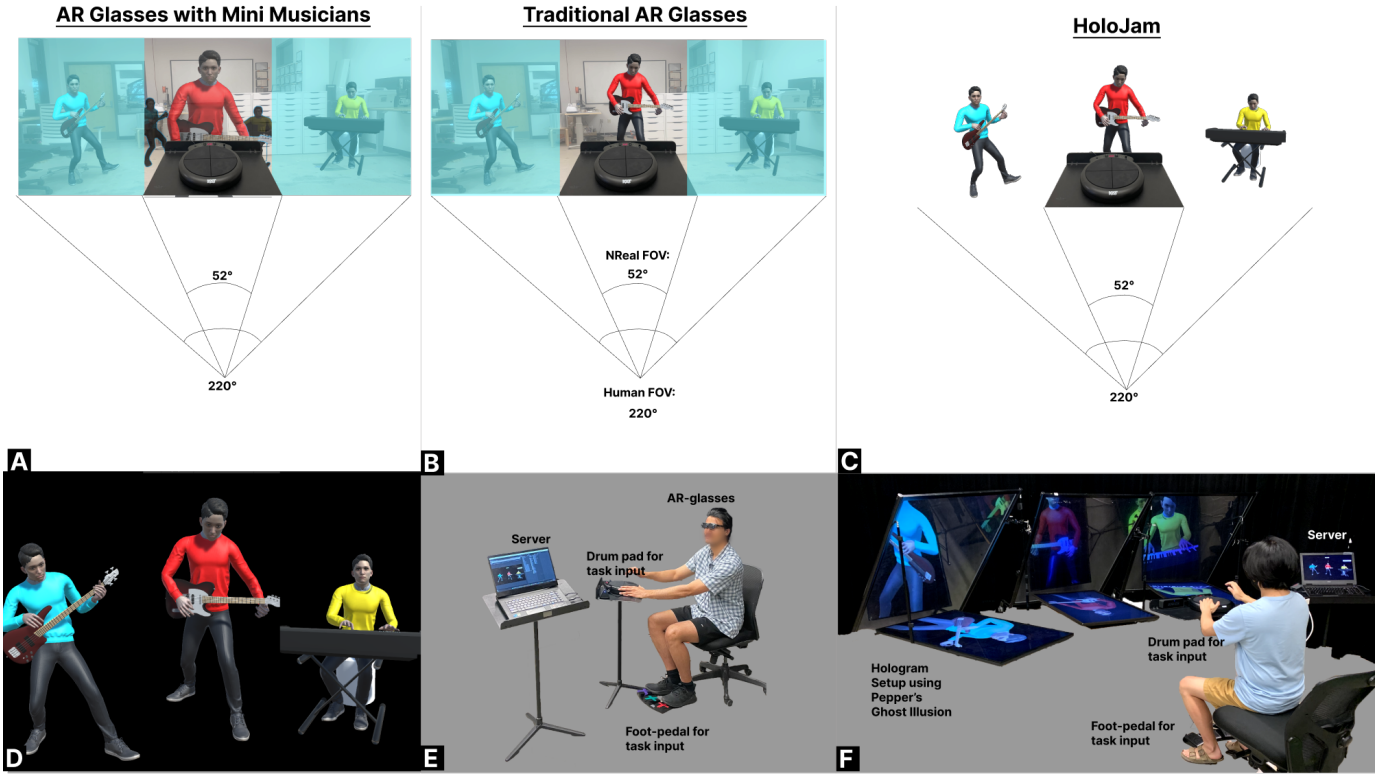

图 1. A）使用增强现实眼镜、MIDI 鼓和迷你音乐家的实验设置示意图；B）没有迷你音乐家时有限视野的示意图；C）展示视野不受限制时的全息布置。

此外，我们观察了现场即兴合奏，音乐家在两种条件下共同演奏：1）正常演奏；2）佩戴会遮挡周边视觉的眼镜演奏。基于我们的观察和此前的相关研究，我们开发了三个系统来验证假设。第一个系统采用 HoloJam，它由三个通过佩珀尔幻象实现的全息图构成，代表不受视场限制的条件（图 1 C）。第二种条件使用完全相同的应用程序，但搭配增强现实眼镜（图 1 A 和 B），并根据用户的位置将视场限制为 52°。第三种也是最后一种条件使用相同的应用程序；当虚拟化身位于视野之外时，其缩小且半透明的版本会出现在视野内（迷你音乐家）。该通知系统名为 Mini Musicians。我们开展了一项被试内研究，对比这三种条件。在研究中，参与者需要与三位虚拟化身音乐家一起敲奏手鼓，并指出虚拟化身何时正在看着他们。

本文将讨论启发我们进行实验设计、方法制定和结果分析的相关工作，以及对该领域未来研究的启示。结果表明，受限的视场确实会影响音乐协作体验。与较大视野相关的条件在与虚拟化身的共同在场感和总体愉悦度方面得分显著更高。然而，在增强现实眼镜条件下，迷你音乐家的通知策略显著缩短了反应时间。

本研究的贡献如下：

- 受限的视场会显著降低音乐家在即兴演奏期间的沟通能力，从而影响音乐和感知体验
- 迷你音乐家通知有助于缩短使用增强现实眼镜时的反应时间
- 在增强现实中演奏音乐时，通知不会显著影响共同在场感，这可能是因为分散了注意力

II. 相关工作

我们的研究聚焦于三个不同领域。首先，我们探讨扩展现实（XR）中的音乐协作，考察虚拟化身如何提升音乐家参与合作音乐活动时的沉浸体验。其次，我们探索专为增强现实眼镜设计的通知，旨在解决物体位于用户视野之外这一难题。通过为这些物体提供视觉线索或指示，我们希望提升整体增强现实体验并提高用户参与度。最后，我们研究增强现实情境中虚拟化身的社会临场感，考察用户如何感知虚拟环境中的虚拟化身并与之互动，尤其关注虚拟化身对协作互动和感知临场感的影响。

A. 扩展现实中的音乐协作

在过去二十年里，音乐与扩展现实的交叉领域已成为一个成熟的研究方向，改变了

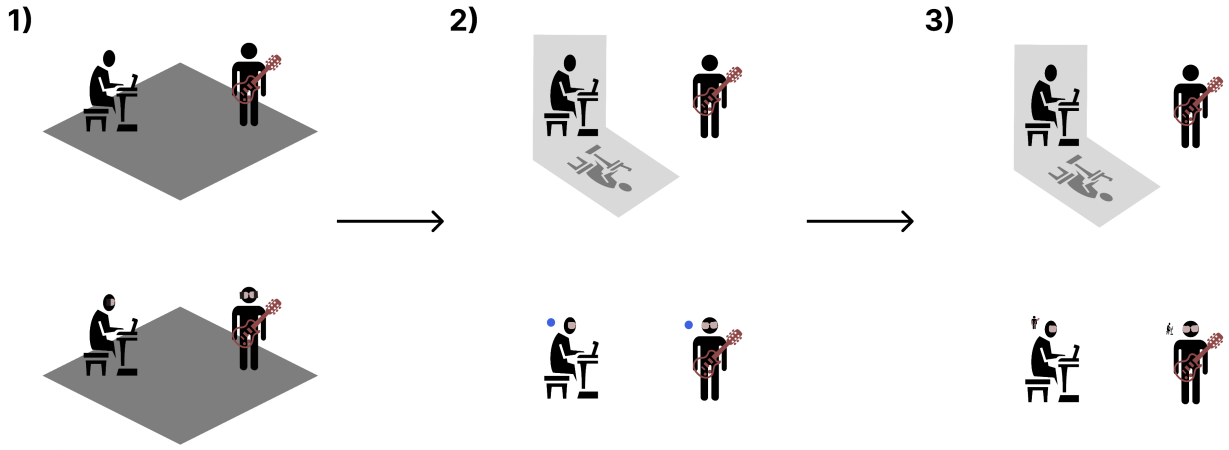

图2。（1）评估在52度视场下有视觉遮挡和无视觉遮挡时的现场即兴演奏场次（2）评估全息图与蓝光通知的效果，[13]（3）评估全息图与迷你音乐家的效果[14]

传统的音乐互动方式，使演奏者能够与虚拟物体、智能体和环境进行互动[15]。在 COVID-19 疫情期间，面对面的音乐合作受到限制，人们因此开始广泛探索将混合现实技术作为营造临场感和社群感的手段。项目 Wish You Were Here [16]，是一项实验室研究，旨在评估混合现实在音乐合作中的潜力，并将其与仅音频的基准条件进行比较。结果显示，在混合现实中即兴合奏的音乐家拥有更强的共同在场感和更积极的情绪体验。

人们还探索了多种其他协作音乐创作方法，例如使用作曲桌[17]–[19]，或采用图形界面记录协作体验[20]，[21]。然而，研究表明，在音乐协作中使用增强现实或虚拟现实（VR）能带来更出色的沉浸式体验[12], [22]。包括增强现实鼓圈在内的研究[1],强调了扩展现实音乐协作中社交线索的重要性，其中动画虚拟形象能增强沉浸式体验。不过，仍存在一些挑战，例如增强现实眼镜的视场有限，可能导致虚拟角色被截断，从而影响沟通和音乐表演。本研究旨在通过统计分析，深入了解增强现实眼镜视场受限对虚拟化身音乐协作的影响。

B. 增强现实眼镜有限视场的通知

许多光学透视显示器的视野相对较窄。然而，有限视场会限制信息的呈现方式，以及用户通过 [6] 搜索信息的方式。研究人员已从硬件和软件两个层面提出解决方案，以应对 AR 应用程序中有限视野带来的挑战。

硬件解决方案旨在扩大用户的周边视觉。例如，RadialLight [9]利用 LED 插件来扩展视野，而 Eye-q [23] 等项目则引入了嵌入眼镜中的可穿戴周边显示器。

在软件方面，研究人员采用视觉通知来缓解有限视野带来的局限。Flying Arrow 等项目 [8] 利用移动箭头指示器，引导用户注意屏幕外的物体。Matsuzoe等人 [24] 探索了使用振动图标来提示屏幕外目标的距离。为进一步推进这项研究，Qian等人 [10] 在使用增强现实眼镜进行搜索任务时测试了不同的通知方式，发现带有蓝色指示器的边缘通知能够带来更好的表现。

除了通知之外，Push the Red Button [25] 等项目也展示了腕部通知与其他 AR 元素结合使用的效果。如果已知用户的视线方向，显示在用户视野内的通知就能被迅速注意到并理解。与此同时，The Peripheral Vision研究[26],所研究的移动周边视觉模型，旨在简化智能眼镜上的多任务处理，无需额外硬件。Rzayev等人的研究[27]侧重于在面对面沟通期间显示通知，进一步凸显了针对 AR 应用程序中的不同场景定制通知策略的重要性。

虽然以往研究主要聚焦于导航任务和物体寻找，但我们的研究专门探讨用户如何感知音乐活动中的虚拟化身行为。借鉴以往的通知研究，我们以反应时间、共同在场感[7], [28], 和愉悦度作为衡量扩展现实中音乐任务通知策略效果的指标。我们利用增强现实眼镜上的软件通知，旨在解决增强现实眼镜固有的局限，并提升音乐协作体验。



图 3. (A) 有限视野护目镜 (B) 正常　　即兴演奏：全视野的音乐家 (C) 有限视野：戴着护目镜即兴演奏的音乐家 (D) 即兴演奏

C. 增强现实中虚拟化身的社会临场感

增强现实研究凸显了与虚拟化身互动的重要性，而了解用户对虚拟化身存在的感知，对于评估其对音乐协作 [29]的影响至关重要。以往研究采用社会临场感问卷来评估临场感 [1], [7], [28],[30]。Osmers 等人 [31] 开展了一项综述研究，证实了非对称协作情境中的社会临场感会影响用户偏好和接受度。

此外，Hart 等人 [32]发现，在扩展现实通信场景中，人们偏好三维虚拟化身，因此我们在研究中重点关注三维虚拟化身音乐家。在增强现实鼓圈中，正如 Hopkins 等人 [1]观察到的那样，参与者非常关注虚拟化身的身体表达。这些发现促使我们探索增强现实软件修改，使虚拟化身的全身能够显示在外部屏幕上。

同样，多项研究表明，眼神交流和身体动作能够提升任务表现 [33]–[37]。然而，增强现实中的有限视野（FoV）会削弱虚拟化身的社会临场感以及用户对其所传达信息的感知 [38]。Shin 等人 [38] 发现，佩戴增强现实头戴式显示器（HMD）的用户面临挑战，因为有限视野会导致他们频繁转动头部。Piumsomboon 等人的 Mini Me 项目 [7], 比较了在各种场景中，使用增强现实眼镜时真人大小的虚拟化身与屏幕上的迷你虚拟化身所带来的社会临场感，结果显示 Mini Me 的社会临场感得分更高。他们的研究场景包括城市规划、设计任务 [34], 、会议室 [33], 和茶会 [7]。

在我们的研究中，我们特别关注多个虚拟化身位于视场之外时的音乐活动。基于以往研究、对一次音乐即兴演奏的观察和玩家反馈，我们创建了一个**迷你音乐家虚拟化身**，当真人大小的虚拟化身位于玩家视场之外时，它便会出现。

III. 方法

在本研究中，我们考察视野（FOV）如何影响音乐协作。首先，我们观察了一场现场音乐即兴演奏，参与者在演奏时佩戴或不佩戴将视野限制到 52° 的眼镜。我们录制了整场演奏并分析视频。完成分析和访谈后，我们根据即兴演奏的分析结果搭建了实验装置。这种观察方法借鉴了 Hopkins 等人开展的音乐家视频观察方法 [1]。

A. 即兴演奏观察

为考察有限视野（FOV）的影响，我们组织了两场各 30 分钟的即兴演奏，参与者包括两名吉他手、一名贝斯手、一名鼓手和一名歌手（图 3D）。第一场为对照组，不施加任何外部因素（图 3B）。第二场中，参与者佩戴护目镜，视野被限制到 52°，以模拟增强现实护目镜（图 3C）。两场演奏均使用三台网络摄像头从不同角度进行录制。我们评估了音乐质量和演奏协调性，并记录参与者的身体姿势和语言。研究助理使用 Datavyu 和书面笔记，对每位参与者每场演奏中的两分钟片段进行分析 [39]。

1）音乐家：这个即兴演奏小组由五名年龄在25至31岁之间的音乐家组成：两名吉他手、一名贝斯手、一名键盘手和一名鼓手。他们使用各自的乐器均有五年以上的经验，并且每周定期一起即兴演奏一到两次。

2）正常即兴演奏：在一次常规的即兴演奏中，音乐协作表现出色，同步程度很高，节奏也很快。尽管出现了几次轻微的沟通失误，但都迅速得到了解决。参与者之间沟通频繁，经常快速进行眼神交流，偶尔也会交换简短的语言提示。在整个演奏过程中，每位音乐家都多次与其他音乐家及其各自的乐器进行眼神交流。

3) 有限视野即兴演奏：与之前的演奏相比，在有限视场的即兴演奏中，音乐协作明显变差。由于所有音乐家都采取了更为保守的方式，演奏出的音乐连贯性和尝试性均有所降低。本次演奏中的沟通也受到阻碍，音乐家之间实际进行眼神交流的情况减少了。事实上，一些音乐家甚至完全不再抬头。此外，整体身体动作有所增加，包括频繁转头。例如，鼓手必须大幅度移动头部，才能看清鼓，从而影响了演奏。

4) 观察总结：相比之下，对照测试中的音乐连贯性优于佩戴限制视野的护目镜进行的测试。第一次测试中的肢体语言也更加开放（抬起头、身体朝向彼此等）。佩戴护目镜时，参与者低头的次数明显更多，眼神交流也更少。观察还发现，鼓手佩戴护目镜时难以看清整个鼓组，因为鼓组比其视场更宽。

我们进一步分析了参与者抬头或环顾其他参与者的次数。其定义为明确地看向另一位参与者的乐器或眼睛。本次测试中，我们观看了每场时长为 2 分钟的片段，并观察一位参与者。随后，我们对同一场次中其他参与者也重复观察了相同的 2 分钟。对照场次中，参与者总共**62** 次看向其他参与者。另一场次中，参与者总共**27**次看向其他参与者。这表明，由于缺乏周边视觉，受限视场减少了非语言沟通。

5) 即兴演奏后访谈总结：我们分析了参与者对于有限视场即兴演奏与正常即兴演奏场次体验的访谈。访谈的主要要点如下：

对照即兴演奏：体验过正常即兴演奏场次的参与者表示，即兴演奏进行得很顺利，也足以代表他们平时的即兴演奏体验。

有限视野即兴演奏：最初，参与有限视场即兴演奏的参与者并未感到与对照即兴演奏有太大差异。然而，他们逐渐开始注意到一些局限。具体而言，他们提到自己会一直注视前方，而不会环顾四周。这种注意范围的缩小导致了一些沟通中断，因为参与者通常需要更长时间才能注意到有人在看他们或试图传达某些信息。

缺失的视觉线索：一位参与者表达了沮丧之情，称由于有限视场，他们无法看到自己错过的东西，因此也不知道自己究竟遗漏了什么。无法感知完整视觉场景的情况妨碍了他们对即兴演奏场次的整体体验和理解。

遗忘共同在场感：另一个值得注意的观察是，参与者提到，由于视场有限，他们有时会忘记某些玩家存在于虚拟空间中。这种遗忘可能会导致无意中的排斥，或在即兴演奏过程中忽视某些人的贡献。

对迷你化身的需求：三位参与者提到，他们很希望看到类似《马力欧卡丁车》中的迷你版虚拟化身。他们建议，将较小的虚拟化身显示在视野的一角，有助于他们持续注意其他玩家，并增强即兴演奏过程中的沟通。

总体而言，访谈显示，尽管参与者起初并未觉得视场受限带来了明显差异，但随着时间推移，他们逐渐意识到这种限制所造成的影响。观察完整场景的能力下降，以及可能出现的沟通中断，都是显著的缺点。参与者希望借助迷你化身等替代性视觉线索，提升自己在视场受限环境中的感知能力和沟通效果。这些见解为协作式增强现实体验的设计与改进提供了宝贵反馈，尤其是在音乐活动的情境中。我们决定构建并测试一个迷你化身系统，因为它与以往研究的做法一致 [7] ，也受到几位受访音乐家的青睐。

B. 既有工作的局限性

在此前的工作中，Weng 等人 [14] 开展了一项实验，用于测试视场的局限性。结果表明，不受视场限制的全息显示器获得了最高的共在感得分、最短的响应时间和最高的任务愉悦度得分。这表明，视场限制会对使用虚拟化身进行音乐协作产生负面影响。此外，带有通知功能的增强现实眼镜可能会提升共同在场感，但也可能降低愉悦度。在后续工作中，Weng 等人 [13] 通过引入“迷你音乐家”改进了通知功能。在本文中，我们将介绍有关系统实现的更多细节，以及用户研究的其他结果。

IV. 研究问题

先前研究的主要见解总结如下：**扩展现实技术改变了传统的音乐互动方式**，使音乐家和观众能够与虚拟物体和环境进行互动。研究人员探索了混合现实技术，将其作为为音乐家营造临场感的一种方式。

在增强现实中，虚拟化身带来的社会临场感对于评估其对音乐协作的影响至关重要。先前研究表明，社会临场感在非对称协作场景中意义重大；在扩展现实通信场景中，人们更偏好三维虚拟化身。

研究涉及多个虚拟化身的音乐活动的机会，考察虚拟化身行为对用户感知的影响，并探索通过增强现实眼镜提供软件通知，以弥补其局限性。

基于这些发现，我们提出以下研究问题：

- RQ1：当虚拟化身音乐家通过非语言方式与玩家沟通（虚拟化身抬头看着玩家）时，无论视场是否受限，玩家能多快注意到该虚拟化身?
- 研究问题 2：在视场受限和不受限的情况下，与虚拟化身互动时的聚合社会临场感得分是多少（通过聚合社会临场感问卷 [28] 得出）？ [13]
- 研究问题 3：视场受限是否会影响任务愉悦度?

V. 研究视场受限的音乐场景中通知的影响

为回答这些研究问题，我们重新设计了之前的试点研究，并使用改进后的系统开展了一项用户研究。

A. 系统设计：*HoloJam* 和迷你音乐家

根据访谈和先前的研究，我们构建了两套扩展现实硬件设置，使演奏者能够与虚拟化身即兴演奏。正如在试点研究中成功实施的那样，第一套系统利用全息图构建，不受限于视场。第二套系统使用运行某应用程序的增强现实眼镜



图 4. (A) 虚拟摄像机视图 (B) 虚拟摄像机设置 黄色线条：受限视场的范围 蓝色线条：更宽的视场范围 (C) 迷你音乐家：增强现实眼镜视图

其视场受限于 52°。使用增强现实眼镜时，我们设置了两种条件：一种包含迷你音乐家（图 1A），另一种不包含任何额外内容（图 1B）。

B. HoloJam

第一种设置是全息即兴演奏（图 1 C），采用了佩珀尔幻象。我们选择这种设置而非屏幕显示，是因为先前研究表明，佩珀尔幻象能带来更具沉浸感的体验，尤其是在音乐表演环境中 [40]–[42]。此外，根据 XR Jam [4] 和 Schlagowski 等人 [16], 的研究，音乐家演奏时往往会四处走动。全息设置具有两项重要优势：它能让用户感受到真实空间，并让现场演奏者与虚拟化身同台表演而不被屏幕遮挡。（例如，站在虚拟化身后面）硬件设置包括一台配备英特尔 10700K 处理器、英伟达 1070 显卡和 32 GB 内存的笔记本电脑。我们将一块透明亚克力板以 45 度角置于屏幕前，用来反射电视画面，形成全息屏幕。这种设置使参与者能够与虚拟化身互动，不受视场受限的影响。

C. 增强现实眼镜

第二种是使用 NReal 增强现实眼镜进行的即兴演奏（图 1 E） [1]。在增强现实眼镜的设置中，我们在增强现实环境里放置了三个虚拟化身。一个位于中间，另外两个虚拟化身则在两侧、超出 52°（视场之外）。

1) 迷你音乐家通知设计：我们使用的通知方式是迷你音乐家。此设计改编自 Mini Me 研究 [7], ，我们针对音乐情境进行了修改，以提升音乐协作中的用户体验。

在我们的虚拟环境设置中，我们实现了第二个虚拟摄像机，其视场比主摄像机更宽（图 4B）。这台第二摄像机位于主摄像机前方的一块二维透明画布上。主摄像机显示主要视图（图 4A），而第二摄像机则提供扩展视图，在用户转动头部环顾四周时，显示主摄像机视场之外的较小物体（此处为虚拟化身）（图 4C）。

这种摄像机设置为增强现实开发者提供了便利。通过加入第二个虚拟摄像机，开发者无需重新设计整套通知方法，就能根据不同情境和内容调整屏幕外通知系统。这种方法确保用户在增强现实视图中保持更广阔的视野，从而提升他们在音乐协作过程中与虚拟元素互动并作出回应的能力。此外，这种方法还能让用户持续留意即时视场之外的虚拟化身，带来更具沉浸感的体验，进而提高增强现实通知的整体效果。

D. 交互与内容设计

1) 参与者的交互设备：在此装置中，我们为参与者提供了两种输入设备。第一种是 MIDI 鼓垫，可通过扬声器播放鼓声。第二种是脚踏板（图 1E 和 1F），它通过三个位置指示虚拟化身的位置；用户踩下踏板十字形响应位置，即可选择哪个虚拟化身跟随自己。

2）XR 内容设计：我们设计了音乐协作场景，让参与者能够与虚拟化身一起演奏乐器。场景内容为一场即兴演奏，由三个演奏不同乐器的动画虚拟形象组成：贝斯、吉他和键盘（图 1D）。这些动画会随背景音乐做出反应。在这两种场景中，虚拟形象模型和若干动画均从 Mixamo 下载 [2]。这些响应式动画由 Unity 游戏引擎中的动画绑定插件控制[3]。

VI. 用户评估

根据先导研究的结果，我们改进了增强现实通知系统，仅加入迷你音乐家，而不使用灯光或符号指示器。此外，我们简化了实验流程，以体现更为周全的设计方法和数据收集机制。

A. 实验设计

为回答我们的研究问题，我们开展了一项实验，比较了增强现实中不同视场情况下与虚拟化身共同演奏时的音乐体验和社会临场感。我们采用 2×3 被试内实验，模拟与三位虚拟化身进行

[1]https://www.nreal.ai/light/

[2]https://www.mixamo.com/ [3] https://unity.com/

即兴演奏。在增强现实条件下，我们设置了两种情境：1）使用迷你音乐家作为视觉通知，在虚拟化身位于视场之外时提示其手势。虚拟化身只有一种手势：从默认的、注视自身乐器的位置抬头看向参与者；2）不提供视觉通知。在全息布置中，我们将三个全息图放置在参与者面前，其视场与增强现实眼镜条件相同。与以往实验一样，全息图条件模拟了与虚拟化身进行即兴演奏，但不受视场限制。我们让参与者演奏 MIDI 鼓，因为相比其他旋律乐器，普通参与者更容易演奏鼓。

B. 参与者

本研究通过邮件列表和口耳相传招募了19名参与者。所有参与者均为大学生，实验在大学校园内的一间研究实验室进行。每位参与者因参加实验获得5美元现金报酬。参与者中有11人正在接受专业音乐训练。训练年限差异很大，从0年到10年以上不等。大多数参与者接受过2至3年的训练。

C. 实验流程

实验确保参与者提供知情同意，并向其说明击鼓任务、设备和数据处理方式。参与者随着音乐同步击鼓，同时辨认注视着自己的虚拟化身（按下踏板按钮）。

实验测试了三种条件：全息图（参与者在关灯的情况下调整自己在3个全息图前的位置），以及两种增强现实眼镜设置（研究人员协助参与者佩戴眼镜并调整环境）。

采用平衡顺序的拉丁方设计，确保每位参与者都以随机顺序体验所有条件（每种条件持续8分钟）。问卷用于评估社会临场感、愉悦度和测试后反馈。整个实验时段平均为45至50分钟。

VII. 结果

我们测量了三个主要定量变量。第一个是反应时间，即参与者注意到虚拟化身正在看着他们所用的时间。第二个是愉悦度，采用 1–7 分李克特量表衡量参与者是否享受这些任务。最后一项定量指标是社交临场感综合得分。最后，我们收集了参与者撰写的至少 150 字的自由文本定性数据[1], [43]。

A. 反应时间

为回答我们的*RQ1*，我们测量了参与者注意到后续虚拟化身时的响应时间。我们收集了每位参与者 10 轮的数据，并在所有轮次结束后计算平均响应时间（毫秒）。为了分析数据，我们对数据进行了重复测量方差分析（RM-ANOVA）。结果显示，三种条件下的平均愉悦度存在显著差异 $F(2, 36) = 4.476$, $p = 0.018$)（图 5 B）。全息图条件下的反应时间显著快于不显示通知的 AR 眼镜条件（η_p^2=0.34）。此外，AR 眼镜搭配迷你音乐家的条件下，反应时间也显著快于不显示通知的条件（η_p^2=0.20）。根据结果，我们可以认为，有限的视场确实会影响用户注意到虚拟化身所需的时间（**RQ1**）。此外，结果还表明，与不显示通知的条件相比，迷你音乐家帮助参与者更快地注意到虚拟化身。

B. 社交临场感综合得分

在此前的研究中，Weng 等人 [13]探讨了研究问题 *2*。研究人员评估了社交临场感综合得分，发现不同条件下所有类别（共同在场感、PMU、PBI）均存在显著差异，其中全息图条件尤为突出。全息图条件的得分始终较高，这表明视场受限会影响音乐协作中的社会临场感。迷你音乐家与无通知之间未发现显著差异。

C. 愉悦度

参与者完成每项任务后，我们都会发放一份任务愉悦度问卷。问卷采用 1 至 7 分的量化评分（1 分为最低，4 分为中性，7 分为最高），用于衡量愉悦度。结果显示，三种条件下的平均反应时间存在显著差异（$F(2, 36) = 13.698$, $p \leq 0.001$）（图 5 A）。全息图条件的愉悦度评分显著高于不含通知的 AR 眼镜条件（$\eta_p^2 \leq 0.01$）和包含迷你音乐家的 AR 眼镜条件（$\eta_p^2 \leq 0.01$）。迷你音乐家条件与无通知条件之间没有显著差异。该结果表明，没有有限视野（FOV）的用户在即兴合奏体验中感受到的愉悦度更高（**研究问题 3**）。

D. 参与者反馈

对参与者针对三种即兴合奏体验——AR 即兴合奏、带迷你音乐家通知的 AR 即兴合奏以及 Holojam——所作自由书写反馈的分析显示，这些体验在视野、沉浸感、舒适度和偏好方面存在显著差异。AR 即兴合奏体验受到窄视场限制，佩戴眼镜也会带来不适。尽管存在这些限制，用户仍觉得 AR 体验具有沉浸感，并欣赏虚拟化身的精细渲染效果。在 AR 即兴合奏中加入通知旨在解决视野问题，但参与者的反馈不一。一些用户认为通知很有帮助，另一些则觉得通知会分散注意力或没有效果。相比之下，HoloJam 提供了最自然、最具沉浸感的体验，拥有更宽广的视场、更好的虚拟化身交互和更高的舒适度。由于更方便、真实，用户更偏好 HoloJam 体验，而非 AR 版本。

在 AR 应用程序中实现通知，旨在改善有限视野，并弥合与全息体验之间的差距。然而，反馈

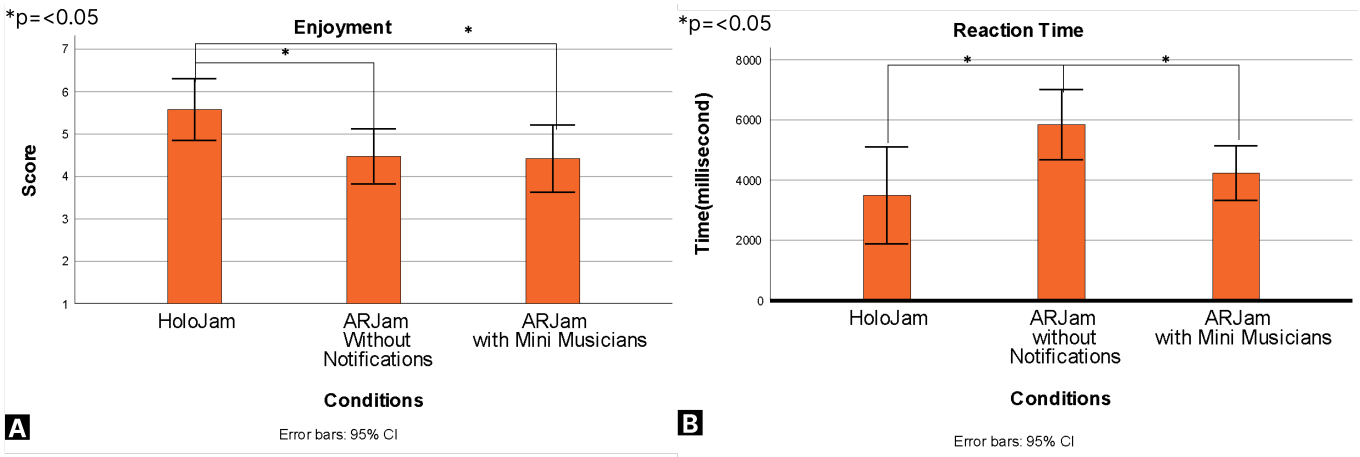

图 5。（A）愉悦度：愉悦度评分（B）反应时间：参与者注意到某个虚拟化身试图进行交流所需的时间

表明，通知并未显著提升整体用户体验。用户认为这些通知令人困惑、分散注意力或缺乏实际效果。一些用户表示，他们会失去对主要虚拟化身的关注，并在主要视野与通知视野之间分散注意力。全息体验在沉浸感、自然感以及同时监控所有虚拟化身的能力方面仍然更胜一筹。尽管通知也具有一些积极作用，例如帮助用户聚焦虚拟化身、提供方向指引并增强感知，但它们仍未能完全弥合 AR 与全息体验之间的差距。

VIII. 讨论

基于我们的研究发现，我们讨论了几个需要进一步探索和深入分析的关键主题，以更好地理解其影响

A. 通过 *holog* 改善音乐协作 *rams*

我们的结果清楚地表明，有限视野（FOV）会显著影响基于虚拟化身的扩展现实体验中的音乐协作质量。我们收集的数据有力地表明，虚拟化身的全息呈现具有显著优势，包括提升愉悦度、增强共同在场感，以及在协作音乐活动中缩短反应时间。结合广泛的实地观察和研究结果，我们可以明显看出，有效沟通对于提升扩展现实环境中的音乐表演发挥着关键作用。与全息虚拟化身进行更流畅、更沉浸式沟通的音乐家，始终表现出更出色的音乐演奏。这一发现凸显了在扩展现实设置中解决沟通难题、优化协作体验的重要性。此外，参与者的反馈与定量数据一致：与虚拟音乐家及其自身实体乐器互动相比，他们表示与全息图互动时更加轻松、舒适。这种感受进一步支持了我们的观点，即

在扩展现实领域，全息图是促进与虚拟化身进行音乐协作的更优选择，在这一特定情境下最终胜过增强现实眼镜。

B. 音乐协作中的增强现实眼镜通知

在先前的研究中，Weng 等人 [14] 对抽象通知进行了实验，具体而言是蓝色光束通知。然而，结果显示，就共同在场感、愉悦度或反应时间而言，抽象通知并未显著影响鼓圈设置。这一结果归因于抽象通知未能提供与虚拟化身相关的信息。随后，我们引入了迷你音乐家这一通知，其通过描绘微型虚拟化身来传达信息；与无通知相比，该通知改善了反应时间。尽管有所改善，但两种通知都未能增强共同在场感和愉悦度。参与者报告称，这些通知造成了干扰和困惑。因此，我们认为，在增强现实眼镜中使用通知进行音乐协作时，仍需进一步改进

C. 探索增强现实眼镜社交线索通知的潜力

在本研究中，我们重点考察了增强现实眼镜上的视场外虚拟化身通知在即兴合奏中的有效性。我们的研究特别关注社交共在感和愉悦度，而非导航、任务警报或增强现实眼镜中的操作说明等功能性设计。视场限制仍然是当前最先进的头戴式扩展现实设备面临的一项挑战。我们如何告知用户视场外虚拟化身希望与他们交流？我们认为，这一特定领域有许多值得探索的研究问题，可用于解决这一问题。

IX. 局限性与未来工作

本研究存在若干局限，我们计划在未来的研究中加以解决，以进一步加深对扩展现实中音乐协作的理解，并拓展其可能性。

A. 使用 *XR* 设备进行音乐协作

未来的研究可以着重探索专为增强现实眼镜设计的社交通知。通过整合针对增强现实眼镜平台量身定制的通知，研究人员可以提升整体用户体验，并探究社交线索对音乐协作的影响。虽然本研究主要关注透视式增强现实眼镜，但目前还有其他采用视频透视技术、视野更广的混合现实（MR）设备。未来研究应考察这些设备的影响，并将其与透视式增强现实眼镜进行比较，以全面了解它们对音乐协作的影响。

B. 智能虚拟形象交互

XR Jam [4] 此前的研究介绍了一种融合人工智能（AI）虚拟形象的音乐协作系统。这种创新方法使 AI 虚拟形象能够参与音乐活动，并对用户的音乐输入作出响应。未来的研究可以深入探讨 AI 虚拟形象与系统交互的潜力，包括研究智能虚拟形象如何动态响应用户的演奏，并提供实时反馈和互动。引入人工智能有望带来更流畅、自然的交互，从而为音乐协作营造更丰富、更具沉浸感的环境。

*C. XR*社交场景探索

我们的研究主要关注即兴合奏体验，但增强现实眼镜还可用于其他场景。未来的研究应拓展范围，探索如何为增强现实眼镜用户可能遇到的日常情境开发通知。这将有助于更全面地了解增强现实眼镜在音乐协作之外的潜在应用和优势。

D. 评估方法

虽然自我报告问卷为了解参与者的主观体验提供了宝贵的信息，但未来研究应考虑纳入更客观的数据。例如，测量参与者的皮肤状况或使用脑电波监测设备，可以为他们在协作音乐体验中的参与度、沉浸感和认知负荷提供更多定量及生理方面的见解。

E. 未来研究

我们希望开展的一项后续研究，是在现场即兴合奏期间进行眼动追踪。高密度眼动追踪有望揭示增强现实交流任务和现场即兴合奏中眼神注视动态的大量信息。比较不同条件下的眼神注视与常规即兴演奏场次中的眼神注视，或许能让我们深入了解增强现实体验中缺少了什么，以及如何更好地克服这些挑战。

此外，访谈结果表明，当视野受遮挡时，演奏者会经历沟通中断，这说明他们会借助视觉交流来识别并纠正演奏中的失误。未来的实验将研究音乐集体纠正的机制。

X. 结论

本研究旨在探讨视野（FOV）对演奏者在音乐任务中感知搭档虚拟化身交流手势的影响。此外，我们还为增强现实眼镜设计了各种通知。我们的系统设置包括创建 HoloJam——一种不受视野限制的全息装置，以及搭载迷你音乐家通知功能的增强现实眼镜应用。通过开展本研究，我们旨在回答研究问题。研究结果表明，在所有测量指标上，HoloJam 的表现均优于其他设置。此外，增强现实眼镜上的迷你音乐家通知有助于缩短反应时间。因此，我们得出结论：在扩展现实（XR）环境中，视野确实会影响与虚拟化身的音乐协作。此外，使用通知有助于用户更快地感知虚拟化身。不过，关于在 XR 中与视野外虚拟形象进行社交互动，仍有很大的探索空间。

致谢

作者谨向 Gregoire Phillips、Alvin Jude、Gunilla Berndtsson、Per-Erik Brodin、Amir Gomroki 和 Per Karlsson 致以谢意，感谢他们在整个项目期间提供的支持与建议。本项目获得了爱立信研究院的资助，以及美国国家科学基金会第 IIS-2040489 号资助。

参考文献

[1] T. Hopkins, S. C. C. Weng, R. Vanukuru, E. A. Wenzel, A. Banic, M. D. Gross 和 E. Y.-L. Do，“增强现实鼓圈：增强现实中的实时协作击鼓”，第 3 卷，2022年。 [在线]。网址：https://www.frontiersin.org/articles/ 10 3389 2022 847284 ./frvir.。[2] https://jamulus.io/。[3] https://www.jacktrip.com/。[4] T. Hopkins, S. C. Chuan Weng, R. Vanukuru, S. Novack, C. Tobin, E. Wenzel, A. Banic, M. Gross 和 E. Y.-L. Do，“XR Jam：在扩展现实中利用人工智能进行音乐联网的设计考量”，载于*2024 IEEE*人工智能与扩展现实及虚拟现实国际会议（*AIxVR*），2024年，第 97–101 页。[5] A. Boem, M. Tomasetti 和 L. Turchet，“协调音乐元宇宙：从专家视角揭示需求、工具与挑战”，2024年5月。[6] C. Trepkowski, D. Eibich, J. Maiero, A. Marquardt, E. Kruijff 和 S. Feiner，“窄视场与信息密度对增强现实中视觉搜索表现的影响”，载于*2019 IEEE*虚拟现实与三维用户界面会议（*VR*）。IEEE，第 575–584 页。 [在线]。网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/8798312/ [7] T. Piumsomboon, G. A. Lee, J. D. Hart, B. Ens, R. W. Lindeman, B. H. Thomas 和 M. Billinghurst，“Mini-me：用于混合现实远程协作的自适应虚拟化身”，载于*2018*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。ACM，第 1–13 页。[在线]。网址：https://dl.acm.org/doi/10.1145/3173574.3173620

[8] U. Gruenefeld, D. Lange, L. Hammer, S. Boll 和 W. Heuten，“FlyingARrow：在增强现实设备上指示视野外物体”，载于第 7 届ACM普适显示国际研讨会论文集。ACM，第 1–6 页。 [在线]。网址：https://dl.acm.org/doi/10 1145 3205873 3205881 . /。U. Gruenefeld, T. C. Stratmann, A. E. Ali, S. Boll 和 W. Heuten，“RadialLight：探索头戴式显示器中用于方向提示的径向外围LED”，载于第 20 届移动设备与服务人机交互国际会议论文集，丛书：MobileHCI ’18。美国纽约：计算机协会，2018年。 [在线]。网址：https://doi.org/10 1145 3229434 3229437 . /。L. Qian, A. Plopski, N. Navab 和 P. Kazanzides，“恢复光学透视头戴式显示器中受遮挡视野的感知”，第 24 卷，第 11 期，第 2936–2946 页。 [在线]。网址：https://ieeexplore.ieee.org/document/8456571/ [11] K. Fan, J. Huber, S. Nanayakkara 和 M. Inami，“SpiderVision：扩展人类视野以增强感知”，载于第 5 届增强人类国际会议论文集。ACM，第 1–8 页。 [在线]。网址：https://dl.acm.org/doi/10 1145 2582051 2582100 . /。Y. S. Pai, R. Hajika, K. Gupta, P. Sasikumar 和 M. Billinghurst，“NeuralDrum：感知扩展现实击鼓中的脑同步性”，载于SIGGRAPH Asia 2020技术通讯。ACM，第 1–4 页。[ ] 10 1145 3410700 3425434 在线。网址：https://dl.acm.org/doi/。/。S. C.-C. Weng, T. Hopkins, S.-Y. Ma, C. Tobin, A. Banic 和 E. Yi- Luen Do，“探究有限视野对扩展现实中即兴合奏体验的影响”，载于2023 IEEE混合与增强现实国际研讨会附属会议（ISMAR-Adjunct），2023年，第 493–495 页。[14] S. C. Weng, T. Hopkins, R. Vanukuru, C. Tobin, A. Banic, D. Leithinger 和 E. Y. Do，“视野如何影响增强现实中音乐任务期间对虚拟化身的感知”，载于2023 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（VRW），2023年，第 633–634 页。[15] L. Turchet, R. Hamilton 和 A. C. amci，“扩展现实中的音乐”，IEEE Access，第 9 卷，第 15 810–15 832 页，2021年。[16] R. Schlagowski, D. Nazarenko, Y. Can, K. Gupta, S. Mertes, M. Billinghurst 和 E. Andr´e，“Wish You Were Here：混合现实中远程音乐协作的心理与生理影响”，载于2023年CHI计算系统中的人为因素会议论文集，丛书：CHI ’23。美国纽约：计算机协会，2023年。 [在线]。网址：https://doi.org/10 1145 3544548 3581162 . /。R. Berry, M. Makino, N. Hikawa 和 M. Suzuki，“增强型作曲家项目：音乐桌”，载于第二届IEEE与ACM混合与增强现实国际研讨会，2003年。会议录，2003年，第 338–339 页。[18] S. Jord`a, G. Geiger, M. Alonso 和 M. Kaltenbrunner，“Reactable：探索现场音乐演奏与桌面式实体界面之间的协同效应”，载于第 1 届实体与嵌入式交互国际会议论文集，丛书：TEI ’07。美国纽约：计算机协会，2007年，第 139–146 页。[ ] 10 1145 1226969 1226998 在线。网址：https://doi.org/。/。T. Hopkins, S. S. Bae, J. Uhr, C. Zheng, A. Banic 和 E. Y.-L. Do，“智慧城市中的用户界面”，载于《智慧城市手册》。Springer，2021年，第 687–719 页。[20] N. Bryan-Kinns，“Daisyphone：一种用于远程团体音乐即兴创作的新型环境的设计与影响”，载于第 5 届交互系统设计会议：流程、实践、方法与技术论文集，丛书：DIS ’04。美国纽约：计算机协会，2004年，第 135–144 页。 [ ] 10 1145 1013115 1013135 在线。网址：https://doi.org/。/。L. Men 和 N. Bryan-Kinns，“Lemo：探索用于协作式创造力的虚拟空间”，载于2019年创造力与认知会议论文集，丛书：C&C ’19。美国纽约：计算机协会，2019年，第 71–82 页。 [在线]。网址：https://doi.org/10 1145 3325480 3325495 . /。p. cairns, a. hunt, d. johnston, j. cooper, b. lee, h. daffern 和 g. kearney，“在BBC Maida Vale录音室评估元宇宙音乐演出”，《音频工程学会期刊》，第 71 卷，第 6 期，第 313–325 页，2023 年 6 月。[23] E. Costanza, S. A. Inverso, E. Pavlov, R. Allen 和 P. Maes，“Eye-q：用于低调私密通知的眼镜式外围显示器”，载于《第八届移动设备与服务人机交互会议论文集》，丛书：MobileHCI ’06。美国纽约：计算机协会，2006年，第211–218页。[ ] 10 1145 1152215 1152261 在线。获取地址：https://doi.org/。/。S. Matsuzoe、S. Jiang、M. Ueki 和 K. Okabayashi，“受周边视觉运动感知启发的屏幕外物体定位直观可视化方法”，载于《第八届增强人类国际会议论文集》，丛书：AH ’17。美国纽约：计算机协会，2017年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3041164 3041198 。/。L. Plabst、S. Oberdorfer、F. R. Ortega 和 F. Niebling，“按下红色按钮：比较增强现实与非增强现实任务中的通知位置”，载于《2022年ACM空间用户交互研讨会论文集》，丛书：SUI ’22。美国纽约：计算机协会，2022年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3565970 3567701 。/。I. Chaturvedi、F. H. Bijarbooneh、T. Braud 和 P. Hui，“周边视觉：智能眼镜的新杀手级应用”，载于《第二十四届智能用户界面国际会议论文集》，丛书：IUI ’19。美国纽约：计算机协会，2019年，第625 636 [ ] 10 1145 3301275 3302263 –页。在线。获取地址：https://doi.org/。/。R. Rzayev、S. Korbely、M. Maul、A. Schark、V. Schwind 和 N. Henze，“社交互动期间通知的位置与对齐方式对增强现实眼镜的影响”，载于《第十一届北欧人机交互会议：塑造体验，塑造社会论文集》，丛书：NordiCHI ’20。美国纽约：计算机协会，2020年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3419249 3420095 。/。F. Biocca 和 C. Harms，“定义和测量社会临场感：对网络化心智理论与测量的贡献”，《PRESENCE论文集》，第2002卷，第7–36页，2002年。[29] D. G¨orlich，“社会扩展现实——愿景论文”，《ParadigmPlus》，第3卷，第2期，第1–10页，2022年。[30] J. Hwang、G. JounghyunKim 和 H. Kim，“在分布式虚拟音乐环境中融入共同在场感”，第6页。[31] N. Osmers、M. Prilla、O. Blunk、G. George Brown、M. Janßen 和 N. Kahrl，“社会临场感在头戴式设备增强现实合作中的作用：文献综述”，载于《2021年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》，丛书：CHI ’21。美国纽约：计算机协会，2021 [ ] 10 1145 3411764 3445633 。在线。获取地址：https://doi.org/。/。J. D. Hart、T. Piumsomboon、G. A. Lee、R. T. Smith 和 M. Billinghurst，“操控虚拟化身以增强扩展现实中的沟通”，载于《2021年IEEE智能现实国际会议（ICIR）》，2021年5月，第9–16页。[33] M. Kurzweg 和 K. Wolf，“虚拟现实会议中虚拟化身的肢体语言作为沟通状态线索：交互设计与实现建议”，《i-com》，第21卷，第1期，第175–201页，2022年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1515 2021 0038 。/icom- - H. Bai、P. Sasikumar、J. Yang 和 M. Billinghurst，“一项关于结合眼动与手势共享的混合现实远程协作的用户研究”，载于《2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》，丛书：CHI ’20。美国纽约：计算机协会，2020年，第1–13页。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3313831 3376550 。/。S. Kimmel、F. Jung、A. Matviienko、W. Heuten 和 S. Boll，“面对现实：面部表情对协作式虚拟现实中社会临场感的影响”，载于《2023年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》，丛书：CHI ’23。美国纽约：计算机协会，2023年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3544548 3580707 。/。S. Greenwald、Z. Wang、M. Funk 和 P. Maes，“研究房间尺度虚拟现实中具身虚拟化身的社会临场感与沟通”，2017年6月，第75–90页。[37] J. Blattgerste、B. Strenge、P. Renner、T. Pfeiffer 和 K. Essig，“比较用于手动装配任务的传统指导说明与增强现实指导说明”，载于《第十届辅助环境相关普适技术国际会议论文集》，丛书：PETRA ’17。美国纽约：计算机协会，2017年，第75 82 [ ] 10 1145 3056540 3056547 –页。在线。获取地址：https://doi.org/。/。Y. Shin 和 G. J. Kim，“利用虚拟现实技术，在视场角受限且较小的增强现实显示器上，高效探索和交互大型复杂增强现实空间”，载于《第二十八届ACM虚拟现实软件与技术研讨会论文集》，丛书：VRST ’22。纽约

美国纽约：计算机协会，2022年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3562939 3565613 。/。“Datavyu”，[39] https://datavyu.org，访问日期：2023年6月12日。[40] M. Trajkova、M. Deshpande、A. Knowlton、C. Monden、D. Long 和 B. Magerko，“人工智能遇上全息胡椒鬼影：协同创作式公共舞蹈体验”，载于*2023*年*ACM*交互系统设计大会伴随出版物，丛书：DIS ’23 Companion。美国纽约：计算机协会，2023年，第 274 278 [ ] 10 1145 3563703 3596658 –页。[41] 在线。获取地址：https://doi.org/。/。S. Lee、D. Kim 和 J. Lee，“观看形式与歌曲类型对虚拟化身演唱会观众体验的影响”，载于第*31*届*ACM*国际多媒体会议论文集，丛书：MM ’23。美国纽约：计算机协会，2023年，第6978–6988页。 [在线]。获取地址：https://doi.org/ 10 1145 3581783 3612094 。/。[42] M. Hamanaka，“旋律老虎机：可控全息虚拟表演者”，载于第*27*届*ACM*国际多媒体会议论文集，丛书：MM ’19。美国纽约：计算机协会，2019年，第2468–2477页。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10 1145 3343031 3350863 。/。M. Slater、C. Cabriera、G. Senel、D. Banakou、A. Beacco、R. Oliva 和 J. Gallego，“虚拟摇滚音乐会的情感氛围”，虚拟现实，第27卷，第2期，第651–675页，2023年6月。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10.1007/s10055-022-00685-9[43]