面向自闭症儿童的沉浸式虚拟现实与增强现实联合注意力训练平台的开发

Ashirbad Samantaray, Taranjit Kaur, Sapna S Mishra, Kritika Lohia, Chayan Majumder, Sheffali Gulati, Tapan Kumar Gandhi

arXiv:2512.15263v1 [cs.HC] 17 Dec 2025

摘要—共同注意（JA）是一项对于形成共同关注至关重要的社交技能，但自闭症谱系障碍（ASD）儿童常在这方面存在障碍，进而影响社交沟通，也凸显了早期干预的必要性。针对既往研究中的不足，例如沉浸式技术应用有限以及依赖易使人分心的外围设备，我们开发了一种采用增强现实（AR）和虚拟现实（VR）设备的新型共同注意训练平台。该平台整合了基于眼动注视的交互，以确保参与者能够专注于任务。为验证该平台，我们在一位受训儿科神经科医生的监督下，对ASD（N=19）和神经典型（NT）（N=13）参与者开展了实验。定量分析采用了若干关键指标，包括正确反应次数、建立眼神接触的时长（s）以及记录反应的时长（s），并分析这些指标与CARS评分和年龄之间的相关性。基于AR的实验结果显示，NT参与者记录反应的速度显著快于ASD参与者（$p<0.00001$）。ASD参与者的响应时间与CARS评分之间存在相关性（斯皮尔曼系数=0.57，$p=0.03$）。基于VR的实验也观察到类似趋势。比较ASD参与者在不同平台上的反应准确率时，AR的正确率（92.30%）高于VR（69.49%），表明AR更为有效。这些发现表明，沉浸式技术有助于ASD人群的共同注意训练。未来研究应探讨其长期益处及现实世界适用性。

索引词—共同注意、自闭症、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）。

I. 引言

自闭症谱系障碍（ASD）是一种神经发育状况，其特征是非典型的发育轨迹以及受限及重复行为 [1]。该障碍通常在儿童早期被识别，最常见于一岁至以及三岁 [2]。近期全球估计显示，自闭症谱系障碍影响约每36名儿童中的1名 [3]。在印度，Arora等人的一项基于人群的研究报告称，在2至6岁儿童中，患病率高达1/125；在6至9岁儿童中，高达1/80；所调查地区的总体患病率为1/89 [4]。自闭症谱系障碍会显著影响情绪和认知功能，从而限制社交沟通和发育进展 [5]。该障碍的早期表现通常包括言语和语言习得异常 [6],参与重复行为 [7], 对社会线索的反应减弱 [8], 注视模式异常 [9], 以及在建立共同注意方面存在明显困难 [10,11]。

共同注意（JA）是指两名或多名个体将注意力集中在某个物体或人身上的能力[12]。这一共享的注意过程在语言习得和社会学习的早期阶段发挥着关键作用[13], ，因为它使个体能够理解周围环境，并推断他人的心理状态。既往研究一致表明，共同注意是语言技能发展的重要先决条件 [14]–[16]。值得注意的是，婴儿期共同注意能力受损与自闭症发生可能性增加密切相关 [10,11]。此外，多项研究证据表明，婴儿的共同注意能力与其整体信息处理能力密切相关[17]–[20]。Mundy等人 [11] 进一步指出，婴儿成功引导他人将注意力转向某一事件或物体的程度，可能是自闭症严重程度的一个指标。

与神经典型（NT）同龄人相比，被诊断为自闭症谱系障碍（ASD）的《儿童》在共同注意技能的发展和习得方面通常存在延迟 [21]。这种延迟可能表现为难以通过指向手指或转移眼动注视等动作发起共同注意，也可能表现为难以回应父母、监护人或照护者提供的共同注意线索 [22]。然而，先前的研究表明，早期干预有助于自闭症谱系障碍患者提升沟通技能 [13,23]。如果缺乏此类康复措施，患者可能长期面临建立社会关系和进行有效沟通的困难。不过，必须认识到，联合注意力干预的效果因人而异。这种差异受多种因素影响，包括社会条件作用和个体发展的阶段 [24]。

鉴于这些挑战，对早期

本研究得到印度卫生与家庭福利部、印度政府的支持。（Ashirbad Samantaray 和 Taranjit Kaur 对本研究贡献相同。）（通信作者：Sheffali Gulati；Tapan Kumar Gandhi。）

本研究涉及人类受试者。所有伦理和实验程序及方案均经全印度医学科学研究所新德里分校伦理委员会批准，申请编号为 EC-178/06.04.2018 和 OP-12/13.01.2023。

Ashirbad Samantaray、Sapna S Mishra、Kritika Lohia、Chayan Majumder 和 Tapan Kumar Gandhi 隶属于印度理工学院德里分校电气工程系，地址为印度新德里（电子邮箱：saman- taray.ashirbad@gmail.com；eez208443@iitd.ac.in；kritika.lohia@ee.iitd.ac.in；chinsi@gmail.com；tapan.kumar.gandhi@ee.iitd.ac.in）。

Taranjit Kaur 任职于印度拉贾斯坦邦焦特布尔印度理工学院人工智能与数据科学学院（电子邮箱：taranjit@iitj.ac.in）。

Sheffali Gulati任职于印度新德里全印度医学科学研究所德里分院儿科（电子邮箱：sheffaligulati@gmail.com）。

干预以及针对孤独症谱系障碍儿童的共同注意技能训练的需求日益增长。多年来，人们开发了多种干预方法，以支持儿童早期习得共同注意技能，涵盖传统的临床人员或照护者主导的方法，以及技术辅助策略 [25]–[28]。随着计算能力的迅速提升，虚拟现实（VR）和增强现实（AR）等沉浸式形式正日益成为共同注意训练的创新平台，并受到广泛研究。尤其是，这些干预大多以行为学原理为基础 [29], , 特别是源自应用行为分析（ ABA ）的原理；这些原理为系统地塑造和强化共同注意行为提供了理论和实证基础。

基于ABA的方法通过加强并重复线索来促使目标反应，同时减少不期望的行为 [30,31]。离散试验训练（DTT） [32],是一种广泛采用的源自ABA的技术，通过正向强化来巩固目标行为，并通过反馈和任务介导提示来纠正错误 [33]。这类行为训练范式构成了现有各类共同注意训练项目的基础 [34][35]。

传统上，共同注意训练通过面对面干预开展，由受过培训的专业人员直接与儿童互动，借助实体物体引发并强化共同注意行为 [12,36,37]。尽管这种方法有效，但它耗费大量资源，需要专业人员投入大量时间和精力，而且难以确保干预的一致性，尤其是在提供线索的时机和方式方面。随着数字技术的发展，以技术为媒介的共同注意干预在开发和应用方面显著增加。这些方法通常采用带有虚拟化身的虚拟环境来提供标准化的共同注意线索 [38,39]。虚拟平台具有显著优势：可以一致地重复训练练习，确保线索精准传递，并减少对人力资源的依赖，从而比传统干预更有效率。尽管取得了这些进展，沉浸式技术在孤独症谱系障碍儿童共同注意训练中的应用仍存在明显不足 [40]。以往研究 [38,39] 大多依赖基于屏幕的范式，眼动追踪功能的集成有限。此外，针对虚拟现实（VR）和增强现实（AR）等沉浸式平台开展的系统性比较仍然少见，这表明还需要进一步研究。

本文介绍了一种创新的沉浸式共同注意训练平台，该平台采用虚拟化身作为任务协调者，并兼容配备集成式眼动追踪器的VR和AR头戴设备。该平台经过独特设计，仅依靠参与者的眼动注视进行交互，从而能够通过头戴式显示器（HMD）精确、实时地捕捉基于注视的行为。这一功能使应用程序能够在训练环节中准确记录和评估任务表现。本研究是我们在沉浸式虚拟现实和增强现实环境中开发并验证该平台工作的最终成果。总体而言，本研究旨在展示这一技术驱动方法提升共同注意技能训练的潜力。具体而言，我们评估了该系统在自闭症谱系障碍个体中的可行性和接受度，以及其支持共同注意技能习得的有效性。

II. 相关研究

近年来，许多研究 [27,36,37,41,42] 探索了利用机器人、虚拟化身和人工介导的交互，帮助孤独症谱系障碍儿童发展共同注意的方法。虚拟现实和增强现实等沉浸式技术推动了自闭症照护的发展 [43], , 借助头戴式显示器（HMDs）提供逼真、经济且引人入胜的 3D 环境 [44]。更强的沉浸感能够促进学习并支持技能训练；已有研究表明，ASD 患者对基于头戴式显示器的康复方式接受度很高 [45,46]。这些平台为各种康复项目提供了可控的数字环境 [47,48]。

在共同注意训练方面，Billing 等人 [49] 分析了机器人辅助治疗（RAT）过程中的行为和生理反应[50,51], , 并报告了积极效果。Caruana 等人 [52], 、Jyoti 等人 [39,53]–[56], 以及 Little 等人 [42] 使用基于屏幕的眼动追踪，其他研究则在虚拟现实中采用了虚拟化身。Ravindran 等人 [29] 开发了一种低成本的手机虚拟现实方案；Amaral 等人 [57] 将脑电图与沉浸式虚拟现实相结合；Mei 等人 [58]研究了高功能自闭症谱系障碍参与者；Perez-Fuster 等人 [59] 则使用增强现实，结果表明，针对性的增强现实干预能够改善共同注意。

Yazdanian 等人进行的系统综述 [60] 指出，沉浸式虚拟现实/增强现实在共同注意训练中的应用有限，具备实时眼动追踪功能的系统也很少，并探讨了此类方法的潜力与接受度。据我们所知，这是首个基于增强现实、由虚拟化身介导并整合眼动追踪以支持参与者交互的共同注意训练平台。

III. 材料与方法

本研究采用两种不同的沉浸式硬件配置来评估所提出的共同注意训练应用。每种配置均由一台集成眼动追踪器的头戴式显示器（HMD）组成，使参与者能够仅通过基于注视的输入进行交互。第一种配置采用 FOVE 0 虚拟现实头显，第二种配置则采用 Microsoft HoloLens 2 增强现实头戴式设备。以下各节将详细介绍两种配置所用硬件和软件组件的规格。

A. 虚拟现实设置（*FOVE 0*头戴设备）

基于虚拟现实的共同注意训练平台的实验设备包括一台 FOVE 0 虚拟现实头显和一台由实验人员操作的 Dell Alienware m15-r3 游戏笔记本电脑。FOVE 0头戴设备由 Fove Inc. 开发，配备分辨率为 2560× 1440 像素的显示屏、100° 视场角和六自由度追踪系统。该设备以稳定的每秒 70 帧进行渲染，并内置双目红外眼动追踪器，使参与者能够实时与共同注意应用程序交互。实验人员的笔记本电脑配备 15.6 英寸全高清显示屏，并配置为运行虚拟现实应用程序。该电脑搭载 Intel Core i7-10750H 处理器、16 GB DDR4 266 MHz 内存，以及配备 8 GB GDDR6 内存的 Nvidia GeForce RTX 2070 显卡，

为共同注意应用程序的流畅运行提供必要的计算资源。笔记本电脑运行 Windows 10 专业版，并启动训练应用程序；该应用程序通过有线连接在虚拟现实头戴式设备上呈现。



图 1：参与者佩戴 FOVE 0 虚拟现实头显进行共同注意训练。

B. 增强现实设置（*HoloLens 2* 头显）

增强现实设置包括一台 HoloLens 2 头显和一台笔记本电脑（供实验人员使用）。共同注意训练应用程序安装在增强现实头戴式设备上，并直接在设备上运行。该头显由微软公司开发，配备了 2K 分辨率显示屏，可提供高品质的视觉体验。此外，它还配备了一个 100 万像素的飞行时间传感器，以提升空间感知能力和精确度。该头显配备了一台 800 万像素摄像头、加速度计、陀螺仪和磁力计，可用于监测 6 个自由度并实现空间映射。HoloLens 2 由高通骁龙 850 处理器和定制的全息处理单元驱动。它配备了 4GB LPDDR4x 系统动态随机存取存储器和 64GB UFS 2.1 存储空间。此外，它还配有内置麦克风和扬声器。通过 Wi-Fi 5、蓝牙 5 和 USB Type-C 连接选项，可实现灵活的通信和数据传输。该头显使用四个可见光相机传感器进行头部追踪，并使用两个红外相机传感器进行精准的眼动追踪。在此设置中，实验人员使用了与虚拟现实配置中相同的笔记本电脑。

C. 软件

共同注意训练应用程序采用 Unity 3D 游戏引擎（ v2021.3.12f1） [61], 开发，以 C# 作为主要编程语言。通过 FOVE [62]和混合现实工具包（MRTK） [63]软件开发工具包，实现与虚拟现实和增强现实设备的交互。刺激环境中包含一个作为任务协调者的虚拟化身，向场景中的三维物体发出提示。该虚拟化身使用 Ready Player Me 平台 [64] 创建，并在 Blender[65]中进行优化。手指指向和转头提示的动画通过 Mixamo [66] 生成，并在 Unity 中使用动画绑定软件包 [67]进一步调整。最终的任务



图 2：参与者佩戴 HoloLens 2 增强现实头戴式设备进行共同注意训练

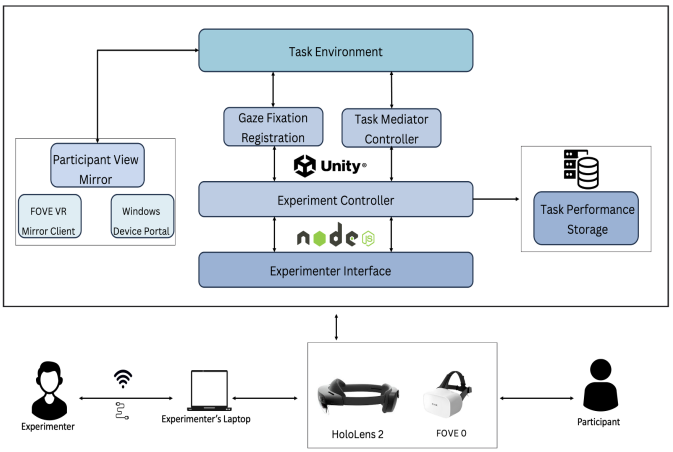


图 3：共同注意训练平台的系统设计概览。使用 Unity 设计的任务环境提供共同注意练习，并包含注视点注册和任务协调模块。使用 Node.js 开发的实验控制器负责协调实验者界面之间的数据流。它会记录任务表现，并同步显示参与者的视角以供监控。硬件组件包括实验者的笔记本电脑、Microsoft HoloLens 2 增强现实设备和 FOVE 0 虚拟现实设备。

环境包含从 Unity 资源商店 [68]获取的七个三维物体。

共同注意力训练应用程序由分别用于虚拟现实和增强现实设置的独立模块组成。不过，需要注意的是，大多数模块在两种设置中通用。共同注意任务环境负责将开发的刺激物渲染到虚拟现实和增强现实头戴式设备中，包括虚拟化身和三维模型的放置与定位。该模块经过配置，可与两种头戴式设备兼容。

该任务中介控制器 负责管理虚拟化身的提示呈现动画。我们采用波斯纳式线索范式 [69]，观察自闭症儿童在接收到不同类型的提示后视觉注意的转移。该模块会随机选择两个三维物体，并将它们放置在虚拟化身的两侧。此外，它还会随机选择

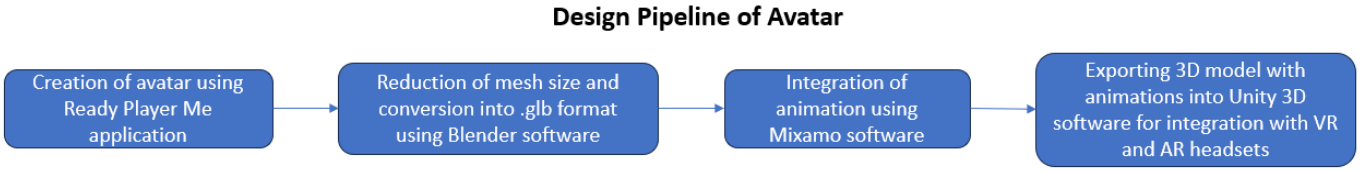


图 4：在我们的共同注意应用程序中，将虚拟化身设计并开发为任务协调者的流程管线

一个物体作为目标，并根据实验设置控制虚拟化身执行动画。

注视点注册 负责追踪参与者的注视，并实时管理其与我们的共同注意训练应用程序之间的交互。该模块通过访问 FOVE 0 和 HoloLens 2 头戴式设备的眼动追踪器来实现这一功能。实验者界面 负责向共同注意训练应用程序提供实验参数。实验者在每个实验环节开始时输入参数，并在环节结束时通过用户界面提供反馈。

参与者视图镜像 使实验者能够在参与者与我们的共同注意训练应用程序交互时，实时观察参与者所看到的内容。对于虚拟现实设置，可通过 *FOVEVR Mirror Client* 软件实现，并通过有线连接将实验者的计算机与虚拟现实头戴式设备相连。对于增强现实设置，则通过*Windows* 设备门户 实现，并通过无线连接将实验者的计算机与增强现实头戴式设备相连。

The任务表现存储模块 负责记录参与者的任务表现指标。该模块在增强现实设置中的实验人员计算机上运行，而应用程序的其余部分则独立运行于 HoloLens 2 增强现实头戴式设备上。实验人员的计算机上配置了一台中间件服务器，用于与增强现实头戴式设备建立通信；该服务器基于 Node.js 框架开发。为获取参与者的表现数据，服务器会向运行在增强现实头戴式设备上的共同注意应用程序的 API 端点发送 HTTP 网络请求。收到数据后，服务器会对其进行解析，并以 JSON 格式存储，以供后续分析。

最后，实验控制器 负责协调各个模块之间的交互。该模块会主动监控用户活动，并相应地将信息传递给相关模块。它负责评估参与者响应的正确性，这是评价联合注意力训练练习效果的一项基本指标。它还会核实参与者响应的时间和时长，并将这些信息发送到任务表现存储模块进行记录。该模块还会监控参与者长时间处于不活动状态的情况；一旦发现此类情况，便会终止实验环节。

IV. 实验设计

A. 实验方案

我们开展了一项可行性研究，以评估基于虚拟现实和增强现实的共同注意训练平台对自闭症谱系障碍参与者的有效性。为评估这些应用程序的可接受性，我们比较自闭症谱系障碍参与者与年龄匹配的神经典型（NT）对照组之间，以及不同虚拟现实和增强现实配置下的任务表现指标。所有参与者此前均未使用过虚拟现实或增强现实设备。每位参与者首先由一名受过培训的儿科心理学家进行评估，该心理学家使用标准化评估量表将其归入自闭症谱系障碍组或神经典型组。评估结束后，参与者会舒适地坐在光线充足的房间内，并被告知如果感到不适，可随时退出。参与者确认准备就绪后，实验人员便为其佩戴虚拟现实或增强现实头戴式设备。

随后，实验人员会在两种设置中为应用程序配置相同的固定实验参数：(a) 判定眼神接触所需的对虚拟化身的最短注视时长（2 秒）；(b) 判定作出响应所需的对目标物体的最短注视时长（2 秒）；(c) 虚拟化身提示传递动画的持续时间（5 秒）；以及 (d) 每个实验环节的试次数（2）。开始任务前，参与者会观看一段视频演示，并听取对其预期任务的口头说明。

为减轻虚拟现实诱发的不适，每个实验环节的总时长控制在 20 分钟以内。先进行基于虚拟现实的实验，再进行基于增强现实的研究，参与者在两种配置下完成相同的任务。此外，应用程序还设有自动功能：若连续 20 分钟未检测到参与者活动，便会终止实验环节。

B. 任务描述

实验环节开始时，首先校准眼动追踪系统，以准确测量参与者的视线注视。此步骤使用 FOVE 和 HoloLens 2 头显内置的校准功能完成。随后，联合注意力训练应用程序向参与者呈现刺激物，画面中央放置一个虚拟化身，两侧各有一个物体。首先，参与者需要按照实验设置规定的最短时长，注视虚拟化身的眼部区域。

如图 5 和图 6 所示，与虚拟化身建立眼神接触后，应用程序随后会启动一系列视觉线索和动画，引导参与者将注意力转向指定的目标物体。这些线索以转头动作为起始，随后是用手指指向目标的手势。

提示发出后，参与者需要注视某个物体 2 秒，以记录其反应。应用程序会根据反应的正确性提供视觉反馈。

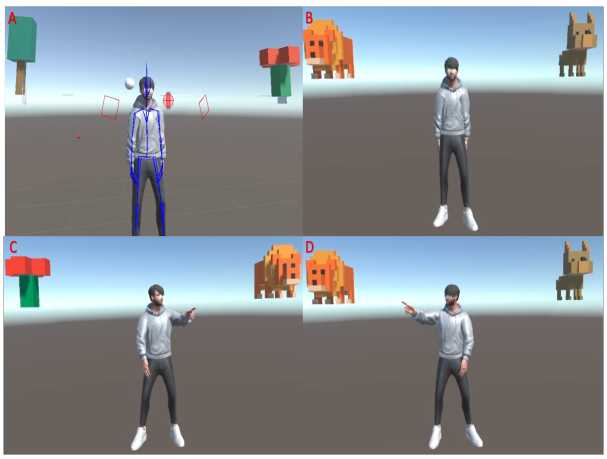


图 5：虚拟现实平台中虚拟化身的提示传递序列 (A) Unity 编辑器中的虚拟现实环境概览 (B) 等待建立眼神接触 (C) 虚拟化身向右侧和左侧发出手指指向提示 (D)

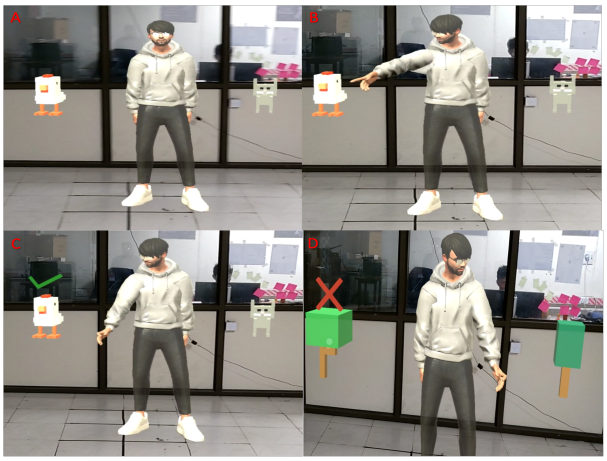


图 6：增强现实平台中虚拟化身的提示传递序列 (A) 等待建立眼神接触 (B) 发出提示并等待用户在目标物体上作出反应 (C) 对参与者正确识别目标物体给予反馈 (D) 对参与者未能正确识别目标物体给予反馈

C. 参与者

我们的研究共招募了 29 名参与者（ASD=16 和 NT =13）。参与者的年龄范围为 6 至 13 岁（ASD：均值=9. 46，标准差=2.27；NT：均值=9.99，标准差=2.32）。志愿者招募自印度全印医学科学研究所（德里）儿科儿童神经科自闭症诊所。我们将诊断为轻度至中度高功能自闭症且智商（IQ）高于 80 的参与者（高功能 ASD）纳入研究，而患有其他相关神经系统疾病／状况／共病的参与者则予以排除。起初，我们招募了 19 名此前已被诊断为 ASD 的 ASD 参与者，但经儿科神经科医生和儿童心理学家重新评估后，发现其中 3 人处于缓解期，因此被排除在研究之外。

表 I：参与者临床特征

参与者	自闭症谱系障碍 (n=16) Mean	神经典型 (n =13) Mean
Age	9.46 ± 2.27	9.99 ± 2.32
CARS评分[1]	32.03 ± 2.87	9.23 ± 5.58
SCQ得分[2]	32.86 ± 7.83	11 ± 3.65
SRS 2[3]	66.73 ± 2.63	18.46 ± 8.72

[1]自闭症谱系障碍范围=28-33.5, [2]自闭症谱系障碍范围=15+, [3]自闭症谱系障碍范围 =60

-75

研究期间，所有参与者均由持证心理学家使用标准化自闭症评定量表进行评估。研究采用《精神障碍诊断与统计手册》第五版（DSM-5） [70]来界定自闭症谱系障碍（ASD）。神经典型参与者是指没有已知神经系统疾病、发育典型且不存在行为问题的儿童。此外，研究使用《儿童孤独症评定量表高功能版》第二版（CARS-2） [71] 来测量每位参与者的自闭症严重程度。此外，还采用社会沟通问卷终生版（SCQ终生版） [72] 和《社会反应量表》第二版（SRS-2） [73]来评估每位参与者的社交和行为水平。进行实验前，已取得参与者父母签署的同意书。

V. 结果

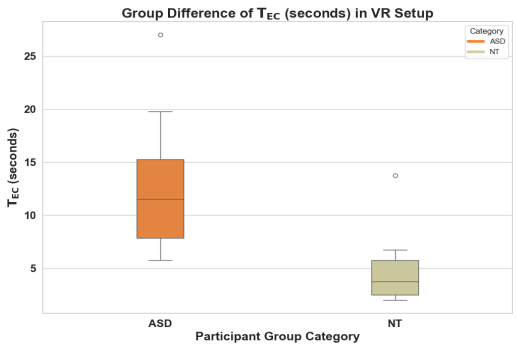


图 7：比较自闭症谱系障碍（ASD）与神经典型参与者建立眼神接触所需时间（T_{EC}）（ASD=11.5 秒，NT=3.75 秒）（z=4.37，p=0.00007），虚拟现实设置

我们使用特定的任务表现指标，比较并衡量参与者在虚拟现实和增强现实设置下与我们的共同注意力训练平台进行交互的情况。这些指标包括：(a) 参与者回答的正确性（C_{PR}），(b) 参与者与虚拟化身建立眼神接触所用的时间（T_{EC}），以及 (c) 参与者在提示呈现后作出响应所用的时间（T_{RR}）。首先，我们分析参与者在任务表现上的组间差异。我们采用非参数曼-惠特尼U检验 [74]，分析参与者组之间任务表现指标的关系。该单尾统计检验的显著性水平设为 0.05。

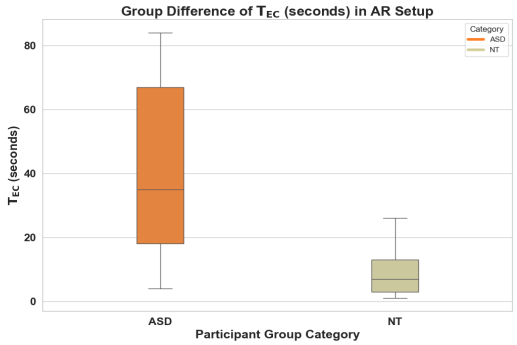


图 8：增强现实设置中自闭症谱系障碍与神经典型参与者建立眼神接触所需时间（T_{EC}）的比较（自闭症谱系障碍=35s，神经典型=7s）（z =3.25，p= 0.00056）

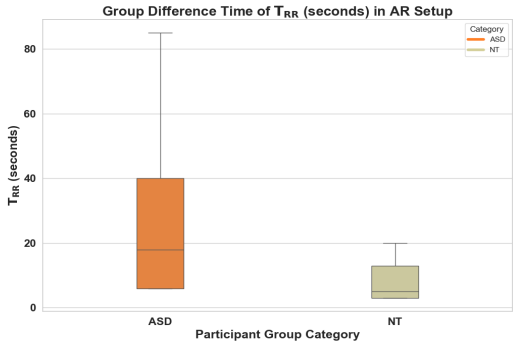


图 10：增强现实设置中自闭症谱系障碍与神经典型参与者响应登记时长（T_{RR}）的比较（自闭症谱系障碍=18s，神经典型=5s）（z=2.69，p=0.00357）

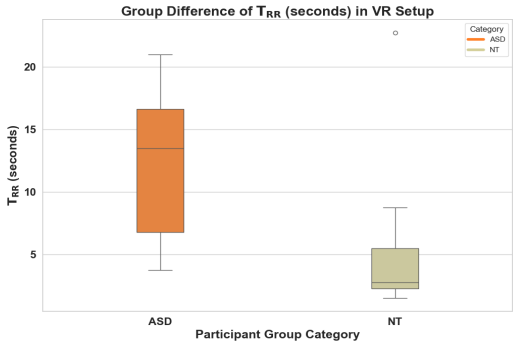


图 9：虚拟现实设置中自闭症谱系障碍与神经典型参与者响应登记时长（T_{RR}）的比较（自闭症谱系障碍=13.5s，神经典型=2.75s）（z=4.10，p=0.00074）

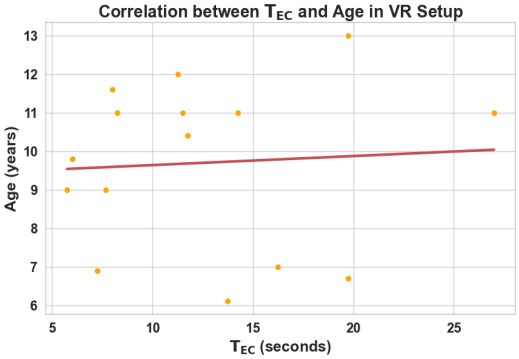


图11：在虚拟现实设置中，ASD 参与者建立眼神接触所需时长（T_{EC}）与年龄的相关性（rs=0.11，p=0.67）

A. 任务表现指标的组间统计差异

从表 III 以及图 7 和图 8 可以看出，神经典型参与者的 T_{EC}（虚拟现实：中位数=3.75s；增强现实：中位数=7s）显著短于自闭症谱系障碍参与者（虚拟现实：p=0.00007；增强现实：p=0.00056；虚拟现实：中位数=11.5s；增强现实：中位数=35s）。同样，从表 III 以及图 9 和图 10 可以看出，神经典型参与者的 T_{RR} （虚拟现实：中位数=2.75s；增强现实：中位数=5s）显著短于自闭症谱系障碍参与者（虚拟现实：p=0.00074；增强现实：p=0.00357；虚拟现实：中位数=13.5s；增强现实：中位数=18s）。

在共同注意训练期间，自闭症谱系障碍个体表现出的较高 T_{RR} 可能是由于他们倾向于避免眼神接触，从而导致响应登记时长延长。对视觉线索反应延迟，可能是因为难以理解线索的情境及其相关性，而非难以处理该线索。

B. 任务表现指标与参与者特征之间的相关性分析

此外，我们进行了相关性分析，以考察任务表现指标（T_{RR}和 T_{EC}）与参与者特征（年龄和 CARS评分）之间的关系。CARS评分是自闭症严重程度的指标，因为它反映了个体社交沟通技能的下降。我们采用非参数斯皮尔曼等级相关系数 [75] 来确定这些参数之间的相关性。分析结果表明，ASD 参与者的 T_{EC} 和 T_{RR} 与其 CARS评分之间不存在显著相关性。

从统计结果来看，如图13和图14所示，虚拟现实和增强现实中，T_{EC} 与CARS评分的p值分别为0.07840和0.76021。类似地，如图17所示，虚拟现实设置中T_{RR} 与CARS评分的p值为0.77510。对于增强现实设置，如图18所示，p值为0.03811。与此相反，在上述统计比较中，我们发现大多数情况下不存在相关性，这可能是因为研究所纳入参与者的CARS评分范围有限。我们仅在一种情况下发现正相关，这可能是由于参与者的响应时间随CARS评分升高而增加。

此外，从图 11 和 12 中，我们还观察到 T_{EC} 与年龄之间不存在统计学显著相关性（虚拟现实：p=0.67236；增强现实：p=0.60385）。同样，从图 15 和 16 中，我们观察到 ASD 参与者的 T_{RR} 与其年龄值之间的相关性（虚拟现实：p=0.38188；增强现实：p=0.57987）。我们认为，这可能是由于参与研究的参与者年龄范围有限。

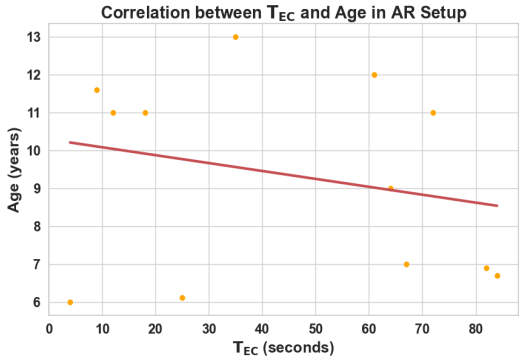


图 12：增强现实设置中 ASD 参与者建立眼神接触的时长（T_{EC}）与年龄的相关性（rs=-0.15，p=0.60）

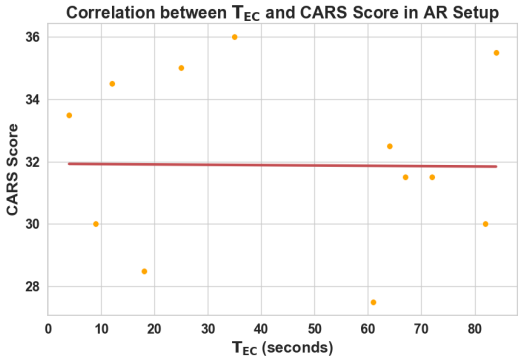


图14：增强现实设置中，ASD参与者建立眼神接触所需时间（T_{EC}）与CARS评分之间的相关性（rs=0.09，p=0.76）

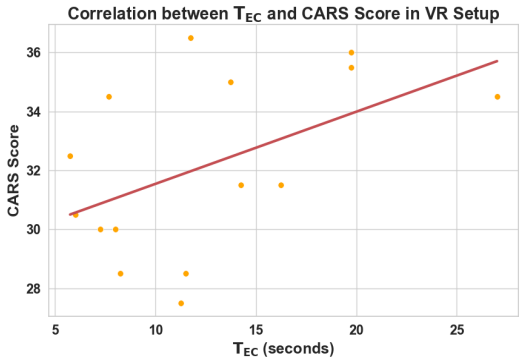


图 13：虚拟现实设置中 ASD 参与者建立眼神接触的时长（T_{EC}）与 CARS评分的相关性（rs=0.46，p=0.07）

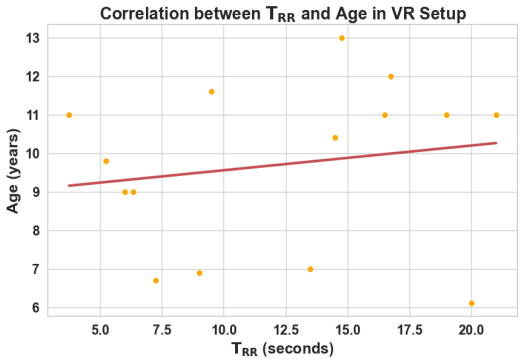


图15：虚拟现实设置中，ASD参与者反应注册时长（T_{RR}）与年龄之间的相关性（rs=0.24，p=0.38）

C. 各参与者组反应正确率（C_{PR}）的比较

最后，我们比较了 ASD 参与者在虚拟现实和增强现实设置下的 C_{PR} 。分析 ASD 组和神经典型组在增强现实和虚拟现实设置下的 C_{PR} 后，如图19所示，我们发现 ASD 参与者中有 92.3% 能够在增强现实平台上正确识别目标物体，而在虚拟现实设置下，只有 69.49% 的参与者正确完成了任务。这一高准确率可能归因于增强现实平台让 ASD 参与者感到更舒适，因为他们仍能看到现实环境，这有助于他们更自在地适应社交环境 [76]。

尽管如此，如表 II 所示，ASD 参与者在增强现实平台上的平均 T_{EC}（AR：42s；VR：12.54s）和 T_{RR} （AR：28s；VR：12.20s）值均高于虚拟现实平台。这种现象可能是因为学习使用增强现实设备进行交互比使用虚拟现实设备耗时更长 [77]。因此，我们可以进一步改进参与者在基于增强现实的平台上的训练，以便在未来获得更理想的结果。研究发现，ASD 参与者在虚拟现实和增强现实平台上的 C_{PR}均处于相对较高的水平。这表明他们能够有效理解虚拟化身传达的提示，并且能够与我们的共同注意力训练应用程序进行交互。我们的结果与此前利用虚拟化身进行共同注意训练的研究结果一致 [29,38,39,55,57]。总体而言，我们的解决方案有望成为可靠的共同注意力训练平台。

VI. 讨论

鉴于共同注意力能力对长期社交沟通和发展结局具有深远影响，增强孤独症谱系障碍儿童共同注意力能力的早期干预被广泛认为至关重要。本研究介绍了沉浸式虚拟现实和基于增强现实的平台的开发，这些平台旨在支持共同注意技能训练。两个平台均融入了一个数字虚拟形象，作为任务协调者，在受控环境中提供视觉线索，引导参与者的注意力转向目标物体。

我们对 29 名参与者开展了一项比较可行性研究，分别采用基于虚拟现实的设置（FOVE 0头戴设备）和基于增强现实的设置（Microsoft HoloLens 2）。研究的主要目标是评估这些沉浸式系统用于自闭症谱系障碍个体共同注意训练的可行性、可接受性及潜力。两种设置均集成了眼动追踪模块，可对参与者的注视行为进行精确的实时测量。我们开发了一个统一的共同注意力训练平台，并

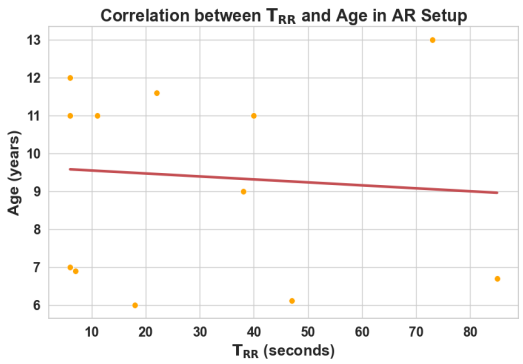


图 16：增强现实设置中 ASD 参与者的反应登记时长（T_{RR}）与年龄的相关性（rs=-0.16，p=0.57）

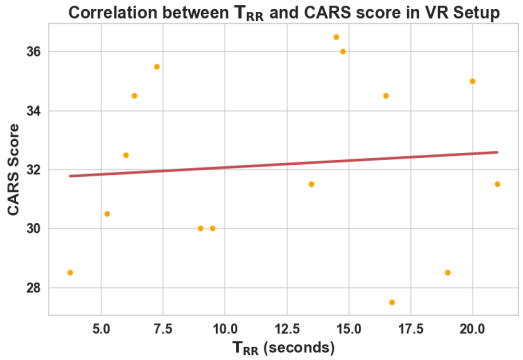


图 17：虚拟现实设置中 ASD 参与者的反应登记时长（T_{RR}）与 CARS评分的相关性（rs=0.08，p=0.77）

随后将其适配，以便部署到虚拟现实和增强现实设备中。我们使用三项关键指标量化任务表现：建立眼神接触所需的时间（T_{EC}）、提示传递后记录反应所需的时间（T_{RR}），以及反应正确率（C_{PR}）。

结果表明，在虚拟现实和增强现实两种设置中，神经典型参与者的 T_{EC} 和 T_{RR} 均显著短于 ASD 参与者。此外，相关性分析显示，ASD 参与者的 T_{RR} 与 CARS评分之间存在显著正相关，表明反应延迟会随自闭症严重程度的增加而延长。有趣的是，这一趋势在增强现实设置中比在虚拟现实平台中更为明显。一种可能的解释是，增强现实为 ASD 患者提供了更贴近现实且更具吸引力的环境，而完全沉浸式虚拟现实可能会令人感到不知所措，或缺乏生态熟悉感。在两种设置中，任务表现与参与者年龄之间均未观察到显著相关性，这可能是由于样本量有限。

尽管如此，虚拟现实和增强现实系统的 C_{PR} 值始终较高，表明参与者能够准确解读虚拟化身的视觉线索，并有效运用基于注视的交互来识别目标物体。这些发现表明，这些平台能够成功吸引并保持

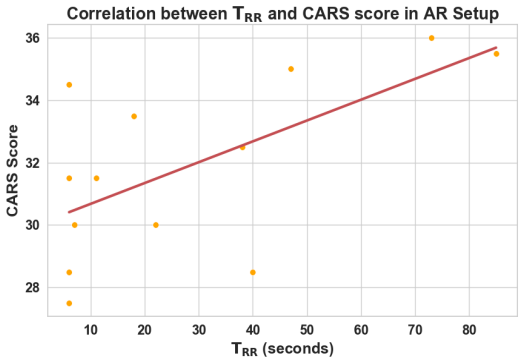


图18：增强现实设置中 ASD 参与者的反应注册时长（T_{RR}）与 CARS评分的相关性（rs=0.57，p=0.03）

表II：ASD 参与者在基于虚拟现实和增强现实的共同注意设置中的任务表现指标比较

	虚拟现实设置	增强现实设置
参与者	Mean	Mean
T_{EC} (秒)	12.54	42
T_{RR} (s)	12.20	28
C_{PR} (%)	69.5	92.3

表 III：研究虚拟现实和增强现实联合注意力设置下 ASD 参与者任务表现指标的组间统计差异

	虚拟现实设置			增强现实设置		
	p	*u*	*z*	*p*	*u*	*z*
T_{EC}	0.00007	14.5	3.80039	0.00056	20.5	3.25641
T_{RR}	0.00074	28	3.17851	0.00357	31.5	2.69231

显著性水平 = 0.01，假设 = 1 单尾

表 IV：在基于虚拟现实和增强现实的共同注意设置中，对 ASD 参与者的任务表现指标与参与者特征进行相关性分析的研究

	虚拟现实设置		增强现实设置	
	p	*r*	*p*	*r*
T_{EC} 与 CARS	0.07840854	0.46816313	0.760216041	0.09392301
T_{EC} 与年龄	0.67236623	0.119138426	0.603853662	-0.159008343
T_{RR} 与 CARS	0.775102028	0.080645679	0.038110133	0.57904873
T_{RR} 与年龄	0.381882228	0.243474556	0.57987584	-0.169491525

r =斯皮尔曼等级相关系数

参与者注意力，这是影响训练效果的关键因素。

总体而言，本研究凸显了沉浸式虚拟现实和基于增强现实的系统作为共同注意干预创新工具的可行性与潜力。两个平台均观察到较高的准确率，这表明孤独症谱系障碍儿童能够有意义地回应化身介导的线索，而反应延迟呈现的不同趋势则凸显了.....的重要性

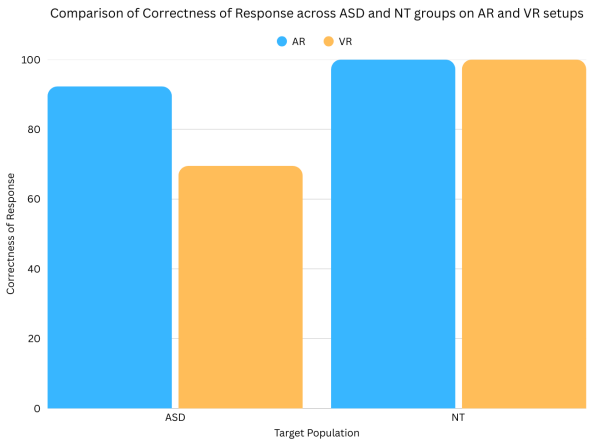


图19：比较孤独症谱系障碍（ASD）与神经典型参与者在增强现实（ASD：92.3%，NT：100%）和虚拟现实（ASD：69.5%，NT：100%）设置中的反应正确率（C_{PR}）

根据个体需求定制沉浸式环境。

VII. 结论

本研究介绍了一个沉浸式共同注意训练平台的设计、开发与评估。该平台部署于虚拟现实和增强现实设备上，并结合了头像介导的视觉线索和集成式眼动追踪技术。我们开展了一项比较可行性研究，邀请确诊为自闭症谱系障碍的儿童以及年龄匹配的神经典型参与者参与。结果表明，该平台能够有效捕捉基于注视的交互、提供一致的训练刺激，并维持参与者的投入度。研究结果显示，与自闭症谱系障碍儿童相比，神经典型参与者的注视反应显著更快。然而，两组的正确率均较高，反映出他们能够准确解读化身线索。此外，自闭症严重程度与反应延迟之间存在显著关联，这凸显了该平台捕捉具有临床意义的行为标志物的潜力。重要的是，与完全沉浸式虚拟现实环境相比，本研究表明，基于增强现实的干预可能为自闭症谱系障碍人士提供更易参与且不那么令人不知所措的体验。

综合来看，这些结果为沉浸式共同注意训练工具作为早期干预自闭症谱系障碍的创新策略，其可行性、接受度和应用前景提供了初步证据。尽管仍需通过更大且更多样化的样本进一步验证，并开展纵向研究、整合多模态线索，但本研究为未来开发个性化、技术驱动的干预措施奠定了重要基础，旨在提升孤独症谱系障碍儿童的核心社会沟通技能。

VIII. 局限性与未来工作

据我们所知，本研究首次尝试开发一个针对增强现实设备优化、由虚拟化身介导的共同注意训练平台。参与者表现出的积极接受度为这种方法的可行性和潜力提供了初步证据。

尽管如此，本研究仍存在若干局限。样本量相对较小，限制了研究结果的可推广性，也削弱了关于虚拟现实和增强现实设置相对有效性的结论力度。未来需要通过规模更大、构成更多元的队列开展研究，以验证这些结果，并对不同参与者亚组进行更细致的分析。我们还计划在训练范式中加入言语线索，与视觉线索并用，使平台更贴近现实中的交流情境。此外，我们不再将分析局限于预先设定的感兴趣区域（ROIs），而是计划追踪参与者在整个任务过程中的完整注视模式。这类数据将有助于深入了解注意策略，并推动设计更精细、更具适应性的联合注意力训练练习。最后，我们认识到需要开展纵向研究，以评估该平台对自闭症谱系障碍儿童联合注意技能发展的长期影响。同样重要的是，通过考察在沉浸式环境中习得的技能如何迁移至现实世界中的社会互动，评估这些干预措施的生态效度；现实中的社会互动本质上比模拟情境更复杂、更微妙。

参考文献

[1] C. Lord、M. Elsabbagh、G. Baird 和 J. Veenstra-Vanderweele，“自闭症谱系障碍”，《柳叶刀》，第392卷，第10146期，第508–520页，2018年。[2] O. Ousley 和 T. Cermak，“自闭症谱系障碍：维度与亚组的界定”，《当代发育障碍报告》，第1卷，第20–28页，2014年。[3] M. J. Maenner，“美国8岁儿童自闭症谱系障碍的患病率和特征——自闭症与发育障碍监测网络，11个监测点，2020年”，《*MMWR*：监测摘要》，第72卷，2023年。[4] N. K. Arora、M. Nair、S. Gulati、V. Deshmukh、A. Mohapatra、D. Mishra、V. Patel、R. M. Pandey、B. C. Das、G. Divan 等，“印度五个地区2–9岁儿童神经发育障碍的基于人群的负担估计”，《公共科学图书馆·医学》，第15卷，1002615，2018 7，第p. e .[5] A. De Giacomo 和 E. Fombonne，“父母对自闭症发育异常的识别”，《欧洲儿童与青少年精神病学》，第7卷，第3期，第131–136页，1998年。[6] H. Tager-Flusberg、R. Paul 和 C. Lord，“自闭症中的语言与沟通”，《孤独症与广泛性发育障碍手册》，第1卷，第335–364页，2005年。[7] M. T urner，“注释：自闭症中的重复行为：心理学研究综述”，《儿童心理学与精神病学及相关学科杂志》，第40卷，第6期，第839–849页，1999年。[8] I. Schneider、C. Regenbogen、N. Kohn、F. D. Zepf、S. Bubenzer-Busch、F. Schneider、R. C. Gur 和 U. Habel，“自闭症谱系障碍患者对社会挑衅的反应性降低”，《孤独症研究》，第8卷，第3期，第297–306页，2015年。[9] T. Nakano、K. Tanaka、Y. Endo、Y. Yamane、T. Yamamoto、Y. Nakano、H. Ohta、N. Kato 和 S. Kitazawa，“自闭症谱系障碍儿童和成人的注视模式异常，且与注视行为的发育变化无关”，《英国皇家学会学报*B*辑：生物科学》，第277卷，第1696期，第2935–2943页，2010年。[10] P. Mundy 和 M. Sigman，“自闭症共同注意缺陷的理论意义”，《发展与精神病理学》，第1卷，第3期，第173–183页，1989年。[11] P. Mundy、M. Sigman 和 C. Kasari，“自闭症中的共同注意、发育水平与症状表现”，《发展与精神病理学》，第6卷，第3期，第389–401页，1994年。[12] M. Tomasello 和 M. J. Farrar，“共同注意与早期语言”，《儿童发展》，第1454–1463页，1986年。[13] C. Whalen、L. Schreibman 和 B. Ingersoll，“共同注意训练对自闭症幼儿的社交主动行为、积极情感、模仿和自发言语的附带影响”，《自闭症与发育障碍杂志》，第36卷，第655–664页，2006年。

[14] P. Mundy、M. Sigman 和 C. Kasari，“自闭症儿童共同注意与语言发展的纵向研究”，《自闭症与发育障碍杂志》，第20卷，第1期，第115–128页，1990年。[15] J. S. Bruner，“言语行为的发生发展”，《儿童语言杂志》，第2卷，第1期，第1–19页，1975年。[16] P. R. Rollins、I. Wambacq、D. Dowell、L. Mathews 和 P. B. Reese，“针对自闭症谱系障碍儿童的干预技术：共同注意常规”，《交流障碍杂志》，第31卷，第2期，第181–193页，1998年。[17] T. Striano、X. Chen、A. Cleveland 和 S. Bradshaw，“共同注意的社会线索影响婴儿学习”，《欧洲发展心理学杂志》，第3卷，第3期，第289–299页，2006年。[18] P. Mundy 和 W. Jarrold，“婴儿共同注意、神经网络与社会认知”，《神经网络》，第23卷，第8-9期，第985–997页，2010年。[19] F. Kaplan 和 V. V. Hafner，“共同注意的挑战”，《互动研究》，第7卷，第2期，第135–169页，2006年。[20] P. Mundy，“典型发育和自闭症谱系障碍中的共同注意与社会认知脑系统综述”，《欧洲神经科学杂志》，第47卷，第6期，第497–514页，2018年。[21] M. Carpenter、B. F. Pennington 和 S. J. Rogers，“自闭症幼儿社会认知技能之间的相互关系”，《自闭症与发育障碍杂志》，第32卷，第91–106页，2002年。[22] W. L. Stone、O. Y. Ousley、P. J. Yoder、K. L. Hogan 和 S. L. Hepburn，“自闭症两岁和三岁儿童的非言语交流”，《自闭症与发育障碍杂志》，第27卷，第677–696页，1997年。[23] C. Kasari、A. Gulsrud、S. Freeman、T. Paparella 和 G. Hellemann，“接受共同注意和游戏针对性干预的自闭症儿童纵向随访”，《美国儿童与青少年精神病学学会杂志》，第51卷，第5期，第487–495页，2012年。[24] M. A. Bono、T. Daley 和 M. Sigman，“自闭症中的共同注意、干预量与语言能力提升之间的关系”，《自闭症与发育障碍杂志》，第34卷，第495–505页，2004年。[25] J. N. Meindl 和 H. I. Cannella-Malone，“自闭症儿童共同注意发起的发起与回应：文献综述”，《发展障碍研究》，第32卷，1454，2011 5，1441期，第–页。[26] M. L. Rocha、L. Schreibman 和 A. C. Stahmer，“家长培训在教导自闭症儿童共同注意方面的有效性”，《早期干预杂志》，第29卷，第2期，第154–172页，2007年。[27] H. Kumazaki、Y. Yoshikawa、Y. Yoshimura、T. Ikeda、C. Hasegawa、D. N. Saito、S. Tomiyama、K.-m. An、J. Shimaya、H. Ishiguro 等，“机器人干预对自闭症谱系障碍儿童共同注意的影响”，《分子自闭症》，第9卷，第1期，第46页，2018年。[28] H. Yazdanian、A. Vakili、A. Soltani、Z. Bagheri Rekhne、S. Zareii 和 T. Zarifian，“虚拟现实/增强现实在提升自闭症谱系障碍共同注意技能方面的应用：系统综述”，《国际发展障碍杂志》，第71卷，第5期，第663–678页，2025年。[29] V. Ravindran、M. Osgood、V. Sazawal、R. Solorzano、S. Turnacioglu 等，“利用Floreo共同注意模块支持共同注意的虚拟现实：可用性与可行性试点研究”，《JMIR儿科与育儿》，第2卷，第2期，e14429页，2019年。[30] P. Kirkham，“‘干预与虐待之间的界限’——自闭症与应用行为分析”，《人文科学史》，第30卷，第2期，第107–126页，2017年。[31] I. M. Grey、R. Honan、B. McClean 和 M. Daly，“评估应用行为分析教师培训的有效性”，《智力障碍杂志》，第9卷，第3期，第209–227页，2005年。[32] D. J. Delprato，“离散试次训练与规范化行为语言干预在自闭症幼儿中的比较”，《自闭症与发育障碍杂志》，第31卷，第3期，第315–325页，2001年。[33] T. Smith 和 S. Iadarola，“自闭症谱系障碍循证依据更新”，《临床儿童与青少年心理学杂志》，第44卷，第6期，第897–922页，2015年。[34] K. A. Murza、J. B. Schwartz、D. L. Hahs-Vaughn 和 C. Nye，“自闭症谱系障碍儿童的共同注意干预：系统综述与荟萃分析”，《国际语言与交流障碍杂志》，第51卷，第3期，第236–251页，2016年。[35] H. S. Roane、W. W. Fisher 和 J. E. Carr，“应用行为分析作为自闭症谱系障碍的治疗方法”，《儿科学杂志》，第175卷，第27–32页，2016年。[36] P. J. White、M. O’Reilly、W. Streusand、A. Levine、J. Sigafoos、G. Lancioni、C. Fragale、N. Pierce 和 J. Aguilar，“教授共同注意的最佳实践：干预文献系统综述”，《自闭症谱系障碍研究》，第5卷，1295，2011 4，1283期，第–页。[37] C. Whalen 和 L. Schreibman，“使用行为矫正程序对自闭症儿童进行共同注意训练”，《儿童心理学与精神病学杂志》，第44卷，第3期，第456–468页，2003年。[38] A. Z. Amat、H. Zhao、A. Swanson、A. S. Weitlauf、Z. Warren 和 N. Sarkar，“用于自闭症儿童共同注意练习的交互式虚拟现实系统 invirs 的设计”，《IEEE神经系统与康复工程汇刊》，第29卷，1876，2021年，1866页。–。[39] V. Jyoti 和 U. Lahiri，“面向自闭症儿童的基于虚拟现实的共同注意任务平台”，《IEEE学习技术汇刊》，第13卷，第1期，第198–210页，2019年。[40] H. Yazdanian、A. Vakili、A. Soltani、Z. B. Rekhne、S. Zareii 和 T. Zari- fian，“虚拟现实/增强现实在提升自闭症谱系障碍患者共同注意技能方面的应用：系统综述”，2023年。[41] M. Imai、T. Ono 和 H. Ishiguro，“物理关系与表达：人机交互中的共同注意”，《IEEE工业电子学汇刊》，第50卷，第4期，第636–643页，2003年。[42] G. Little、L. Bonnar、S. Kelly、K. S. Lohan 和 G. Rajendran，“自闭症儿童与非自闭症儿童借助虚拟化身进行的注视依随共同注意”，载于《2016年IEEE发展与学习及表观遗传机器人国际联合会议（ICDL-EpiRob）》。IEEE，2016年，第15–20页。[43] L. Bozgeyikli、A. Raij、S. Katkoori 和 R. Alqasemi，“面向自闭症谱系障碍人士的虚拟现实综述：设计考量”，《IEEE学习技术汇刊》，第11卷，第2期，第133–151页，2017年。[44] Y. Cheng、C.-L. Huang 和 C.-S. Yang，“利用3D沉浸式虚拟环境系统提升自闭症谱系障碍儿童的社会理解和社交技能”，《关注自闭症及其他发育障碍》，第30卷，第4期，第222–236页，2015年。[45] U. Lahiri、E. Bekele、E. Dohrmann、Z. Warren 和 N. Sarkar，“面向自闭症儿童的基于虚拟现实的自适应反应技术设计”，《IEEE神经系统与康复工程汇刊》，第21卷，第1期，第55–64页，2012年。[46] P. Buono、R. Lanzilotti、M. Matera、M. F. Costabile 等，“高级视觉界面国际工作会议论文集，{AVI} 2016，意大利巴里，2016年6月7日至10日”，2016年。[47] N. Newbutt、C. Sung、H.-J. Kuo、M. J. Leahy、C.-C. Lin 和 B. Tong，“简要报告：虚拟现实头戴设备在自闭症人群中的应用试点研究”，《自闭症与发育障碍杂志》，第46卷，第3166–3176页，2016年。[48] R. Bradley 和 N. Newbutt，“自闭症与虚拟现实头戴式显示器：现状系统综述”，《赋能技术杂志》，第12卷，第3期，第101–113页，2018年。[49] E. Billing、T. Belpaeme、H. Cai、H.-L. Cao、A. Ciocan、C. Costescu、D. David、R. Homewood、D. Hernandez Garcia、P. G´omez Esteban 等，“DREAM数据集：支持对自闭症谱系障碍和机器人增强疗法开展数据驱动研究”，《PLOS ONE》，第15卷，第8期，文章编号 e0236939，2020年。[50] S. Thill、C. A. Pop、T. Belpaeme、T. Ziemke 和 B. Vanderborght，“采用（部分）自主控制的自闭症谱系障碍机器人辅助治疗：挑战与展望”，《Paladyn》，第3卷，第209–217页，2012年。[51] T. Belpaeme、J. Kennedy、A. Ramachandran、B. Scassellati 和 F. Tanaka，“教育领域的社交机器人：综述”，《Science Robotics》，第3卷，第21期，文章编号 eaat5954，2018年。[52] N. Caruana、H. Stieglitz Ham、J. Brock、A. Woolgar、N. Kloth、R. Palermo 和 G. McArthur，“自闭症成人的共同注意困难：一项交互式眼动追踪研究”，《自闭症》，第22卷，第4期，第502–512页，2018年。[53] V. Jyoti、S. Gupta 和 U. Lahiri，“面向自闭症儿童的基于虚拟现实的虚拟化身介导共同注意任务：对表现和生理状况的影响”，载于《2019年第十届计算、通信与网络技术国际会议（ICCCNT）》。IEEE，2019年，第1–7页。[54] V. Jyoti 和 U. Lahiri，“面向自闭症儿童的便携式共同注意技能训练平台”，《IEEE学习技术汇刊》，第15卷，第2期，第290–300页，2022年。[55] V. Jyoti 和 U. Lahiri，“智能人工代理的设计：其在自闭症儿童共同注意任务中的应用”，《计算机与信息科学》，第125–142页，2020年。[56] V. Jyoti 和 U. Lahiri，“基于人机交互的共同注意线索：对自闭症谱系障碍儿童功能测量和生理测量指标的影响”，《人类行为中的计算机》，第104卷，文章编号 106163，2020年。[57] C. P. Amaral、M. A. Sim˜oes、S. Mouga、J. Andrade 和 M. Castelo- Branco

共同注意的创新脑机接口及三种实验设置的比较：一项可行性研究》，《神经科学方法杂志》，第290卷，第105–115页，2017年。[58] C. Mei、B. T. Zahed、L. Mason和J. Ouarles，《面向孤独症谱系障碍儿童的共同注意训练：一种虚拟现实游戏方法与眼动探索》，载于2018年IEEE虚拟现实与三维用户界面会议（VR）。IEEE，2018年，第289–296页。[59] P. P´erez-Fuster、G. Herrera、L. Kossyvaki和A. Ferrer，《通过增强现实技术辅助干预提升自闭症谱系儿童的共同注意技能》，《儿童》，第9卷，第2期，第258页，2022年。[60] H. Yazdanian、A. Vakili、A. Soltani、Z. B. Rekhne、S. Zareii和T. Zarifian，《虚拟现实/增强现实对自闭症谱系障碍者共同注意技能的改善：系统综述》，《国际发展障碍杂志》，第0卷，第0期，第1–16页，2023年。 [在线]。获取地址：https://doi.org/10.1080/20473869. 2023.2277604[61] Unity Technologies。（2024）Unity 3D。版本2021.3.12f1, [访问日期：8月 4, 2024]。 [在线]。获取地址：https://unity.com/ [62] FOVE Inc.（2024）Fove—下载。 [访问日期：8月 4, 2024]。[在线]。获取地址：https://fove-inc.com/downloads/ [63] 微软。（2024）Unity混合现实工具包（MRTK）概述。[访问日期：8月 4, 2024]。 [在线]。获取地址：https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk3-overview/ [64] Ready Player Me。（2024）Ready Player Me—跨平台虚拟形象平台。 [访问日期：8月 4, 2024]。 [在线]。获取地址：https://readyplayer.me/ [65] Blender Foundation，《Blender》，https://www.blender.org/，2024年，版本3.6。0, [访问日期：8月 4, 2024]。[66] Mixamo。（2024）Mixamo—3D角色动画。访问日期：8月。。在线。获取地址：https://www.mixamo.com/ [67] Unity Technologies。（2024）Unity动画绑定包文档。 [访问日期：8月 4, 2024]。 [在线]。获取地址：https: // docs.unity3d.com/Packages/com.unity.animation.rigging@1.0/manual/ [68] Unity Technologies。（2024）Unity资源商店。https://assetstore.unity. com/。 [访问日期：8月 4, 2024]。[69] M. I. Posner，《注意定向》，《实验心理学季刊》，第32卷，第1期，第3–25页，1980年。[70] D. 美国精神病学协会、A. P. Association等，《精神障碍诊断与统计手册：DSM-5》。美国精神病学协会，华盛顿特区，2013年，第5卷，第5期。[71] E. Schopler、R. J. Reichler和B. R. Renner，《儿童自闭症评定量表（CARS）》。Western Psychological Services，洛杉矶，加利福尼亚州，2010年。[72] M. Rutter，《社会沟通问卷》，（无标题），2003年。[73] J. N. Constantino、C. P. Gruber等，《社会反应量表：SRS-2》，2012年。[74] H. B. Mann和D. R. Whitney，《关于检验两个随机变量中一个是否在随机意义上大于另一个》，《数学统计年刊》，第50–60页，1947年。[75] C. Spearman，《两个事物之间关联的证明与测量》，1961年。[76] L. Tarantino、M. Attanasio、T. Di Mascio、G. De Gasperis、M. Valenti和M. Mazza，《对自闭症谱系用户沉浸式应用投入度的评估》，《传感器》，第23卷，第4期，第2192页，2023年。[77] N. Kyaw、M. Gu、E. Croft和A. Cosgun，《比较增强现实与虚拟现实在为真实物体创建虚拟边界框方面的可用性》，《应用科学》，第13卷，第21期，第11693页，2023年。



Ashirbad Samantaray 于2024年获得印度理工学院德里分校电气工程（计算机技术组）硕士研究学位。目前，他是焦特布尔印度理工学院iHub-Drishti基金会的研究工程师。他的研究兴趣包括虚拟现实、增强现实、自闭症和人机交互。



Taranjit Kaur 于2017年获得旁遮普贾朗达尔B·R·安贝德卡尔博士国立理工学院电子与通信工程哲学博士学位。

目前，她是印度理工学院焦特布尔分校人工智能与数据科学学院的科学官员。她专攻计算神经科学、人工智能和辅助技术。



Sapna S Mishra 于2025年获得印度理工学院德里分校电气工程博士学位。目前，她在新泽西州新泽西理工学院担任博士后研究员。她的研究兴趣包括脑成像、自闭症和人机交互。



Kritika Lohia 于2025年获得印度理工学院德里分校电气工程博士学位。目前，她在苏格兰圣安德鲁斯大学担任博士后研究员。她的研究兴趣包括人类视觉系统、自闭症和人机交互。

Chayan Majumder Chayan Majumder 获得了印度比特斯·皮拉尼学院电子与通信工程技术硕士学位，以及印度德里大学电子与通信工程技术学士学位。目前，他是印度理工学院德里分校的一名研究学者。研究领域为计算神经科学。



Sheffali Gulati 于1998年获得全印度医学科学研究所德里分院（AIIMS Delhi）的医学博士学位。目前，她是新德里全印度医学科学研究所儿童神经科的教授。她的研究兴趣包括儿科神经病学、自闭症和癫痫。她是国际自闭症研究学会的成员，目前担任印度儿童神经病学协会主席。



Tapan Kumar Gandhi 于2012年获得印度理工学院德里分校（IITD）的博士学位。目前，他在印度理工学院德里分校电气工程系担任教授。他的研究兴趣包括医疗保健技术、计算神经科学、自闭症和人机交互。他当选为国家工程院院士（FNAE）和国家科学院院士（FNASc.）。