arXiv:2601.02829v1 [cs.HC] 6 Jan 2026

分辨率不足会导致模拟器晕动症，并损害虚拟环境中的阅读表现

Jialin Wang计算媒体与艺术学域 香港科技大学（广州）（HKUST-GZ）中国广州

Xinru Cheng计算媒体与艺术学域 HKUST-GZ 中国广州

Boyong Hou人工智能学域 HKUST-GZ 中国广州

Hai-Ning Liang计算媒体与艺术学域 HKUST-GZ 中国广州 hainingliang@hkust-gz.edu.cn

2026年1月7日

摘要

扩展现实（XR）正逐渐发展为通用计算平台，但视觉疲劳和模拟器晕动症阻碍了其在生产力场景中的应用。尽管这些症状通常归因于延迟或运动冲突，但文本清晰度对生理舒适度的确切影响仍未明确。我们发现，在虚拟现实和视频透视环境中进行阅读任务时，次优的有效分辨率——即经过完整的显示器—光学—渲染管线后到达人眼的清晰度——是导致模拟器晕动症的主要因素。通过在统一的 logMAR 标度上系统地调节端到端有效分辨率，我们在受控的被试内研究中测量了阅读心理物理学表现和晕动症状。结果表明，当分辨率低于 0 logMAR（正常视力）时，阅读表现和用户舒适度会呈指数级下降。值得注意的是，我们的结果揭示，0 logMAR 是一个关键的生理临界点：高于这一阈值的分辨率可实现裸眼水平表现，且几乎不会引发不适；而低于这一阈值的分辨率则会导致恶心和眼动疲劳迅速、非线性地加剧。这些发现表明，辨认模糊文本所需的认知和感知努力会直接损害用户舒适度，因此人眼分辨率应成为未来设计符合人体工学的扩展现实系统时的一项关键基线。

关键词 文本可读性、视力、模拟器晕动症、扩展现实、头戴式显示器、有效分辨率、阅读表现

1 引言

扩展现实（XR）头戴式显示器（HMDs），包括虚拟现实（VR）和视频透视（VST；透视），正日益被视为通用计算平台，而非娱乐设备[1;2]。虚拟桌面、头戴式显示器内网页浏览、文档编辑、即时通信、编程以及通过视频透视阅读实体媒介等生产力任务，依赖两个前提：文本清晰可读和用户舒适度。即使其中任何一项存在轻微不足，也会降低吞吐量、提高错误率、缩短实验环节，并最终导致任务放弃[3;4;5;6]。舒适度还受到模拟器晕动症的进一步限制（由恶心、眼动疲劳和定向障碍构成的一组症状）；这种不适与视觉—前庭冲突、运动到光子延迟和重投影、不一致的视流，以及调节—集合压力有关[7;8;9;10]。即使是轻微症状，也会削弱注意力和阅读效率，减少可用的实验环节

时长，这可通过模拟器晕动症问卷（SSQ）等测量加以捕捉[11;12]。因此，有必要寻求以原则为基础、以用户为中心的测量方法，将扩展现实系统特征与虚拟现实和视频透视环境下的功能性阅读表现及舒适度联系起来。

造成这些问题的一个核心原因是<样式 id='1'>有效</样式>分辨率有限（即经过完整的显示器—光学器件—渲染管线后到达人眼的清晰度）。宽度 × 高度、每英寸像素数（PPI）或每度像素数（PPD）等传统规格是有用的工程描述，但无法充分体现用户在头戴式显示器下实际体验到的端到端视觉清晰度[13]。光学像差、渲染分辨率和图像处理都会改变人眼最终能够分辨的内容。传统视觉科学指标和基于显示器的视觉评估正日益推动头戴式显示器视觉感知标准的建立。近期的 XR 清晰度指标，例如全向虚拟视力（OVVA），通过直接以最小分辨角对数（logMAR）表示有效分辨率来解决这一问题。logMAR 是一种以视觉为核心的单位，其中 0 logMAR 约等于正常人眼视力[14]。为进一步追求逼真度，Ashraf等人[15] 最近研究了人眼的终极分辨率极限，提供了定量基准，用于确定显示分辨率进一步提升不再带来可感知收益的阈值。以 logMAR 表示分辨率，使我们能够根据感知清晰度研究人类性能，而不受显示面板、光学系统和渲染管线具体组合的影响。这一视角对于头戴式显示器尤其有价值，因为不同设备和观看条件下的清晰度可能存在显著差异。

阅读是人机交互（HCI）中的一项基础任务，也是评估视觉表现的敏感指标[16;17]。阅读表现可通过心理物理学方法进行测量，例如阅读视力测试[18]。例如，明尼苏达低视力阅读图表（MNREAD视力图表）被广泛用于通过最大阅读速度（MRS）、临界字体大小（CPS）、阅读视力（RA）和阅读可及性指数（ACC）来表征阅读表现[19;20;21;22]。然而，现有实现并非为同时适用于虚拟现实和视频透视而设计，也不支持在不同语言间使用可比的刺激材料，并严格控制、重复呈现不同水平的有效分辨率[23;24;25]。这限制了我们为旨在支持日常阅读的扩展现实系统制定具有普适性的指导建议。

我们通过*XR-Read*弥补了这一不足。这是一种可切换语言的阅读视力测试，可精确控制有效分辨率（以最小分辨角对数表示），并可原生运行于虚拟现实环境以及用于视频透视条件的智能手机上。我们使用 XR-Read 开展了一项被试内研究，参与者在四种有效分辨率（0.0、0.2、0.4、0.6 最小分辨角对数）下阅读英语和中文句子。我们记录了标准阅读表现指标（MRS、CPS、RA、ACC）以及模拟器晕动症症状。

我们的结果表明，在不同语言和显示模式下，降低有效分辨率会系统性地降低 MARS、提高 CPS 和 RA 阈值、降低准确率，并加剧模拟器晕动症症状。这些一致的效应表明，有效分辨率是影响头戴式显示器中阅读表现和舒适度的主要因素。基于这些发现，我们提供了将最小分辨角对数映射到阅读指标和模拟器晕动症症状的广义参考曲线，帮助设计师和工程师设定清晰度目标、选择渲染预算，并选用能够在日常使用中保持可读性的用户界面（UI）排版。

总之，本文做出了三项贡献：

- **适用于虚拟现实和视频透视、可切换语言的跨平台阅读视力测试**，能够以最小分辨角对数为单位精确控制有效分辨率。源代码可供下载 (https://github.com/Chaosikaros/X R-Read)
- **一项被试内评估**，量化有效分辨率（0.0、0.2、0.4、0.6 最小分辨角对数）如何影响不同显示模式和语言下的阅读表现（MRS、CPS、RA、准确率）及模拟器晕动症症状。
- **将最小分辨角对数与阅读表现和舒适度联系起来的广义参考曲线及实用指导**，**确立** 正常视力（***0*** 最小分辨角对数）**为实际操作阈值**，以支持在扩展现实中持续、低不适的阅读，并提供一种可重复的分辨率相关可读性评估方案。

2 相关工作

2.1 扩展现实头戴式显示器中的视觉清晰度

传统的以像素为中心的规格（如面板分辨率、子像素布局和每度像素数）无法预测用户在光学系统、渲染和后期处理均参与其中时实际能够分辨的视觉细节。实际上，镜头调制传递函数（MTF）、瞳孔游移、色差校正、时间上采样、抗锯齿以及锐化/去噪都会改变到达眼睛的调制频谱；在这些效果之上，渲染分辨率比例又构成了硬性带宽上限[13]。因此，近期以用户为中心的指标不再关注标称像素，而是转向以视觉科学单位（如最小分辨角对数）表示的有效分辨率 。OVVA 通过将视力表

转化为头戴式显示器内的心理物理测量，并直接以最小分辨角对数报告不同视线方向上的清晰度，从而能够公平比较光学系统和渲染比例各不相同的设备与处理流程[14]。OVVA 的一项关键发现是，每度像素数并非衡量感知清晰度的可靠指标：在固定的头戴式显示器上，仅改变渲染分辨率就能改变测得的最小分辨角对数；以较高渲染分辨率运行的低每度像素数设备，表现也可能优于以低于原生分辨率运行的高每度像素数设备。这解释了为什么标称像素指标经常会高估用户实际能够分辨的细节。

VST增加了一个成像阶段——采集、图像信号处理器（ISP）、重投影和显示——相较于光学透视（OST），这会进一步影响有效分辨率，并可能引入时间伪影。相机传感器、去马赛克、滚动快门、色调映射，以及图像信号处理器的锐化/去噪都会与头戴式显示器光学系统和所选渲染分辨率比例相互作用；其总体影响通常表现为对比度损失和细节衰减，从而导致最小分辨角对数变差，即使面板的名义规格保持不变[26;27;28]。由于VST流会被重投影到眼睛空间中，校准或姿态预测中的任何误差都会随着时间推移降低高频特征的质量，再次导致有效分辨率下降[29]。这些结果表明，清晰度指标和排版指南应以眼睛处的最小分辨角对数为定义依据，而不是以面板像素为依据；同时还应报告产生这些最小分辨角对数值的渲染分辨率比例。

2.2 XR头戴式显示器中的阅读表现

MNREAD阅读视力测试是一种成熟的工具，可通过MRS、CPS和阅读准确率来测量阅读表现[19]。随后，Calabrèse等人引入了准确率（ACC），作为衡量不同文字大小下阅读可访问性的单一综合指标，并以正常视力为标准进行归一化[22]。该指标同时反映视力和流畅度，已被提议用于评估低视力人群和老年人群中的干预措施或设备。

为促进跨语言研究，研究人员已使用多种文字系统创建了 MNREAD 风格的图表。Han等人为简体中文开发了 C-READ 图表，验证了年轻阅读者的阅读准确率、CPS 和 MRS 结果符合预期，并且与标准文本阅读相关[24]。Cheung等人进一步开发并验证了面向儿童的中文阅读图表，在保留 MNREAD 心理测量学特性的同时，确认了不同版本间的可靠性[30]。这些工具能够在统一的 logMAR 标度上比较不同语言和年龄组的阅读表现。然而，实体 MNREAD 和当前的数字版 iPad 版本没有足够多的句子来进行大规模重复测量，并且仅支持少数几种语言[31]。

在扩展现实领域，研究人员已开始将阅读表现与头戴式显示器的显示参数联系起来。Kilpeläinen 和 Häkkinen 比较了不同头戴式显示器的易读性，并证明以感知为先的方法能够揭示设备之间的明显差异；他们据此认为，扩展现实中的排版和渲染要求应基于用户实际能够分辨的内容，而不是工程规格[32]。对角尺寸和分辨率进行调整也表明，随着头戴式显示器的有效分辨率变差，阅读速度和最小可读尺寸会出现可预测的下降[33]。然而，这些研究未与视频透视进行比较，而视频透视更容易受到易读性问题的影响[34]。此外，在比较有效分辨率时，他们没有考虑并控制渲染分辨率。在这种情况下，默认渲染分辨率的结果可能会产生误导，因为根据 OVVA，默认渲染分辨率可能无法充分利用名义上的每度像素数[14]。

现有的 XR 阅读研究通常存在以下局限：仅评估一种语言或一种显示模态，限制了研究结果的普适性；采用硬件对比，将光学系统、渲染和延迟与清晰度混杂在一起；或缺乏从最小分辨角对数清晰度到阅读表现的明确联系，因而难以制定具有可操作性的字体排版或渲染预算。因此，我们推出了 XR-Read，这是一项可切换语言的阅读视力测试，可在虚拟现实中原生运行，并通过智能手机显示支持 VST，使参与者能够在不同清晰度水平下阅读匹配的多语言句子。

此外，我们在一款现代高性能头戴式显示器上（Varjo XR-4 Focal Edition，虚拟现实为 55 PPD，VST 为 51 PPD），通过直接控制最小分辨角对数清晰度并保持其他变量不变，将<style id='1'>有效分辨率作为主要因素加以隔离。我们在不同模态中使用相同的设备和任务，逐步引入清晰度下降（0.0、0.2、0.4、0.6 最小分辨角对数），并量化其对功能性阅读表现和舒适度的影响。不同于大多数既有研究，我们明确操控并报告渲染分辨率比例，使最小分辨角对数能够反映真实的端到端清晰度，而非默认的渲染分辨率。通过仅操控有效分辨率，并在不同模态和语言下对同一参与者收集 MRS、CPS、阅读准确率和准确率数据，我们推导出将最小分辨角对数映射至功能性阅读表现的广义参考曲线。

2.3 头戴式显示器中的模拟器晕动症

长时间使用扩展现实，舒适度与易读性同样重要。模拟器晕动症（或称晕动症）是指沉浸过程中出现的恶心、眼动疲劳、定向障碍和头晕。通常使用模拟器晕动症问卷（SSQ）进行评估[35]。即使是轻微的模拟器晕动症，也会迫使用户休息并缩短实验环节时长，从而降低工作效率[11]。

大量研究表明，模拟器晕动症受系统和内容因素的共同影响。Saredakis 等人的荟萃分析证实，视场角、运动和暴露时长会系统性地影响不适评分[36]。在视频透视中，

摄像头质量、延迟和视觉保真度也会影响舒适度。De Souza 和 Tartz 发现，参与者报告的恶心和视觉障碍存在与设备相关的差异[6]。

虽然许多研究操控运动、视场角或帧率，但量化不同虚拟现实或视频透视环境中阅读表现如何变化的研究较少，而且相关研究中没有一项在严格控制的环境下，同时考察虚拟现实和视频透视中由有效分辨率驱动的易读性损失是否会随模拟器晕动症症状而变化[32;37;38]。我们在单一头戴式显示器上仅改变有效分辨率，并同步测量模拟器晕动症和阅读表现。由此得到的最小分辨角对数、阅读指标和模拟器晕动症曲线，揭示了可读性与舒适度均能维持的共同运行区间。通过将清晰度与其他系统因素分离，我们的结果为扩展现实文本渲染和用户界面设计提供了具体的有效分辨率目标（以最小分辨角对数表示），并为如何选择字体尺寸和渲染预算提供了实用指导，以便在虚拟现实和视频透视中同时维持吞吐量与舒适度。

2.4 研究问题

根据我们的文　　献综述及我们发现的研究空白，本研究围绕三个研究问题（RQs）展开　　):

- **研究问题1：**有效分辨率（最小分辨角对数）如何影响头戴式显示器中的功能性阅读表现（MRS、CPS、阅读准确率、准确率）？
- **研究问题2：** 这些效应能否推广到不同的显示模式（虚拟现实与视频透视）和语言（英语与中文）？
- **研究问题3：** 有效分辨率与自我报告的模拟器晕动症有何关系？我们能否据此推导出适用于提升舒适度的实用运行点?

3 XR-Read：虚拟现实与视频透视的阅读视力测试

本节将介绍阅读视力测试的指标定义、其原始设计以及我们改进后的数字版本，随后介绍使用该数字版本开展的用户研究及其结果和讨论。

3.1 指标定义

在视觉科学中，印刷尺寸并非仅由其物理尺寸决定，还取决于它在眼睛处形成的视角。视角表示物体在视网膜上看起来有多大，并提供一种与尺度无关的度量，同时考虑文本的物理尺寸和观看距离。因此，视角是描述易读性和视敏度的自然单位。

若 h 表示字母 x 高度（小写字母“x”的高度）， d 表示观看距离，则印刷文字所张的视角 θ_x 为

$$\theta_x \;=\; 2\arctan\!\left(\frac{h}{2d}\right). \tag{1}$$

logMAR 印刷字号（最小分辨角的对数）定义为

$$S \;=\; \log_{10}\!\left(\frac{\theta_x}{5\,\text{arc min}}\right), \tag{2}$$

其中， S 表示以 logMAR 单位表示的印刷尺寸， θ_x 表示字母 x 高度所张的视角（以角分（角分）计），而 5 角分是对应标准视敏度的参考角。因此，logMAR 值量化了印刷文字的大小与正常视力的分辨极限之间的关系。

logMAR 视力与小数视敏度之间的关系为

$$S \;=\; -\log_{10}(\text{Decimal acuity}), \tag{3}$$

按照惯例，正常视力定义为 $S = 0$，对应的小数视敏度为 1。0，也可用斯内伦记法[39]表示为 20/20 视力。

令 RS(S) 表示印刷尺寸为 S 时的阅读速度，单位为每分钟词数（wpm）。对于一句在 t 秒内读完、出现 e 个词语错误的句子（MNREAD 的句子平均包含 10 个词，C-READ 的每句包含 12 个简体中文字符S），句子级阅读速度为

句子[25;24])

$$\mathrm{RS} \;=\; \frac{60\,(10-e)}{t}\ \text{wpm}. \tag{4}$$

MRS 是在文字大小足够大时达到的渐近（平台期）阅读速度；在实际操作中，它根据拟合的 MNREAD 曲线的平台期进行估计：

$$\mathrm{MRS} \;=\; \lim_{S\to\text{large}} \mathrm{RS}(S). \tag{5}$$

数值越高表示性能越好。在视力正常的年轻成年人中，原生英语和中文使用者的典型值均约为 200 wpm [25;40]；这一数值在成年早期基本保持稳定，随后会随着年龄增长而逐渐下降。

CPS 定义为阅读速度保持接近最大值时的最小文字大小 S（以最小分辨角对数表示）。在实际操作中，CPS 通常取满足以下条件的最小 S：阅读速度 RS(S) 至少达到最大阅读速度（MRS）的 p。许多研究采用 $p = 0.90$，而报告值处于 $p \in [0.80, 1.00]$ 范围内，以在可靠性与严格性之间取得平衡[41;42]：

$$\mathrm{CPS}(p) \;=\; \min\!\big\{\, S \;:\; \mathrm{RS}(S) \;\geq\; p\,\mathrm{MRS} \,\big\}, \qquad p \in [0.80, 1.00]. \tag{6}$$

CPS 越低表示性能越好，因为这意味着较小的文字也能以（近乎）最大速度阅读。在视力正常的年轻成年人中，CPS 通常接近 0.1 最小分辨角对数，并会随年龄增长或视力受损而增加[43;25]。此外，标准差（SD）方法将 CPS 定义为阅读速度平台期中最小的尺寸，其平均阅读速度显著高于较小文字大小下的速度（例如高出 ≥ 1.96 SD）；MRS 则为平台期平均值[41]。

RA 是一个人能够阅读且不会出现明显错误的印刷尺寸阈值（以最小分辨角对数表示）：

$$\mathrm{RA} \;=\; S_{\text{smallest readable}} \;+\; 0.01 \times e_{\text{(at that size)}}. \tag{7}$$

RA 越低越好（视敏度越高）。对于年轻且视力正常的观察者，RA 通常在 -0.2 至 -0.15最小分辨角对数左右；老年人或低视力者的数值则较高（较差）[43;25]。

ACC 概括了对日常文字大小的阅读能力。其计算方法是：将最大的十种文字大小对应的平均阅读速度除以 200 wpm（年轻视力正常者的参考值）：

$$\mathrm{ACC} \;=\; \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} \frac{\mathrm{RS}(S_i)}{200}. \tag{8}$$

ACC 越高越好。按照定义，年轻且视力正常的读者的 ACC ≈ 1.0；数值大于 1 表示阅读能力高于参考水平，而接近 0 则表示阅读常见印刷文字的能力严重受限[22]。

MNREAD数据由一系列配对 $\big(S_i,\ \mathrm{RS}_i\big)$ 构成，对应逐渐减小的文字大小。由于 S 是角度测量，观看距离 d 的任何变化都会使所有文字大小发生一致的偏移。如果两个实验环节分别在距离 d和 d'处进行，其尺寸坐标满足

$$S(d') \;=\; S(d) \;+\; \log_{10}\!\left(\frac{d'}{d}\right), \tag{9}$$

这样即可通过 $S_{40} = S(d) + \log_{10}(0.40/d)$ 将可选标准化设定为以 40cm 为参考。无需对 RS 进行调整，因为在 S 以角度定义时，MNREAD范式中的阅读速度不受距离影响。

原始 MNREAD测试从较大尺寸开始，并以 0.1 最小分辨角对数为步长逐渐缩小尺寸（-0.5 至 1.3；19 个句子），直至参与者无法读出某个句子中的任何词语。检查员会指示参与者尽可能快速、准确地朗读，并在不确定时猜测。测量并保持观看距离；使用下巴托或硬质测量带可提高稳定性，并记录最终距离，以确保S反映真实的角度文字大小。对于每个句子，检查员记录用时 t，统计 e，并根据公式 4 计算 RS。

3.2 XR-Read的实现

现有的 iPad 版 MNREAD 实现保留了句子设计和对数缩放，同时实现了计时、评分和参数估计的自动化。既往研究已表明，它与实体视力表等效[25]。句子呈现和计时通过点击启动；内部计时器消除了秒表计时变异，并为每次试次加盖时间戳。每个句子结束后，错误会立即在专用评分面板中录入。该设备利用已知的每英寸像素数

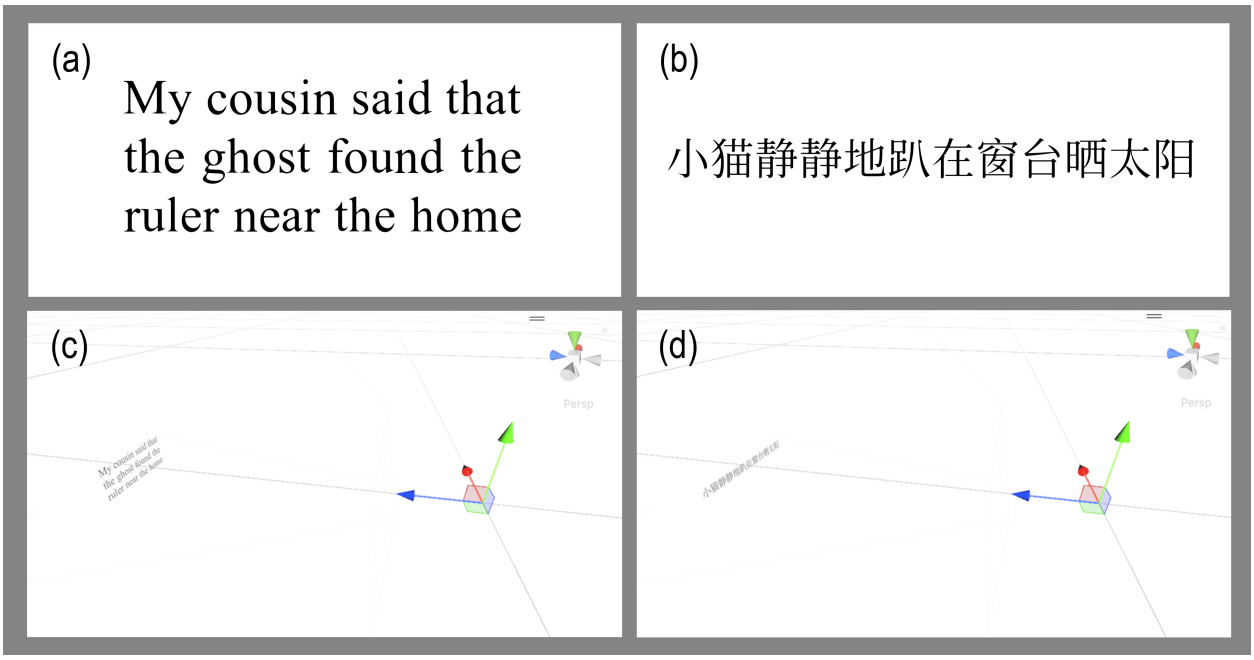


图1：XR-Read 中英语（(a) 和 (c)）及中文（(b) 和 (d)）句子的截图。第一行展示的是通过智能手机拍摄的二维 XR-Read。第二行展示的是在 Unity 编辑器中截取的三维 XR-Read 视图，蓝色箭头表示眼部摄像机的方向。

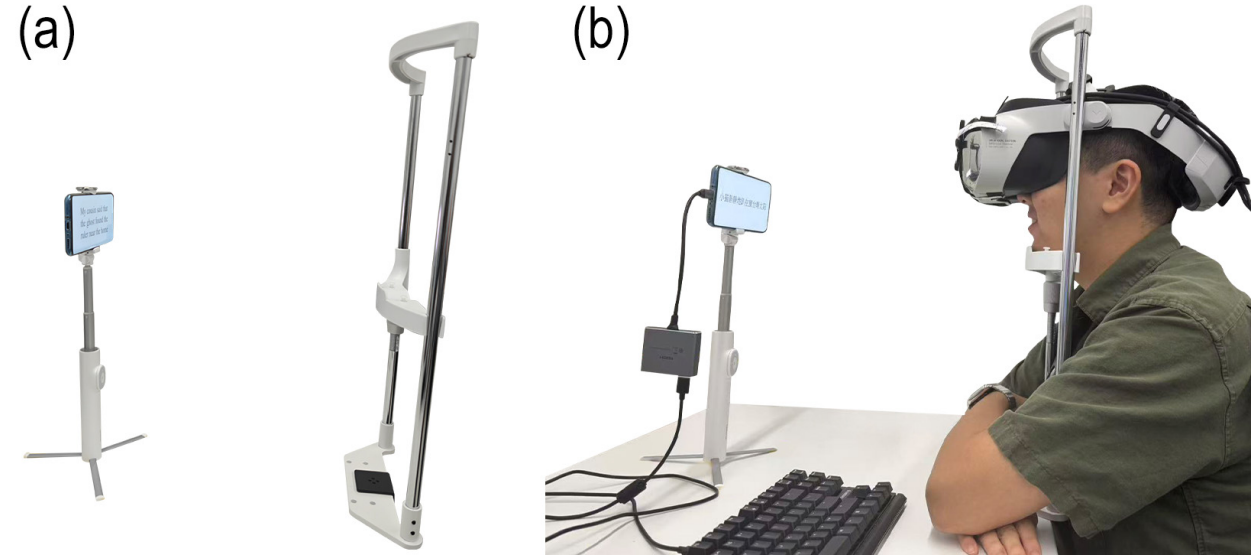


图2：二维 XR-Read 在智能手机上的图片，以及下巴托架。

佩戴

（a）和（b）展示了实验设置，分别为没有参与者和有参与者 Varjo XR-4 Focal Edition 的情形。

以及输入的观看距离来呈现所需的角大小，因此 S 可直接计算，而无需根据印刷指标推断；可用范围受屏幕尺寸和分辨率限制。在标准的 40 cm 观看距离下，iPad 的每英寸像素数将测量范围限制为 -0.1 至 1。2 最小分辨角对数（按 0.1 最小分辨角对数的步长呈现 14 个句子）。

为了测量虚拟现实和视频透视中的阅读视力，我们在 Unity 中开发了三维和二维 XR-Read。在这两个版本中，检查员按空格键进入下一句。字体渲染采用有符号距离场（SDF）字体（TextMesh Pro），以确保字体在变换和放大时仍能清晰渲染。根据 MNREAD（英文）和 C-READ（中文）的设计，使用 Times（英文）和思源宋体简体中文（中文）生成 SDF 字体。在用于虚拟现实的三维 XR-Read 中，句子面板固定在眼部摄像机上，并放置在

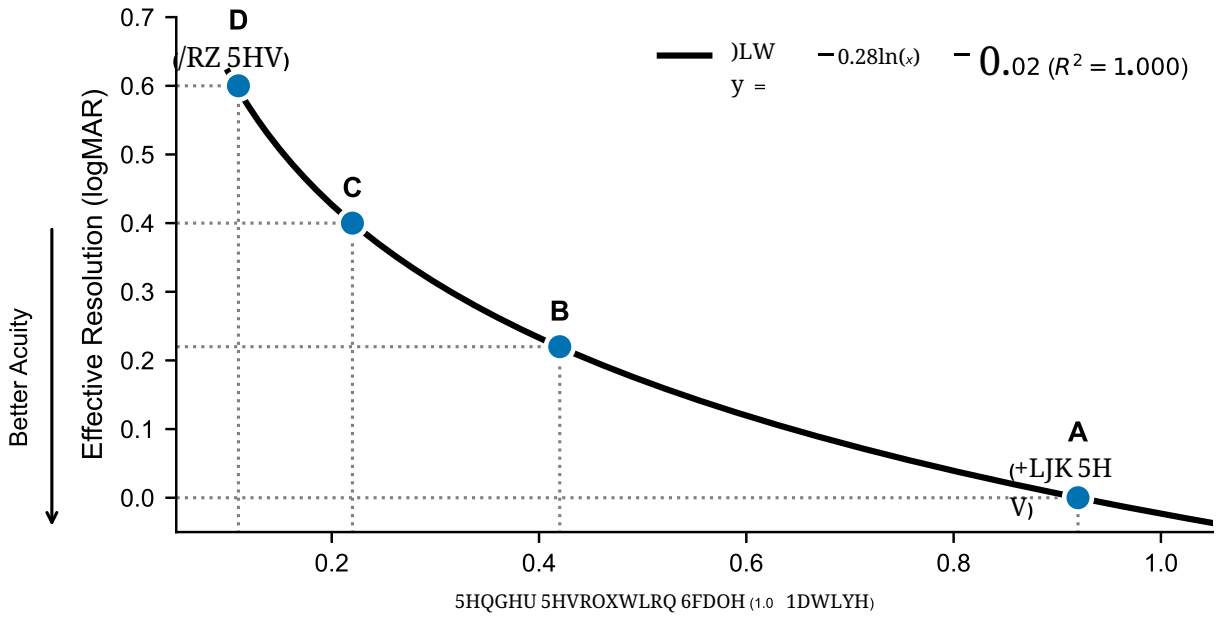


图3：虚拟现实中渲染分辨率比例与有效分辨率之间的对应关系。对数回归$y = -0.28\ln(x) - 0.02$ 描述了渲染分辨率比例 x 与视力（最小分辨角对数） y之间的关系，该关系通过 OVVA 测试测得。红色标记（A–D）表示四个目标视敏度等级（A = 0.00、B = 0.22、C = 0.40、D = 0.60 最小分辨角对数）及其对应的比例（$x \approx 0.92$、0.42、0.22、0.11），虚线延伸至坐标轴。

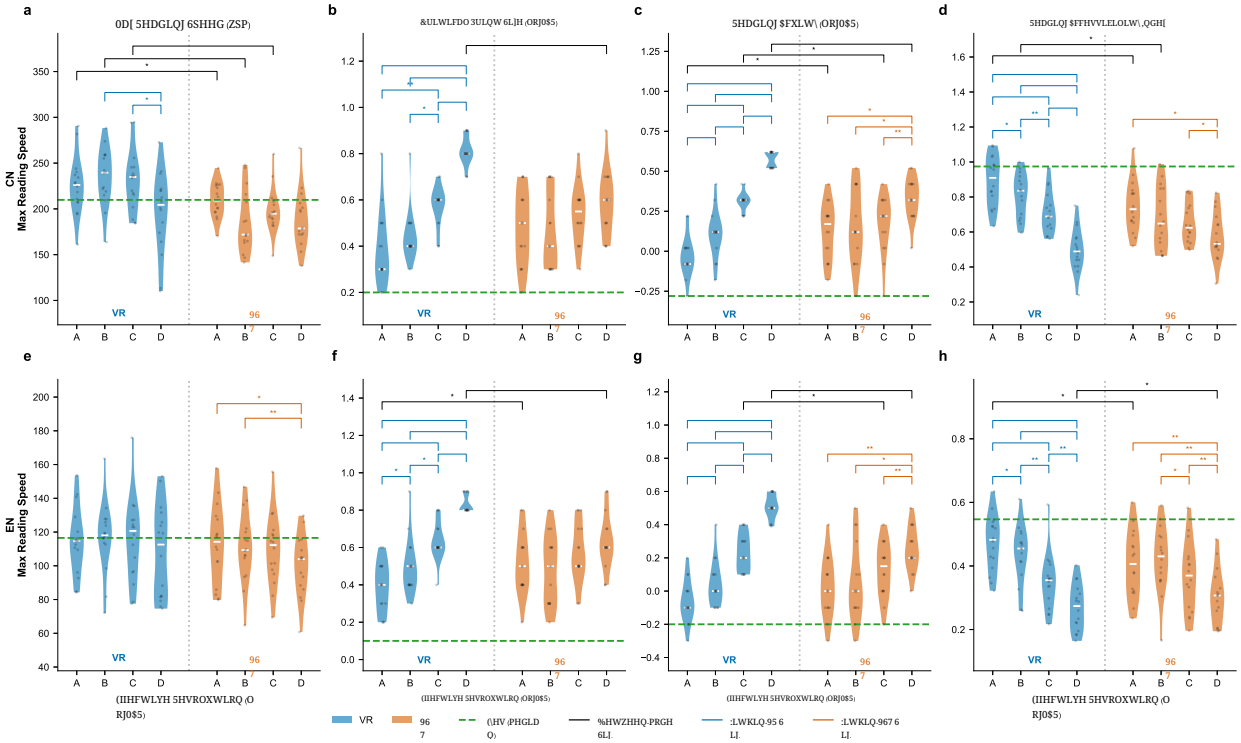


图4：XR-Read 的小提琴图及事后检验结果。“*”至“***”分别表示经邦费罗尼校正后在“.05”、“.01”、“.001”水平上显著的差异。

显示	指标	χ^2	df	p值	W
VST	准确率（中文）	15.4	3	0.002	0.320
	准确率（英文）	18.7	3	<0.001	0.389
	CPS（中文）	7.9	3	0.048	0.164
	CPS（英文）	9.2	3	0.026	0.192
	MRS（中文）	8.0	3	0.045	0.167
	MRS（英文）	9.5	3	0.023	0.198
	阅读准确率（中文）	15.6	3	0.001	0.324
	阅读准确率（英文）	21.4	3	<0.001	0.446
VR	准确率（中文）	37.3	3	<0.001	0.778
	准确率（英文）	39.2	3	<0.001	0.817
	CPS（中文）	36.1	3	<0.001	0.752
	CPS（英文）	40.2	3	<0.001	0.838
	MRS（中文）	18.5	3	<0.001	0.386
	MRS（英文）	2.5	3	0.480	0.052
	阅读准确率（中文）	44.4	3	<0.001	0.926
	阅读准确率（英文）	45.5	3	<0.001	0.947

表1：针对每种语言（中文、英文），在每种显示方式（视频透视、虚拟现实）下，对 XR-Read 的四个**有效分辨率** 等级（A、B、C、D）进行的弗里德曼检验。显著的 p值已**显示**出来。

		VST		VR	
指标	Pair	W	p值	W	p值
MRS	A 与 B 对比	24.0	0.107	32.0	0.196
	A 与 C 对比	28.0	0.155	44.0	0.462
	A 与 D 对比	22.0	0.093	23.0	0.073
	B 与 C	34.0	0.250	55.0	0.528
	B 与 D	54.0	0.751	1.0	<0.001***
	C 与 D	50.0	0.751	12.0	0.011*
CPS	A 与 B	27.5	0.902	31.0	0.107
	A 与 C 比较	24.5	0.902	8.0	0.009**
	A 与 D 比较	20.5	0.198	0.0	<0.001***
	B 与 C 比较	9.0	0.081	15.0	0.033*
	B 与 D 比较	12.5	0.064	0.0	<0.001***
	C 与 D 比较	13.0	0.902	0.0	<0.001***
RA	A 与 B 比较	30.0	0.916	5.0	<0.001***
	A 与 C 比较	26.0	1.000	0.0	<0.001***
	A 与 D 比较	10.0	0.013*	0.0	<0.001***
	B 与 C 比较	59.0	1.000	2.5	<0.001***
	B 与 D 比较	7.0	0.019*	0.0	<0.001***
	C 与 D 比较	0.0	0.003**	0.0	<0.001***
ACC	A 与 B	39.0	0.288	20.0	0.011*
	A 与 C	25.0	0.086	5.0	<0.001***
	A 与 D	11.0	0.010*	0.0	<0.001***
	B 与 C	52.0	0.433	7.0	0.001**
	B 与 D	24.0	0.086	0.0	<0.001***
	C 与 D	16.0	0.026*	1.0	<0.001***

表 2：针对所有配对的**显示** 下**有效分辨率** （中文）进行 XR-Read 威尔科克森符号秩检验并采用 Bonferroni校正。绿色 p值旁的“*”至“****”分别表示校正后显著性达到 .05、.01 和 .001 水平。

位于距相机位置 40 cm 的三维空间中（在 Unity 中，1 个单位 $= 100$ cm）（见图1 (c) 和 (d)）。对于用于视频透视的二维 XR-Read，句子面板渲染在二维屏幕空间中，并以独立 Android 应用的形式在智能手机上运行

指标	Pair	VST		VR	
		W	p值	*W*	p值
MRS	A 与 B 对比	50.0	0.549	60.0	1.000
	A 与 C 对比	39.0	0.432	67.0	1.000
	A 与 D 对比	18.0	0.038*	43.0	1.000
	B 与 C 比较	46.0	0.549	63.0	1.000
	B 与 D 比较	8.0	0.005**	33.0	0.443
	C 与 D 比较	21.0	0.052	45.0	1.000
CPS	A 与 B 比较	32.0	0.751	6.5	0.027*
	A 与 C 比较	50.5	0.952	0.0	<0.001***
	A 与 D 比较	7.0	0.239	0.0	<0.001***
	B 与 C 比较	22.0	0.239	11.0	0.027*
	B 与 D	12.0	0.051	0.0	<0.001***
	C 与 D	16.5	0.239	0.0	<0.001***
RA	A 与 B	46.5	0.761	0.0	<0.001***
	A 与 C 对比	19.5	0.126	0.0	<0.001***
	A 与 D 对比	0.0	0.003**	0.0	<0.001***
	B 与 C	17.0	0.185	2.0	<0.001***
	B 与 D	9.0	0.032*	0.0	<0.001***
	C 与 D	1.5	0.007**	0.0	<0.001***
ACC	A 与 B	53.0	0.464	22.0	0.016*
	A 与 C	41.0	0.351	2.0	<0.001***
	A 与 D	7.0	0.003**	0.0	<0.001***
	B 与 C	14.0	0.010*	6.0	0.001**
	B 与 D	5.0	0.002**	0.0	<0.001***
	C 与 D	11.0	0.007**	10.0	0.003**

表3：针对所有**显示**中的**有效分辨率**配对，对XR-Read进行威尔科克森符号秩检验并采用Bonferroni校正（英文）。绿色p值旁的“*”至“***”分别表示校正后显著性达到.05、.01和.001水平。

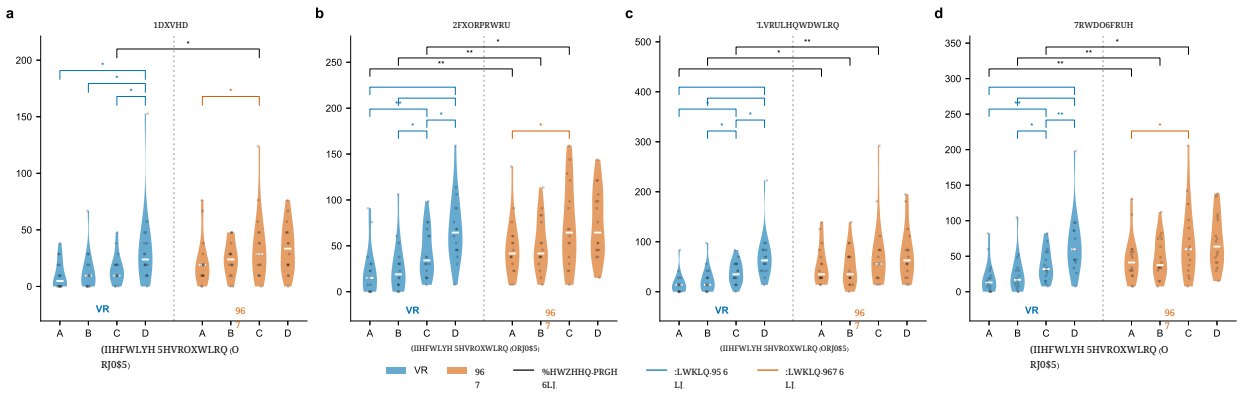


图5：模拟器晕动症问卷的事后检验结果小提琴图。“*”至“****”表示经Bonferroni校正后在“.05”、“.01”、“.001”水平上存在显著差异。

位于距眼睛 40 cm 处（见图2 和图1 (a) 和 (b)）。印刷尺寸通过缩放变换组件进行控制。对于二维 XR-Read，我们进行了物理校准，以获取设备的实际像素/厘米值。XR-Read 会自动记录句子、最小分辨角对数和时间，并输出 CSV 文件。为避免实验过程中的人为错误，每个实验环节都会录音；环节结束后，检查员会根据录音统计错误。

中文与英文						视频透视与虚拟现实				
度量分辨率		VST		VR		分辨率	CN		EN	
		W	p值	W	p值		W	p值	W	p值
MRS	A	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	A	20.0	0.022*	45.0	0.296
	B	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	B	3.0	<0.001***	35.0	0.296
	C	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	C	3.0	<0.001***	33.0	0.296
	D	0.0	<0.001***	3.0	<0.001***	D	59.0	0.669	37.0	0.296
CPS	A	16.5	0.554	23.0	1	A	17.5	0.330	9.5	0.031*
	B	26.0	1	9.0	0.451	B	43.5	0.946	46.0	0.715
	C	22.0	1	2.0	0.188	C	18.0	0.750	18.0	0.220
	D	24.0	0.732	5.0	1	D	0.0	<0.001***	4.0	<0.001***
RA	A	0.0	<0.001***	26.0	0.087	A	6.5	0.010*	23.5	0.157
	B	20.0	0.044*	26.0	0.087	B	26.0	0.339	32.0	0.966
	C	30.0	0.087	11.0	0.008**	C	5.5	0.010*	10.0	0.031*
	D	9.0	0.007**	10.0	0.008**	D	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***
ACC	A	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	A	3.0	<0.001***	18.0	0.031*
	B	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	B	19.0	0.028*	49.0	0.697
	C	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	C	34.0	0.083	56.0	0.697
	D	0.0	<0.001***	0.0	<0.001***	D	27.0	0.067	18.0	0.031*

表 4：对 XR-Read 的**有效分辨率** 和**语言** 进行的 Bonferroni校正 Wilcoxon检验。左：中文与英文。右：视频透视与虚拟现实。带有“*”至“***”标记的 p值分别表示校正后显著性达到 .05、.01 和 .001。

显示	指标	χ^2	df	p值	W
VST	恶心	11.2	3	0.011	0.233
	眼动	10.7	3	0.013	0.223
	定向障碍	5.3	3	0.15	0.111
	总分	11.2	3	0.011	0.232
VR	恶心	20.6	3	<0.001	0.429
	眼动	28.8	3	<0.001	0.600
	定向障碍	33.0	3	<0.001	0.688
	总分	32.2	3	<0.001	0.671

表5：针对每种**显示**（VST、虚拟现实）下的四种**有效分辨率**等级（A、B、C、D），对模拟器晕动症问卷结果进行的弗里德曼检验。显著的p值已突出显示。

3.3 实验条件与流程

我们开展了一项被试内研究，操控三个因素：语言（CN、EN）、显示模式（VR、VST）和有效分辨率（A $=0.00$、B $=0.22$、C $=0.40$、D $=0.60$ 最小分辨角对数）。实验开始时收集人口统计信息和前测SSQ。正式研究前，参与者先针对两种语言的 XR-Read 进行一次训练试次。研究以裸眼条件开始，使用两种语言的二维 XR-Read 作为基线。随后，参与者完成 16 项测试，涵盖语言 × 显示模式 × 有效分辨率；测试顺序通过拉丁方进行平衡。对于每种显示模式 × 有效分辨率组合，一个实验环节包含两种语言，持续约 2 分钟。参与者在各实验环节之间充分休息，以防模拟器晕动症累积，并在每个实验环节后完成后测SSQ。整个实验约需 1 小时。每种语言共使用 10 组、每组包含 16 个句子的材料（-0.5 至 1.0，每 0.1 最小分辨角对数为一级）：一组试次材料、一组裸眼材料，以及八组涵盖不同显示模式 × 有效分辨率条件的材料。所有句子均不重复，并遵循 MNREAD 和 C-READ 的设计原则[24;31]。完成所有实验环节和问卷后，我们进行了简短的半结构化访谈，以了解参与者的主观体验，重点关注他们在 VR 和 VST 条件下文字变得无法辨认时的感受。

		VST		VR	
指标	**Pair**	W	**p值**	W	**p值**
恶心	A 与 B	21.0	1	6.0	0.875
	A 与 C	0.0	0.047*	6.0	0.328
	A 与 D	9.0	0.161	4.0	0.014*
	B 与 C	10.5	0.422	13.0	0.875
	B 与 D	19.5	0.454	4.0	0.01*
	C 与 D 比较	34.5	1	0.0	0.01*
眼动	A 与 B 比较	44.5	1	17.5	0.206
	A 与 C 比较	5.5	0.041*	11.0	0.007**
	A 与 D	19.0	0.09	1.0	<0.001***
	B 与 C	21.0	0.192	10.0	0.031*
	B 与 D	24.5	0.192	1.0	<0.001***
	C 与 D	62.0	1	13.0	0.031*
定向障碍	A 与 B	27.0	1	5.5	0.109
	A 与 C	16.5	0.369	12.0	0.016*
	A 与 D	34.5	0.506	0.0	<0.001***
	B 与 C	15.0	0.196	11.0	0.027*
	B 与 D	15.5	0.199	1.0	<0.001***
	C 与 D	30.5	1	9.0	0.016*
总分	A 与 B	52.5	0.751	18.0	0.11
	A 与 C	8.5	0.048*	11.0	0.007**
	A 与 D	17.5	0.148	0.0	<0.001***
	B 与 C	29.0	0.167	13.0	0.011*
	B与D比较	19.5	0.167	1.0	<0.001***
	C与D比较	49.5	0.751	9.0	0.007**

表6：对模拟器晕动症问卷中每种**有效分辨率**在各**显示**内的配对进行Bonferroni校正后的威尔科克森符号秩检验。带有“*”至“***”的绿色p值分别表示在.05、.01和.001水平上达到校正后显著性。

		A		B		C		D	
指标	**Pair**	W	**p值**	W	**p值**	W	**p值**	W	**p值**
恶心	视频透视 vs.虚拟现实	5	0.059	8.5	0.129	0	0.016*	31	0.569
眼动	视频透视 vs.虚拟现实	10.5	0.007**	12	0.007**	8.5	0.032*	31	0.340
定向障碍	视频透视与虚拟现实	1	<0.001***	6	0.027*	7.5	0.009**	50	0.599
总分	视频透视 vs. 虚拟现实	9	0.004**	11.5	0.006**	8	0.012*	49	0.348

表7：使用 Bonferroni校正对模拟器晕动症问卷进行的威尔科克森符号秩检验：每种**显示** 方式下**有效分辨率**内的所有配对。绿色的p值带有“*”至“***”，分别表示校正后显著性水平为 .05、.01 和 .001。

3.4 参与者与设备

我们招募了 16 名参与者（8 名男性、8 名女性），年龄为 18–32 岁（$M = 25.06$、 $SD = 3.53$）。这些实验被归类为低风险研究，遵守大学的伦理准则和规定，并获得大学伦理委员会批准。所有参与者均为自愿参加，提供了知情同意，且视力正常或矫正后达到正常水平。所有参与者均为中文母语者，具有专业的学术英语口语能力。实验环节在一间温度恒定、亮度正常的封闭实验室内进行。

我们使用了一款高端头戴式显示器 Varjo XR-4 Focal Edition，其虚拟现实模式为 55 每度像素数，视频透视模式为 51 每度像素数，并将其连接到一台配备 32 GB 随机存取存储器、GeForce RTX 5080 图形处理器和 Intel Core i9-14900KF 中央处理器的台式电脑。二维 XR-Read 应用程序运行于一部 Android 智能手机 OnePlus 7T Pro 上，该手机配有 6.67 英寸显示屏、 1440×3120 像素，屏幕比例为 19.5:9，像素密度为 516 每英寸像素数（实验期间设为最高亮度）。其像素密度高于 MNREAD 推荐的 iPad 3（264 每英寸像素数）

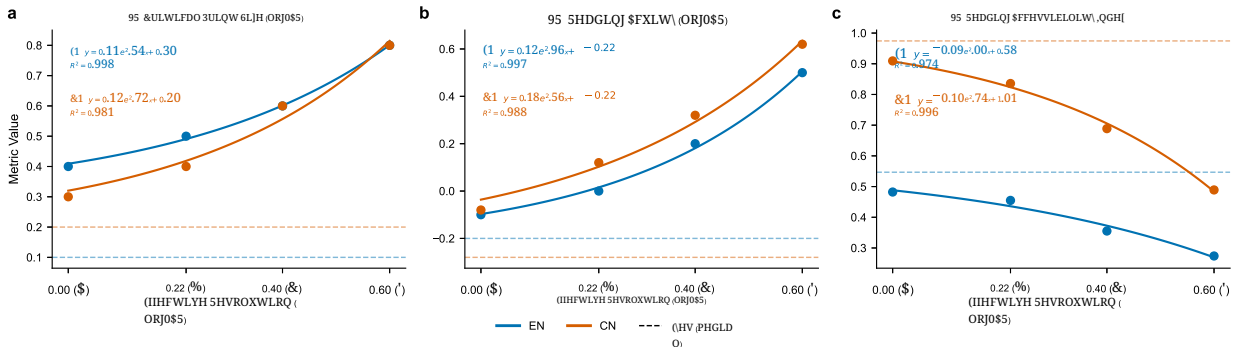


图6：虚拟现实条件下，CPS、阅读准确率和 RAI（中位数）随有效分辨率（logMAR）变化的指数拟合。

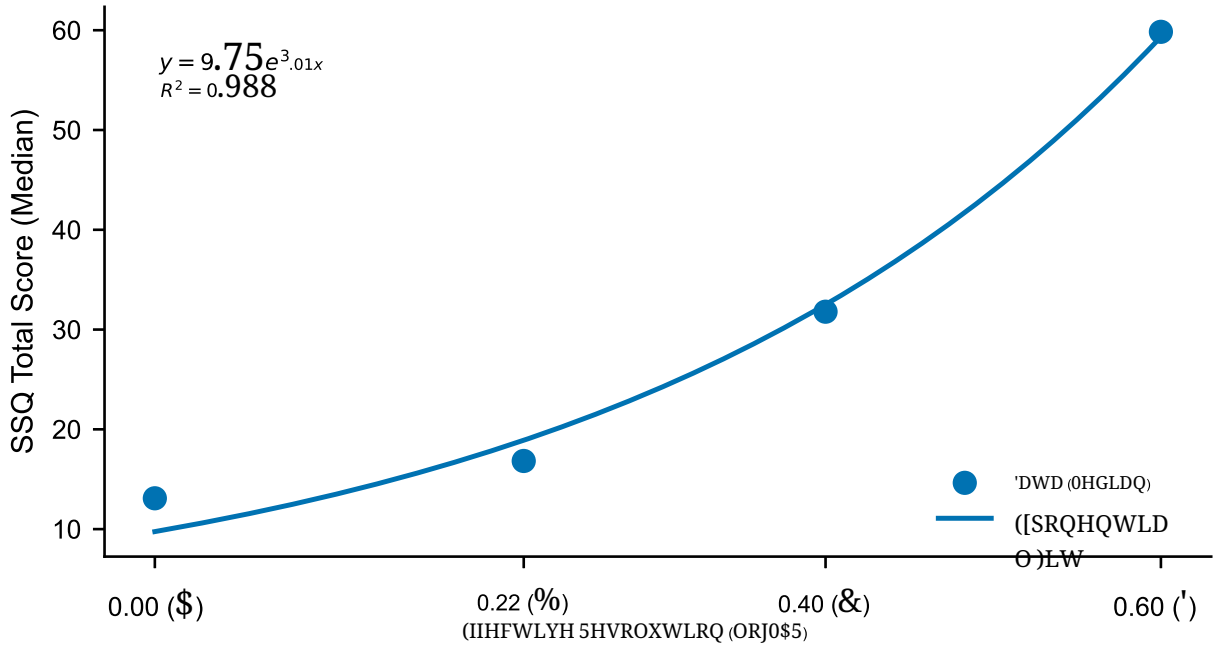


图7：模拟器晕动症问卷总分的指数拟合：虚拟现实条件下的模拟器晕动症问卷总分（中位数）随有效分辨率（logMAR）的变化。

iPad 应用程序在 40 厘米处可提供 -0.5 至 1.0 最小分辨角对数的范围（16 个句子，步进为 0.1 最小分辨角对数）。使用下巴托以保持 40 厘米的观看距离。

3.4.1 虚拟现实与视频透视中的有效分辨率校准

我们对虚拟现实和视频透视条件下的有效分辨率进行了校准，使两种条件都采用统一的 logMAR 标度。视频透视中的图像质量固定，不受渲染分辨率缩放影响。因此，我们将试镜片安装在摄像头前，以引入可控的光学模糊，随后使用翻转 E 字视力表测量实际视力。该流程得出了四个参考等级：0.00 logMAR（无镜片）、0.22 logMAR（简写为 0.2）（-4.00 屈光度（D））、0.40 logMAR（-5.00 D）和 0.60 logMAR（-6.00 D）。根据一项使用相同视力表测试视频透视头戴式显示器的研究，0.60 logMAR 等级接近当前消费级视频透视头戴式显示器（即 Quest Pro、HTC Vive XR、Pico 4 Pro）报告的视敏度中位数[14]。

对于虚拟现实，我们改变了 Unity XR 中的渲染分辨率比例（0.10、0.40、0.70、1.00），并使用 OVVA 测试测量中心视力。我们采用对数回归描述比例 x 与视力 y（最小分辨角对数）之间的关系：$y = -0.2796\ln(x) - 0.0232$。利用该函数，我们确定了对应于四个目标视力水平的比例，将 $y \in \{0.00, 0.22, 0.40, 0.60\}$ 映射到 $x \approx \{0.92, 0.42, 0.22, 0.11\}$（见图3）。

总之，VST 条件通过光学模糊产生，虚拟现实条件通过渲染缩放产生；两者均以同一组最小分辨角对数值表示，从而能够在不同显示模式之间进行直接比较。

3.5 结果

综合各项分析，有效分辨率会显著影响阅读表现和不适症状，其影响在虚拟现实中比在视频透视中更大且更一致；语言（中文与英文）和显示模式（虚拟现实与视频透视）也各自带来了其他受分辨率影响的差异。由于数据分布不符合正态分布，所有数据均采用非参数方法分析。对于包含 $k \geq 3$ 个水平的因素（例如有效分辨率 A–D），我们采用弗里德曼检验，并进行威尔科克森符号秩事后比较和Bonferroni校正；对于 $k = 2$ 个因素（例如显示 和语言：中文与英文），我们采用威尔科克森符号秩检验。在条件允许时，我们报告效应量，并使用 W 衡量弗里德曼检验的效应大小。

3.5.1 有效分辨率对阅读表现的影响

就不同有效分辨率下的阅读表现而言，分辨率变化会显著影响表现，尤其是在虚拟现实中。弗里德曼检验表明，虚拟现实中的几乎所有指标（准确率、CPS、MRS和阅读准确率）都会随分辨率显著变化（英语平均阅读速度是唯一例外），效应量为中到大；在视频透视中，效应较弱，但所有指标的变化仍具有显著性，效应量为小到中（见表1）。

事后检验明确显示出单调趋势：在虚拟现实中，随着分辨率降低，准确率下降，而CPS和阅读准确率上升（A→D）；视频透视也呈现出相同的定性模式，但显著的成对差异更少，最明显的是将分辨率最差的水平（D）与较高质量的水平（A–C）区分开来（见表2、表3和图4）。相较于裸眼表现中位数，MRS与其最为接近；而其他指标在大多数分辨率下通常更差，仅在最佳水平（A）下接近肉眼表现（图4）。

3.5.2 显示模式比较与语言效应

对于显示模式差异（虚拟现实与视频透视），在匹配的最小分辨角对数下，视频透视在多项结果指标上的表现低于虚拟现实。Wilcoxon对比显示，在多个分辨率下，视频透视的CPS、阅读准确率和准确率显著较差；对于中文，MRS也出现特异性下降（表4，右侧部分）。
对于语言差异（中文与英文），在所有分辨率下，中文在关键指标上的阅读结果均优于英文。Wilcoxon检验显示，在每个分辨率下，中文的准确率均显著更高，且MRS更优（数值更低）（均为$p < .001$）（表4，左侧部分）。

3.5.3 模拟器晕动症问卷结果

分辨率降低会加重SSQ评分，尤其是在虚拟现实中。弗里德曼检验显示，在虚拟现实中，分辨率对恶心、眼动、定向障碍和总分有显著影响；在视频透视中，分辨率对恶心、眼动和总分有显著影响（但对定向障碍没有显著影响）（表5）。事后比较发现，随着分辨率降低，多个成对比较呈现显著上升趋势；大多数差异出现在A与B的对比之外（表6）。

3.5.4 有效分辨率的指数建模

指数模型能够很好地拟合虚拟现实中的分辨率依赖关系，表明随着有效分辨率提高，眼睛表现会迅速改善。具体而言，CPS随最小分辨角对数增加而提高（英文：$y = 0.1091\,e^{2.5400x} +$ ，；中文：，），0.3000 $R^2 = .9981$ $y = 0.1202\,e^{2.7200x} + 0.2000$ $R^2 = .9807$ $y =$ 阅读准确率呈指数增长（英文：$0.1228\,e^{2.9600x} - 0.2200$ $R^2 = .9970$ $y = 0.1838\,e^{2.5600x} - 0.2200$ $R^2 = .9880$ ，；中文：，），准确率呈指数下降（英文：$y = -0.0942\,e^{2.0000x} + 0.5822,\ \ R^2 = .9739$；中文：$y = -0.1015\,e^{2.7400x} + 1.0093,\ \ R^2 = .9956$）。尽管在较高分辨率下，CPS、阅读准确率和准确率渐近趋近于眼睛表现，但即使是A级，表现仍明显逊于肉眼（图6）。

虚拟现实模拟器晕动症问卷总分的指数模型证实，随着分辨率下降，不适迅速加剧（$y = 9.7505\,e^{3.0099x}$，$R^2 =$。988），并表明即使在最佳分辨率（A）下，仍会出现非零的模拟器晕动症症状（图7）。直接比较虚拟现实与视频透视发现，在多种分辨率下，视频透视的眼动、定向障碍和总分始终较高（表7）。

3.5.5 定性发现

我们在研究结束时进行了简短的半结构化访谈，以记录文字变得无法辨认时，参与者在虚拟现实和视频透视中的主观体验。总体而言，参与者报告了一系列一致的感知、生理和情绪反应；随着有效分辨率从 A 降至 D，这些反应也逐渐加剧。参与者经常描述闪烁、文字

闪烁、抖动/振荡、难以聚焦，以及偶尔出现的重影/鬼影。几位参与者将严重模糊的文字比作“马赛克”。随着模糊程度加深，字母被感知为跳动、缩小，或消失在远处。许多人提到文字呈现出像素化 或像素密度不足的感觉（在虚拟现实中更为明显）。此外，参与者报告了眼疲劳、因眨眼减少而导致的干涩、头痛和头晕；有些人在最严重的程度下还提到恶心 。几位参与者描述了眯眼 或想要揉眼睛的感觉。
对许多参与者而言，整体上虚拟现实略胜一筹；因为在视频透视模式下，小尺寸手机屏幕和难以聚焦使疲劳感和费力感更为明显，有时甚至让人觉得“更累”，尽管渲染伪影较少。有效分辨率越差，症状和负面情绪越明显。访谈结果在定性上与模拟器晕动症问卷的模式一致：随着有效分辨率下降，眼动疲劳、定向障碍/头晕和恶心都会加重；伪影（闪烁、像素化、闪烁）在虚拟现实中更为明显，而小尺寸显示屏和难以聚焦所致的疲劳在视频透视模式下更为明显。参与者的应对行为（眯眼、减少眨眼）可能是观察到的模拟器晕动症问卷评分上升的原因之一。

4 讨论

我们的研究旨在量化端到端有效分辨率（以最小分辨角对数表示）对扩展现实中的功能性阅读表现和舒适度的影响。在此，我们将结合三个研究问题来解读结果。

4.1 RQ1：有效分辨率如何调节阅读表现?

在两种语言和显示模式下，将有效分辨率从 0。0 降至 0。6 最小分辨角对数，会使所有阅读结果发生显著变化（图4、表1、表2、表3）。在虚拟现实中，这些影响幅度较大且高度可靠：随着最小分辨角对数增大，CPS 和阅读准确率急剧上升，而准确率下降；指数模型拟合效果极佳（图6）。值得注意的是，虚拟现实中的英语平均阅读速度未达到显著水平，这表明阅读速度相对稳定，直到清晰度低于某个阈值，此后 CPS/RA 才成为限制因素。

有两个规律值得注意。首先，即使在有效分辨率最佳的条件下（A：0 最小分辨角对数），性能也未完全达到裸眼基线（图6）。这一残余差距可能反映了在名义清晰度较高时仍然存在的扩展现实特有因素（例如光学系统、时间伪影、双眼对准/集合需求以及字体栅格化差异）。其次，虚拟现实中的性能随分辨率变化平滑且可预测。指数拟合提供了参考曲线，可将目标最小分辨角对数映射至预期的 CPS/RA/准确率范围，从而为字体尺寸和渲染预算的前向设计提供依据。

4.2 RQ2：这些效应能否推广至不同显示模式和语言?

我们的结果证实，这些效应能推广至不同显示模式和语言。就显示模式而言，在最小分辨角对数相匹配时，VST 在若干指标上（CPS、阅读准确率、准确率；以及多个分辨率等级下中文的 MRS）仍逊于 VR（表 4）。因此，分辨率可以解释大部分但并非全部差异：VST 流程会引入额外损失（相机光学系统、传感器噪声/锐化、色调映射、视图稳定、采集—显示延迟），而这些因素无法仅凭视敏度来衡量。实际上，这意味着，在 VST 中达到特定的最小分辨角对数目标是必要的，但未必足以实现与 VR 相当的可读性和舒适度；设计者需要考虑 VST 中视敏度水平之外的额外性能损失。

就语言而言，这些效应的方向在英语和中文中是一致的，但绝对水平有所不同。在所有分辨率下，中文的 MRS 和准确率均较高（均为 $p < .001$），且随分辨率变化的斜率相似。由于参与者是中文母语者，且英语熟练度达到专业水平，我们主要将语言差异解释为读者熟练度效应。推广性方面的关键结果是，两种语言呈现出相同的函数形式：无论使用哪种语言，较差的最小分辨角对数都会稳定地提高 CPS/阅读准确率并降低准确率。

4.3 研究问题3：如何 有效分辨率与模拟器晕动症有何关联，实际运行点应设在哪里 ?

随着最小分辨角对数（logMAR）变差，SSQ评分急剧上升，在虚拟现实（VR）中尤为明显：总分呈指数级上升，且拟合效果极佳（图7、表5、表6）。事后检验显示，相邻分辨率等级之间的许多成对比较均呈现显著上升，这表明分辨率降低时，舒适度会迅速下降。在多个分辨率下，视频透视（VST）的眼动、定向障碍和总分均高于VR（表7），这与额外的摄像头/显示处理开销相符。
综合考察性能和模拟器晕动症问卷的趋势，可以发现清晰度临界点接近 **0 最小分辨角对数**（正常视力）。当清晰度达到这一水平或更高时，阅读表现接近肉眼水平，模拟器晕动症缓慢加重；而当清晰度较低时，更大的损失会使性能和舒适度都付出高昂代价。即使是最佳有效分辨率（0

最小分辨角对数）也会产生非零的模拟器晕动症，这凸显了清晰度是影响舒适度的重要因素，但并非唯一决定因素。定性报告中提到的闪烁、闪烁、振荡和用力感，与眼动和定向障碍的增加相一致，这表明缺陷以及调节／辐辏压力会叠加降低空间保真度所带来的影响。

W我们将在以下部分汇总基于这些发现提出的所有可执行建议 on.

5 设计与评估启示

Bas基于这些发现，我们为 XR 头戴式显示器及其应用提出四项关键设计原则 .

1. **清晰度基线与目标**。 将有效分辨率（最小分辨角对数）作为首要调节参数，并将 **0 最小分辨角对数** （正常视力）设为持续进行生产力级阅读的基线要求。达到或超过这一清晰度时，阅读表现接近肉眼水平，模拟器晕动症的加剧程度较轻；清晰度较差则会显著损害性能和舒适度。设计人员可利用拟合的参考曲线，在设置字体尺寸和渲染预算时，根据目标最小分辨角对数估算预期阅读表现。2. **针对模式的预算（VST 与虚拟现实）**。 按最小分辨角对数进行匹配是必要条件，但对于 VST 而言还不够。VST 流程（相机光学系统、传感器噪声／锐化、色调映射、采集—显示延迟）会带来仅凭视敏度无法体现的损失。若要在 VST 中实现与虚拟现实相当的可读性和舒适度，**应预留额外余量，并将目标设为 ≤ 0 最小分辨角对数或更低**。3. **跨模式质量保证（质量保证）**。 在最小分辨角对数相同的条件下，分别验证虚拟现实和 VST 中的可读性与模拟器晕动症；不要假定两者等效。将 XR-Read 测试纳入回归测试，并在跟踪模拟器晕动症的同时，记录阅读表现（CPS、阅读准确率、准确率、MRS）。使用最小分辨角对数匹配的测试点，分离 VST 中非视敏度因素造成的损失。4. **舒适度预算**。 可读并不意味着舒适。规划实验环节时长、布局密度和运动／动画速率时，应将模拟器晕动症随最小分辨角对数增加的程度视为成本函数。在质量保证过程中，针对预期运行时的最小分辨角对数，为模拟器晕动症量表设定验收范围，并检查缺陷（闪烁／闪烁／振荡）。

6 局限性与未来工作

解读我们的研究发现时，应考虑若干局限性。参与者（N=16）均为 18–32 岁的年轻成年人，都是中文母语者，且英语熟练度达到专业水平。语言效应可能反映了熟练度的影响；其结果能否推广至其他人口统计群体、年龄组和临床人群，仍有待检验。

我们的结果基于一款高端头戴式显示器（Varjo XR-4 Focal Edition）以及一部用于视频透视下二维 XR-Read 的手机。虽然我们对两种模式进行了校准，使其最小分辨角对数相匹配，但设备特定的调制传递函数和渲染策略所产生的影响仍有待检验。优先事项之一是在不同头戴式显示器、光学系统和渲染管线中重复验证。我们通过在摄像头前放置外部试镜片来控制视频透视的清晰度。虽然这样能够获得经过校准的视敏度水平，但产生的模糊与原生视频透视的局限性（如传感器噪声、去马赛克和滚动快门）并不相同。未来的研究应结合光学退化与电子退化，并纳入直视式透视管线。XR-Read 使用 MNREAD/C-READ 句子并进行限时阅读。现实世界中的生产力任务涉及多种文本（浏览器、代码、电子表格、长篇文章）和交互方式（滚动、头部／眼部运动）。将研究扩展至动态布局、不同字体／文字系统、对比度和亮度操控，以及更长的实验环节，将有助于提升效度。未来我们还计划拓宽语言／文字系统覆盖范围和熟练度水平，并将 XR-Read 集成到扩展现实应用／硬件中。

7 结论

在本研究中，我们推出了*XR-Read*，这是一项可切换语言的阅读视力测试，可在统一的 logMAR 标度上校准并操控虚拟现实和 VST 中的有效分辨率。通过一项被试内研究（$N = 16$），我们发现，降低有效分辨率会系统性地减慢阅读速度（MRS）、增大临界字体大小和视力阈值（CPS、RA）、降低可访问性（准确率）并加重模拟器晕动症。这些影响在不同显示模式和语言下呈现一致且往往呈指数变化的规律；VST 带来了额外的不利影响，而语言熟练度则影响总体表现。

结合广义参考曲线，我们的结果凸显了正常视力（0 最小分辨角对数）作为实用基线的重要性：清晰度达到或优于这一水平时，阅读表现接近裸眼水平，模拟器晕动症也较轻；而清晰度较差时，两者都会迅速恶化。因此，我们将有效分辨率视为提升 XR 可用性的关键系统级杠杆，并建议将 ≤ 0 最小分辨角对数作为面向

日常文本密集型使用的 XR 系统的设计要求。设计者应为视频透视特有的性能损失留出余量，并通过可重复、考虑语言特性的测试验证是否达到这一门槛。这些发现为打造适用于日常阅读和工作的 XR 平台确立了可操作的目标。

参考文献

[1] Minna Vasarainen、Sami Paavola 和 Liubov Vetoshkina。关于扩展现实：工作生活中的虚拟现实、增强现实和混合现实的系统文献综述。《国际虚拟现实期刊》，21(2):1–28，2021年。[2] Gustavo Camargo Domingues、Vitor Vieira、Leina Yoshida、Leticia de Oliveira、Fabiana Peres、Claudio Mauricio、Fatima Nunes、João Marcelo Teixeira 和 Amadeo Neto。如果视频透视改变头戴式显示器中的任务执行准确率，会怎样？载于第*26*届虚拟与增强现实研讨会论文集，SVR '24，第213–222页，美国纽约州纽约市，2024年。美国计算机协会。ISBN 9798400709791。doi:10.1145/3691573.3691599。URL https://doi.org/10.1145/3691573.3691599。[3] Cameron Grout、William Rogers、Mark Apperley 和 Steve Jones。在沉浸式头戴显示器中阅读文本：在三维虚拟环境中显示台式电脑界面的研究。载于第*15*届新西兰人机交互会议论文集，第9–16页，2015年。[4] Pascal Knierim、Thomas Kosch、Johannes Groschopp 和 Albrecht Schmidt。便携式虚拟现实中的文本输入：机遇与挑战。载于*2020*年计算机系统中的人为因素会议扩展摘要，CHI EA '20，第1–8页，美国纽约州纽约市，2020年。美国计算机协会。ISBN 9781450368193。doi:10.1145/3334480.3382920。URL https://doi.org/10.1145/3334480.3382920。[5] Tanja Koji´c、Danish Ali、Robert Greinacher、Sebastian Möller 和 Jan-Niklas Voigt-Antons。虚拟现实中的阅读用户体验——文本距离、大小和对比度的取值研究。载于*2020*年第十二届多媒体体验质量国际会议（*QoMEX*），第1–6页，2020年。doi:10.1109/QoMEX48832.2020.9123091。[6] Jessica de Souza 和 Robert Tartz。视频透视头戴式显示器中的视觉感知与用户满意度：混合方法评估。《虚拟现实前沿》，5:1368721，2024年。doi:10.3389/frvir.2024.1368721。[7] Jan-Philipp Stauffert、Florian Niebling 和 Marc Erich Latoschik。延迟与晕动症：影响、原因及测量方法——综述。《虚拟现实前沿》，1:582204，2020年。doi:10.3389/frvir.2020.582204。[8] Stephen Palmisano、Renata Mursic 和 Juno Kim。头戴式显示器中的晕动症由用户虚拟与物理头部姿态之间的差异引起。《虚拟现实前沿》，1:587698，2020年。doi:10.3389/frvir.2020.587698。[9] David M. Hoffman、Ahna R. Girshick、Kurt Akeley 和 Martin S. Banks。辐辏—调节冲突阻碍视觉表现并导致视觉疲劳。《视觉期刊》，8(3):33，2008年。doi:10.1167/8.3.33。[10] Takashi Shibata、Joohwan Kim、David M. Hoffman 和 Martin S. Banks。舒适区：利用立体显示器预测视觉不适。《视觉期刊》，11(8):11，2011年。doi:10.1167/11.8.11。[11] Alexis D Souchet、Stéphanie Philippe、Domitile Lourdeaux 和 Laure Leroy。通过眼动追踪测量使用虚拟现实头戴式显示器学习时的视觉疲劳和认知负荷：综述。《国际人机交互期刊》，38(9):801–824，2022年。[12] Austin Erickson、Kangsoo Kim、Gerd Bruder 和 Gregory F. Welch。暗色模式图形对使用虚拟现实头戴式显示器时视力和疲劳的影响。载于*2020*年*IEEE*虚拟现实与三维用户界面会议（*VR*），第434–442页，2020年。doi:10.1109/VR46266.2020.00064。[13] Jiawei Lu、Trisha Lian 和 Jerry Jia。高分辨率虚拟现实与增强现实中的显示与成像系统清晰度建模及需求。《电子成像》，35(12):211–213，2023年。[14] Jialin Wang、Rongkai Shi、Xiaodong Li、Yushi Wei 和 Hai-Ning Liang。全向虚拟视力：面向用户的虚拟现实头戴式显示器与环境视觉清晰度指标。*IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*，30(5):2033–2043，2024年。doi:10.1109/TVCG.2024.3372127。[15] Maliha Ashraf、Alexandre Chapiro 和 Rafał K Mantiuk。人眼分辨率极限——我们能看见多少像素？《自然·通讯》，16(1):9086，2025年。[16] Andrew F Monk。人机交互基础。学术出版社，2014年。[17] Virginia Clinton。纸张阅读与屏幕阅读的比较：系统综述与荟萃分析。《阅读研究期刊》，42(2):288–325，2019年。ISSN 14679817。doi:10.1111/1467-9817.12269。[18] Gordon E Legge。正常视力与低视力阅读心理物理学。CRC 出版社，2006年。

[19] Gordon E. Legge、Julie A. Ross、Angela Luebker 和 John M. LaMay。阅读心理物理学。第VIII部分：明尼苏达低视力阅读测试。《验光与视觉科学》，66(12):843–853，1989年。[20] J. Stephen Mansfield、Sonia J. Ahn、Gordon E. Legge 和 Andrew Luebker。适用于正常视力和低视力的新阅读视力表。载于视觉系统的无创评估（*NAVS 1993*），《Optics InfoBase会议论文集》，第232–235页。Optica出版集团，1993年。[21]Gary S. Rubin。阅读表现的测量。《视觉研究》，90:43–51，2013年。doi:10.1016/j.visres.2013.02.015。[22] Aurélie Calabrèse、Cynthia Owsley、Gerald McGwin 和 Gordon E. Legge。使用MNREAD视力图表开发阅读可访问性指数。《美国医学会杂志·眼科学》，134(4):398–405，2016年。doi:10.1001/jamaophthalmol.2015.6097。[23] Kurtis Weir、Fernando Loizides、Vinita Nahar、Amar Aggoun 和 Andrew Pollard。我看见，所以我阅读：通过沉浸式虚拟现实提升视力障碍人士的阅读能力。《信息社会的普遍可及性》，22(2):387–413，2023年。[24] Qi-Ming Han、Lin-Juan Cong、Cong Yu 和 Lei Liu。开发对数式中文阅读视力表。《验光与视觉科学》，94(6):714–724，2017年。doi:10.1097/OPX.0000000000001081。[25] Aurelie Calabrese、Long To、Yingchen He、Elizabeth Berkholtz、Paymon Rafian 和 Gordon E Legge。比较使用MNREAD iPad应用程序与MNREAD视力图表时的表现。《视觉期刊》，18(1):8，2018年。[26] Gaurav Chaurasia、Arthur Nieuwoudt、Alexandru-Eugen Ichim、Richard Szeliski 和 Alexander Sorkine-Hornung。透视+：面向移动混合现实的实时立体视图合成。《美国计算机协会计算图形学与交互技术论文集》，3(1)，2020年。doi:10.1145/3384540。URL https://doi.org/10.1145/3384540。[27] Daniel Pohl、Gregory S. Johnson 和 Timo Bolkart。适用于广角头戴式显示器的改进预畸变。美国计算机协会虚拟现实软件与技术研讨会论文集，*VRST*，2(2):259–262，2013年。doi:10.1145/2503713.2503752。[28] Andrew Carkeet、Lucas Lister 和 Yee Teng Goh。电脑显示器像素化与兰多尔特环视力。《眼科与生理光学》，41(6):1176–1182，2021年。ISSN 14751313。doi:10.1111/opo.12882。[29] Lei Xiao、Salah Nouri、Joel Hegland、Alberto Garcia Garcia 和 Douglas Lanman。NeuralPassthrough：用于虚拟现实的学习式实时视图合成。载于*ACM SIGGRAPH 2022*会议论文集，SIGGRAPH '22，美国纽约州纽约市，2022年。美国计算机协会。ISBN 9781450393379。doi:10.1145/3528233.3530701。URL https://doi.org/10.1145/3528233.3530701。[30] Josephine P. Y. Cheung、Dilys S. K. Liu、Catherine C. C. Lam 和 Allen M. Y. Cheong。面向儿童的新中文阅读图表的开发与验证。《眼科与生理光学》，35(5):514–521，2015年。doi:10.1111/opo.12228。[31] J Stephen Mansfield、Nilsu Atilgan、A M Lewis 和 G E Legge。扩展MNREAD句子语料库：用于测量阅读视觉表现的计算机生成句子。《视觉研究》，158:11–18，2019年。[32] Markku Kilpeläinen 和 Jukka Häkkinen。一种用于测量XR设备文本易读性的有效方法揭示了三种设备之间的明显差异。《虚拟现实前沿》，4:1243387，2023年。doi:10.3389/frvir.2023.1243387。[33]Johannes Novotny 和 David H. Laidlaw。评估虚拟现实场景和三维粒子可视化中的文本阅读速度。*IEEETransactions on Visualization and ComputerGraphics*，30(5):2602–2612，2024年。doi:10.1109/TVCG.2024.3372093。[34] Francesco Vona、Julia Schorlemmer、Michael Stern、Navid Ashrafi、Maurizio Vergari、Tanja Kojic 和 Jan-Niklas Voigt-Antons。混合现实设备透视画面质量的比较：真实世界任务中的用户体验研究。载于*2025*年*IEEE*虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（*VRW*），第1432–1433页，2025年。doi:10.1109/VRW66409.2025.00362。[35] Robert S. Kennedy、Norman E. Lane、Kevin S. Berbaum 和 Michael G. Lilienthal。模拟器晕动症问卷：量化模拟器晕动症的改进方法。《国际航空心理学杂志》，3(3):203–220，1993年。[36] Dimitrios Saredakis、Ancret Szpak、Brandon Birckhead、Hannah A. D. Keage、Albert Rizzo 和 Tobias Loetscher。头戴式显示器中虚拟现实眩晕的相关因素：系统综述与荟萃分析。《人类神经科学前沿》，14:96，2020年。doi:10.3389/fnhum.2020.00096。[37] Ajoy S. Fernandes 和 Steven K. Feiner。通过细微的动态视场角调整缓解虚拟现实眩晕。*2016*年*IEEE*三维用户界面研讨会，*3DUI 2016*—论文集，第201–210页，2016年。doi:10.1109/3DUI.2016.7460053。

[38] Jialin Wang、Rongkai Shi、Wenxuan Zheng、Weijie Xie、Dominic Kao 和 Hai-Ning Liang。虚拟现实中帧率对用户体验、性能和模拟器晕动症的影响。*IEEE Transactionson Visualizationand Computer Graphics*，29(5):2478–2488，2023年。[39] Jack T Holladay。视力测量。*Journal of Cataract & Refractive Surgery*，30(2):287–290，2004年。[40] Tian Cheng、Taikang Yao、Boxuan Xu、Wanwei Dai、Xuejiao Qin、Juan Ye、Lingge Suo 和 Chun Zhang。使用 C-READ 作为便携式设备评估中国年轻成年人的阅读能力：一项观察性研究。*Journal of Personalized Medicine*，13(3):463，2023年。[41] Karthikeyan Baskaran、Antonio Filipe Macedo、Yingchen He、Laura Hernandez-Moreno、Tatiana Queirós、J Stephen Mansfield 和 Aurélie Calabrèse。阅读参数评分：使用 MNREAD视力表进行的一项评定者间信度研究。*PloS one*，14(6):e0216775，2019年。[42] Ying-Zi Xiong、Ethan A Lorsung、John Stephen Mansfield、Charles Bigelow 和 Gordon E Legge。为黄斑变性设计的字体：对阅读的影响。*Investigative ophthalmology& visual science*，59(10):4182–4189，2018年。[43] Aurélie Calabrese、Allen M Y Cheong、Sing-Hang Cheung、Yingchen He、MiYoung Kwon、J Stephen Mansfield、Ahalya Subramanian、Deyue Yu 和 Gordon E Legge。正常视力受试者从儿童期到老年期的 MNREAD基线测量。*Investigativeophthalmology & visual science*，57(8):3836–3843，2016年。

作者贡献声明

J.W. 提出了该项目，J.W.、X.C 和 B.H. 设计了实验。J.W.、X.C 和 B.H. 设计了心理物理学研究，并在 H.L. 的监督下开展了实验。J.W. 分析了结果，并在所有作者的反馈下制作了图表。所有作者均参与了稿件的撰写和审阅。