arXiv:2302.03623v1 [cs.HC] 7 Feb 2023

在虚拟现实培训中增加物理真实感能否减少时间压缩?

Kadir Lofca* Jason Jerald†计算机科学系
NextGen Interactions 北卡罗来纳大学格林斯伯勒分校

Dalton Costa‡计算机科学系 北卡罗来纳大学格林斯伯勒分校

Regis Kopper§计算机科学系 北卡罗来纳大学格林斯伯勒分校

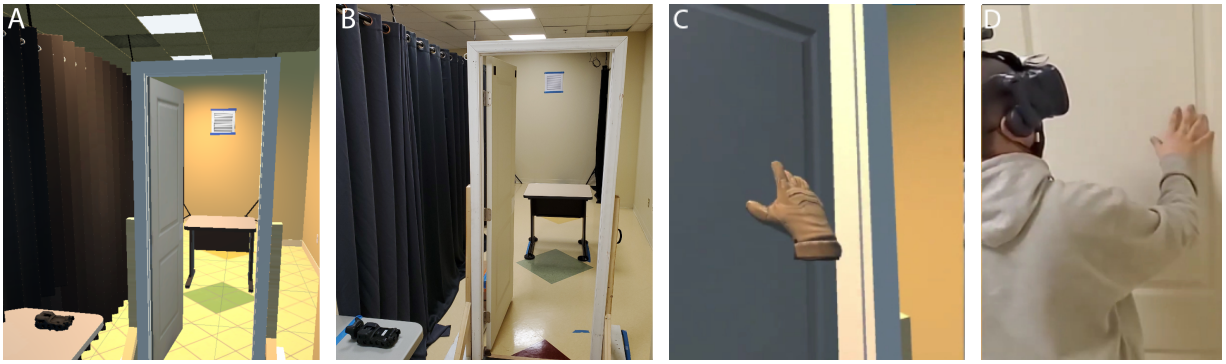


图 1：危险品培训的虚拟环境与真实环境。虚拟环境被建模为真实环境的精确复制品。在高物理真实感虚拟现实条件下，用户拿起一个真实的气体监测仪道具（左下方的 B），该道具会被追踪，并与其虚拟对应物（左下方的 A）配准。追踪手部映射为虚拟手部，用户推动一扇真实的追踪门（D），并使其虚拟对应物（C）同步动画。

摘要

众所周知，虚拟现实（VR）会导致“时间压缩”效应，即人在虚拟现实中度过的时间感觉上比实际经过时间更快。我们的研究旨在探究：对于需要精确时间估计的气体监测培训任务，VR体验的物理真实感是否会减弱时间压缩效应。我们在一个具有高度物理真实感的VR任务中使用实体道具和被动触觉，并将其与仅包含虚拟物体的等效标准虚拟现实任务进行比较。我们还使用了一个完全相同的现实世界任务，作为基线时间估计任务。每种情境都包括以下内容：用户拿起设备、打开一扇门、穿过有障碍物的走廊、进行五次简短的时间估计，以及估计从任务开始到结束的总时间。与先前研究相反，所有实验条件（包括现实世界）均持续呈现时间膨胀效应。然而，在比较高物理真实感和低物理真实感条件下的估计差异时，并未发现显著影响。我们讨论了结果的意义和研究局限性，并提出了未来的研究方向，以更好地回答这一虚拟现实培训领域的重要问题。

索引词： 以人为中心的计算—时间感知—虚拟现实；以人为中心的计算—人机交互（HCI）—交互设备—触觉设备。

1 引言

危险品（HAZMAT）处理技术人员需要应对各种紧急情况，此时他们对时间的知觉对于行动能否成功至关重要。一个典型场景是识别燃气泄漏。为了准确识别潜在的燃气泄漏，危险品处理技术人员必须将监测工具放在潜在泄漏源附近，并保持足够长的时间。若监测工具停留的时间不够长，可能会导致泄漏未被发现，进而造成严重甚至致命的后果。与此同时，导致严重燃气泄漏的紧急呼叫并不常见[1],因此，危险品处理技术人员在真实紧急情况下获得的实践经验很少。与基于虚拟现实的培训相比，采用课堂教学和现实模拟练习的传统培训可能效果较差；在基于虚拟现实的培训中，用户可以实时获得视觉反馈，了解可能被遗漏的泄漏情况。

然而，虚拟现实会产生一种众所周知的时间压缩 效应，即用户在虚拟现实中的时间知觉会比实际经过的时间更短 [11, 15]。换句话说，与看电影或玩电子游戏类似，虚拟现实会让用户觉得时间过得更快。因此，在测量时间对学习某项任务至关重要的情境中（例如燃气监测），这种时间压缩效应可能会导致负面结果。举例来说，危险品处理技术人员学员可能会在虚拟现实中学到，他们认为足以检测气体泄漏的时间（比如 30 秒）实际上短了（比如只有 25 秒）。这可能导致他们在现实情境中无法成功执行任务。

因此，本研究的目标是量化虚拟现实中不同实验条件下的时间估计，并将其与现实世界中的等效任务进行比较 [9]。接下来，我们将讨论有关培训、实体道具与被动触觉，以及时间知觉和时间估计的相关虚拟现实文献。

*电子邮箱：k_lofca@uncg.edu
†电子邮箱：jason@nextgeninteractions.com
‡电子邮箱：dbcosta@uncg.edu §
电子邮箱：kopper@uncg.edu

[1]2010年至2020年间，美国每年甲烷气体泄漏的平均次数约为 230 [3], 。此类泄漏对环境和安全的影响很大，但发生频率较低，因此大多数应急响应人员很少接到涉及泄漏的紧急呼叫

1.1 虚拟现实培训

与其他形式的计算机界面不同，虚拟现实能够将详细的人体运动直接映射到虚拟环境中，并营造出高度逼真的体验。结合不断提升的计算机图形学质量，虚拟现实能够模拟栩栩如生的体验。基于虚拟现实的培训在需要重新创建特定场景、但成本高昂、存在风险或不便的领域中日益普及，例如微创医疗操作 [1], 、军事 [13], 和公共安全 [5]。

在学习理论中，错误暴露训练是指在培训过程中利用学员所犯的错误，为其提供绩效反馈，作为教育体验的一部分 [14]。事实上，研究表明，从错误中学习比从成功中学习更有效 [7]。在气体监测任务中，需要检测不可见但致命的气体；如果受训的危险品处理技术员未能在某些区域停留足够长的时间进行监测，就构成了错误。虚拟现实气体监测培训工具可以通过直观显示受训者遗漏的不可见气体所在位置，提供错误暴露训练。图 2 展示了一种市售气体监测培训工具的事后回顾系统示例，其中显示了不同气体的位置和浓度，以及读数完整性。



图 2：一次气体监测培训的事后回顾，其中可视化呈现了不可见气体（红色和绿色体积区域），并显示监测仪的行进路径、监测位置以及读数完整性。截图由 NextGen Interactions 提供 [12]。

1.2 实体道具与被动触觉

典型的虚拟现实设备由一台头戴式显示器（HMD）和两个控制器组成，分别代表用户的头部和双手。控制器能够追踪用户手部的位置和方向，但其外形规格固定。用户可以通过控制器与虚拟物体和设备交互，这些控制器在虚拟现实中以虚拟手部呈现，但用户无法感受到这些道具的形状和重量。缺乏触觉会降低沉浸感，可能导致临场感中断，并将体验限制在听觉和视觉通道。只要使用标准虚拟现实控制器，这一问题就会存在。实体道具是虚拟现实中的真实物体，它们经过追踪，并与通过头戴式显示器呈现的数字孪生对应物进行配准 [4]。只要能够追踪用户的双手，用户就可以通过在虚拟环境中呈现道具完全一致的数字表示，与实体道具进行交互，同时感受到握持和操控实体物体时的触觉。用户能够感受到这些道具的质地、形状、重量和热度，从而弥补标准虚拟现实控制器映射为虚拟物体所带来的局限。

实体道具是一种被动触觉 [8]。被动触觉通过为用户提供准确的躯体感觉反馈，显著增强虚拟现实体验的真实感。除了用较小的道具来代表手持设备外，被动触觉也可用于代表虚拟环境中的较大结构，例如墙壁和家具。此前的研究表明，在VR培训应用中使用被动触觉能够带来积极的培训效果 [6]。

1.3 虚拟现实中的时间知觉

时间估计是一种与知觉、注意和记忆相关的主观判断 [10]。先前研究发现，VR会产生时间压缩效应，即用户在VR模拟中会感觉时间流逝得更快 [11, 15]。然而，有证据表明，现实世界与VR中的时间知觉并无差异 [2], ，尤其是在2至5秒范围内的短时间估计中。

我们假设，VR与现实世界之间的时间知觉差异可能与体验的真实感有关。我们认为，提高VR的物理真实感，使其接近现实世界的水平，可能会使VR中的时间知觉与现实世界中对应任务的时间知觉更加一致。

由于气体监测任务需要精确的时间估计，因此，针对这项能力的VR培训在时间估计方面应尽可能接近现实世界。为此，我们研究了具有高物理真实感的VR培训环境是否能使时间判断更加接近现实世界中的时间判断。

2 测试环境

实验在一间大学实验室内进行，研究开展期间，实验室的一部分区域用帘子隔开。图 3 展示了为本研究构建的虚拟环境概览。该应用使用 Unity 编写，包含一条走廊和一扇门，参与者必须穿过这扇门，完成五次气体泄漏测量后再返回起点（见第 3.5 节）。

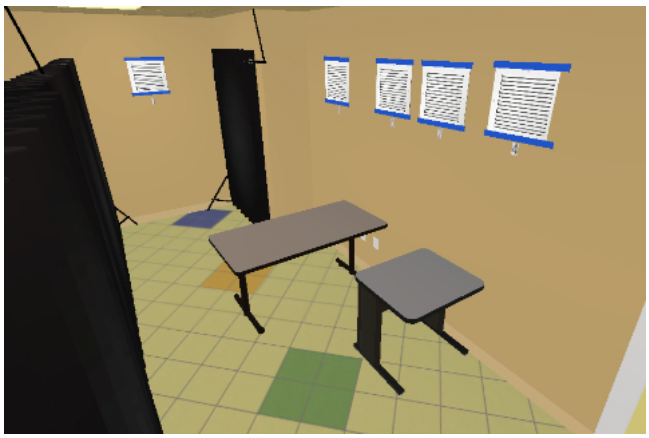


图 3：虚拟任务环境概览。在高物理真实感条件下，实验室中摆放了真实的桌子，其位置与虚拟桌子相对应。在标准虚拟现实条件（低物理真实感）下，所有真实道具均被移除。现实世界条件下不使用头戴式显示器，且包含高物理真实感虚拟现实条件中的所有元素。

实验中使用的测试环境由三种布置构成，分别对应实验条件：作为基线对照的现实世界、高物理真实感虚拟现实，以及低物理真实感虚拟现实。

现实世界。 在此设置中，用户摘下头戴式显示器，使用所有实体道具完成任务。燃气监测

仍使用设备跟踪来标示将设备举到通风口前的开始和结束时间（见第3.5节）。

具有高物理真实感的虚拟现实。在高物理真实感虚拟现实设置中，所有虚拟环境物体都有对应的实体复制品，从而提供被动触觉。如图1所示，用户拿起真实的气体监测仪，推开真实门，并在真实的桌子之间走动。

具有低物理真实感的虚拟现实。在此设置中，所有实体道具均被移除，用户通过虚拟现实控制器与虚拟环境互动，拿起并握住虚拟气体监测仪。

3 实验

为分析虚拟现实物理真实感对时间知觉的影响，我们对16名志愿者开展了一项重复测量实验，他们都是大学生。实验旨在评估不同虚拟现实实验条件（高物理真实感与标准虚拟现实）下的时间估计与现实世界中的时间估计相比有何差异。

3.1 地点

实验在一间干扰因素尽可能少的独立实验室内进行。我们将一面帘幕墙平行于一面墙放置，搭建出一条人工走廊（见图1A、B）。这面帘幕墙遮挡了参与者视野中的干扰因素，并缩小了我们需要在虚拟环境中复现的区域，从而减少出错的空间。

3.2 参与者

共有16人参与了本研究，通过便利抽样招募。两名参与者未提供社会人口统计信息。在提供了社会人口统计信息的14名参与者中，8人（57%）为男性，6人（43%）为女性，平均年龄为 $M = 20 \pm 2.83$ 岁。在询问他们对虚拟现实设备的熟悉程度时，6人（43%）表示略微熟悉，3人（21%）表示中等熟悉，另有3人（21%）表示完全不熟悉。8人透露，他们视力矫正时会使用矫正镜片。10名参与者自称惯用右手，3人惯用左手，1人为双利手。在询问眩晕症状时，7人（50%）回答“有时”，6人（43%）回答“从不”，1人（7%）回答“大约一半时间”。

3.3 设备

实验通过Unity应用程序进行。硬件设备包括一台配有无线发射器的HTC Vive Pro，以及用于追踪高物理真实感实验条件下的燃气监测设备和门的HTC Vive跟踪器（圆饼状追踪器）。在高物理真实感虚拟现实条件下，HTC Vive Pro上安装了Leap Motion手部跟踪器（图4）。标准虚拟现实条件下的实验则使用HTC Vive控制器追踪手部动作。

在高实体性虚拟现实（及现实世界）实验条件下，提供被动触觉的实体道具包括：一个内部配有配重的3D打印气体监测工具，其重量和重心与真实设备相匹配；一扇可用的独立门；以及一张小桌子和一张大桌子，供参与者在通风口之间穿行。此外，还将5张与虚拟现实通风口质地相匹配的通风口图像打印在耐用材料上。

3.4 设计与数据收集

每位参与者都重复完成同一组任务3次。所有参与者都先在真实世界条件下进行测试，以收集基线时间估计；但虚拟现实条件的顺序经过平衡，以减少潜在的顺序效应。因此，第一个实验条件始终是真实世界条件。随后，参与者在标准虚拟现实条件或高物理真实感虚拟现实条件下完成任务。最后，再进行剩余的实验条件。在这里，自变量是参与者所处的实验条件。

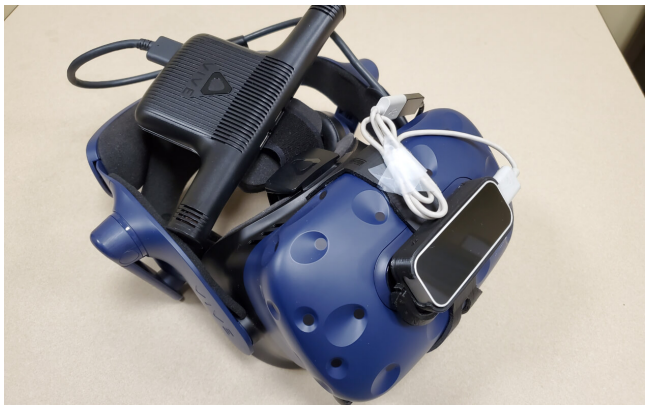


图4：研究中使用的头戴式显示器，配有无线发射器和Leap Motion手部追踪器。

我们的目标是让参与者与周围的道具互动，感受当前的物理真实感水平。之后，参与者将完成一系列时间估计测试，同时我们收集数据。

3.5 实验流程

参与者走进地面上标记的一小块指定区域（图5）。在该区域内，参与者会获得相应实验条件所需的设备，例如虚拟现实头戴设备、控制器和其他追踪设备。如果实验条件涉及实体道具，则会启用手部追踪系统，以便通过虚拟现实头戴设备显示参与者的双手。在进行每种实验条件之前，都会向参与者重申实验流程。研究人员还告知参与者，他们需要估算自己在整个实验条件下所花费的总时间。

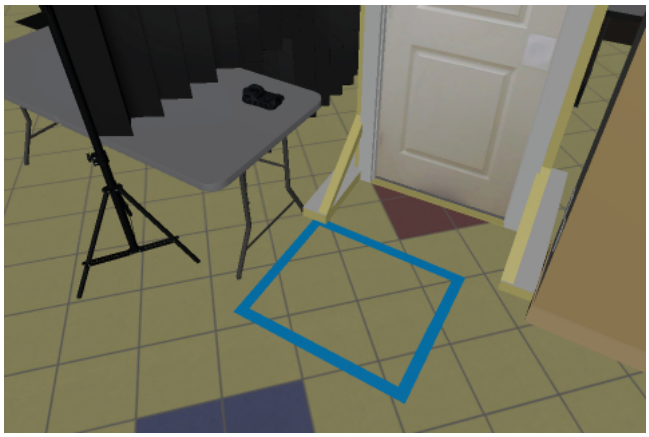


图5：参与者开始执行所有任务时，都站在蓝色方框内（现实世界中也标记了该方框），面朝门。

每个实验条件结束后，实验员协助将实体道具替换为虚拟道具，反之亦然，以准备下一个实验条件。为了更好地控制虚拟现实条件，参与者戴上头戴式显示器后便拉上黑色窗帘，这样他们就不会注意到物理环境的变化。

听到实验员的信号后，参与者首先从身旁的桌子上拿起气体监测工具（是否使用实体道具取决于实验条件）。随后，参与者

打开独立门并穿过门。参与者走到标有“1”的通风口前，将气体监测工具靠近通风口。随后响起一个信号，此时参与者被要求开始以整秒为单位计数或估算，直到听到第二个信号，估算这段时间的长度。参与者并不知道，两个信号之间的时长在25至35秒之间变化，由计算机随机选定。第二个信号响起后，参与者口头向实验员报告以秒为单位的估算结果，研究人员记录该数字。参与者按照通风口标签的顺序（见图6）再重复4次时间估计过程。完成时间估计后，参与者返回起始位置，并口头向研究人员粗略估算自己在该实验条件下花费的总时间。计算机记录了5对信号之间实际经过的时间，以及参与者在每个条件试次中花费的总时间；计时从参与者开始时穿过门算起，到其返回时再次穿过门为止。

每种实验条件结束后，参与者坐下来休息5分钟。



图6：需要检查的通风口 2 至 5 的顺序。通风口 1 可见于图1B。

3.6 数据分析

实验期间收集的数据包括参与者的时间估计准确度，实验结束后则收集了人口统计数据。每位参与者在3种实验条件下各提供6个数据点（5个通风口和1个总时间），共计240个数据点，用以表示参与者的时间估计准确度。

在本研究中，参与者需要前瞻性地估计一项有时间限制的任务所需的时长。因此，每项估计任务持续的时间各不相同（见第3.5节），所以我们必须对估计值进行标准化，以便进行比较。因此，时间估计的主要因变量是准确率，其测量方式为估计时间与观察到的时间之比：

$$accuracy = \frac{estimatedTime}{elapsedTime}.$$

因此，准确率 越接近1，估计就越准确。比率 < 1 表示时间压缩，比率 > 1 表示时间膨胀。

4 结果

请记住，参与者需要完成嵌套式时间估计任务：一项模拟气体泄漏监测的短时计数任务（在 5 个通风口重复进行），以及对整个试次时段的时间估计，针对的是

表1：各实验条件下时间估计的平均值和标准差准确度。

实验条件	估计	平均值准确率	SD 准确度
Real	通风口 1	1.130	0.410
Real	通风口 2	1.050	0.292
Real	通风口 3	1.094	0.361
Real	通风口 4	1.030	0.273
Real	通风口 5	1.101	0.350
Real	总时间	1.421	0.763
High	通风口 1	1.099	0.378
High	通风口 2	1.097	0.474
High	通风口 3	1.040	0.369
High	通风口 4	1.004	0.320
High	通风口 5	1.022	0.293
High	总时间	1.432	0.751
Low	通风口 1	1.062	0.302
Low	通风口 2	1.155	0.627
Low	通风口 3	1.088	0.368
Low	通风口 4	1.042	0.271
Low	通风口 5	1.028	0.299
Low	总时间	1.378	0.732

界面条件。我们分别呈现这两个任务级别的结果。

表1展示了通风时间估计任务和总试次时间估计任务中各实验条件下准确率的均值和标准差。

4.1 气体泄漏监测时间估计

图7展示了气体泄漏监测任务的总体结果。仅考虑实验条件（现实世界、高物理真实感虚拟现实和标准虚拟现实）时，参与者的平均准确率 分别为M 1.08 ± 0.33 $= 1.05 \pm 0.36$ $= 1.07 \pm 0.38$ 、M和M。

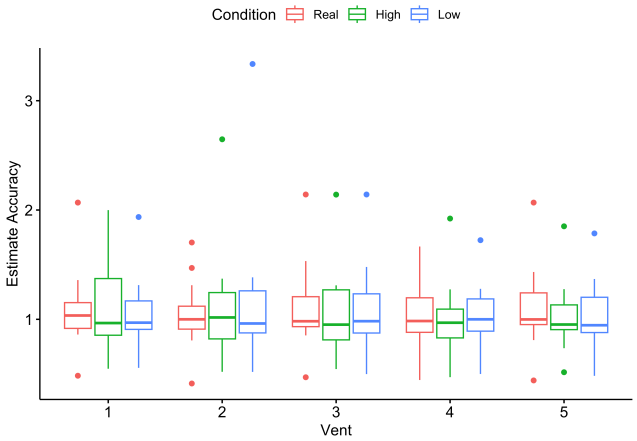


图7：准确率的总体通风时间估计结果。主效应和交互效应均未达到统计显著性。

采用重复测量方差分析来考察实验条件和通风口对准确率的影响。结果显示，实验条件的主效应未达到统计显著性，$F(2,28) = 0.594$，$p = 0.559$。这表明不同实验条件组之间的准确率没有显著差异。通风口的主效应同样未达到统计显著性，$F(1,98,27.69) = 1.219$，$p = 0.311$。这表明

不同通风口组之间的准确率没有显著差异。实验条件与通风口的交互效应未达到统计显著性，$F(2,22,31.12) = 1.472$，$p = 0.245$。这表明实验条件组与通风口组在准确率上的交互作用不显著。由于通风口不存在主效应或交互效应，因此可以合理地将每位参与者在5个通风口处的读数进行汇总（这些位置的时间估计任务相同）。因此，后续的数据分析均基于每位参与者汇总后的通风口估计值进行。

作为一种训练环境，了解训练界面可能对训练任务执行环境——现实世界——产生的影响非常重要。因此，我们计算了<样式 id='1'>实验 VR 实验条件（高或低物理真实感）与现实世界<样式 id='3'>控制 实验条件之间准确率的差值（delta）。图 8 显示了高、低实验条件之间的差值差异。将各实验条件相对于控制条件的差值进行比较的配对 t 检验显示，结果无统计显著性，$t(15) = -1.061$，$p = 0.305$。这表明，各实验条件相对于现实世界的准确率差值之间不存在显著差异。

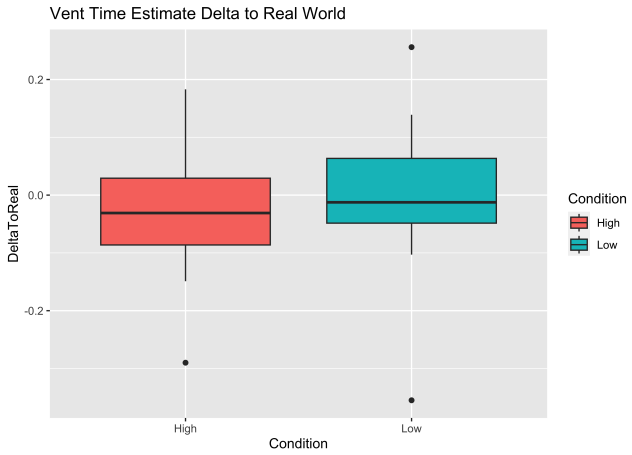


图 8：实验条件准确率与现实世界准确率之间的差值差异。

为进一步研究实验条件与现实世界之间准确率的相似性，我们进行了相关性分析。低物理真实感虚拟现实实验条件与现实世界的准确率之间存在强正相关，$r(14) = .929$，$p < .0001$。同样，高物理真实感虚拟现实实验条件与真实值之间也存在强相关，$r(14) = .946$，$p < .0001$。最后，低实验条件与高实验条件之间的准确率也存在强正相关，$r(14) = .964$，$p < .0001$。这些相关性表明，界面条件（高物理真实感虚拟现实、低物理真实感虚拟现实、现实世界）可能没有影响时间估计。

4.2 总试次时间估计

图9展示了总试次时间估计的结果。参与者仅考虑真实世界条件时的平均准确率为$M = 1.42 \pm 0.76$；在高物理真实感虚拟现实条件下为$M = 1.43 \pm 0.75$；在标准虚拟现实条件下为$M = 1.37 \pm 0.73$。重复测量方差分析结果发现，实验条件的主效应在统计上不显著，$F(1.32,18.45) = 0.003$，$p = 0.981$。这表明不同实验条件组之间的准确率没有显著差异。

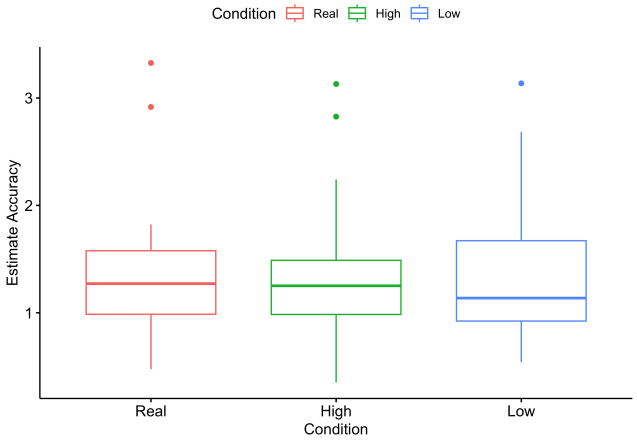


图9：总体总时间估计准确率结果。主效应均未达到统计显著性。

我们还考察了真实世界与各实验条件下总试次时间估计值之间的差值（图10）。配对 t 检验未发现统计显著性，$t(13) = .026$,$p = .980$。与通风口估计值一样，这些差值都非常接近于零，这表明实验条件与现实世界之间的时间估计没有差异。所有实验条件之间较强的正相关也进一步印证了这一结果。

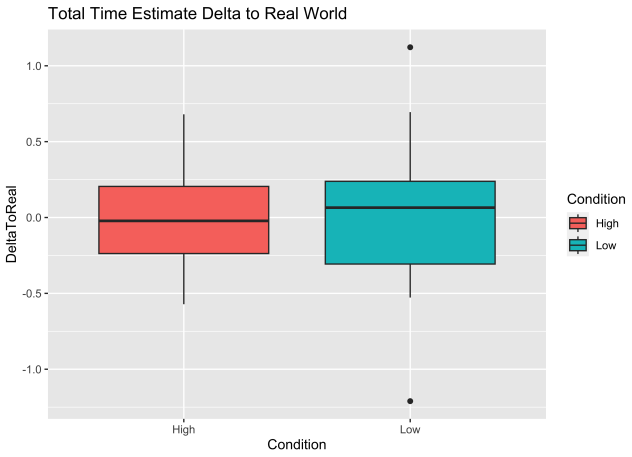


图10：总体总时间估计准确率结果。主效应均未达到统计显著性。

5 讨论

5.1 时间膨胀

令我们惊讶的是，无论测试的是哪种环境，结果始终显示出时间膨胀效应，而非预期的时间压缩效应。在文献中的大多数时间估计研究中，参与者会被要求估算时间，直到他们觉得某个固定时长（例如5分钟）已经过去 [11]。这些看似矛盾的结果令我们颇感兴趣。我们推测，这可能部分与气体泄漏监测任务的性质有关。在这些任务中，参与者必须将气体监测仪举到通风口处，这可能会导致疲劳，进而

使他们觉得时间流逝得更慢。疲劳引发的焦虑反应会使他们更快地计数每一秒。

事后看来，这些发现与危险品作业教员告诉我们的情况一致：他们对危险品作业人员很少让空气监测仪保持足够长时间，以获得准确读数感到沮丧。一种可能的解释是，将设备固定在一个位置30秒是一项枯燥的任务（对于沉重的监测仪来说，也可能令人疲劳）。正如那句老话所说，盯着看的锅永远不会沸腾；等待某件事发生时，时间似乎会过得更慢。

然而，这种解释似乎无法充分说明时间膨胀效应。首先，尽管气体泄漏监测任务中存在时间膨胀，但程度相当轻微，准确率比值非常接近1。事实上，考察气体泄漏监测任务中时间膨胀与时间压缩估计的频次可知，参与者总共在101次试验中报告了时间膨胀估计，在131次试验中报告了时间压缩估计。这意味着，对于较短的任务，时间压缩比时间膨胀更常见，但时间膨胀估计的幅度通常高于时间压缩估计。相比之下，较长的总时间估计则显示出更为一致的时间膨胀，共有34次膨胀估计和13次压缩估计。

鉴于在总任务时间估计中仍然出现了时间膨胀，而且程度更强，我们认为不能将这种违反直觉的时间膨胀效应单纯归因于疲劳。我们推测，当参与者无法控制自己在体验中停留的时长时，所采用的时间估计机制与参与者负责猜测时间何时结束时有所不同。未来需要在虚拟现实中比较前瞻性时间估计与回顾性时间估计，以验证这一假设。

5.2 不同实验条件下的时间估计

我们的研究发现，尽管未观察到显著效应，但在整个试验过程中始终存在时间膨胀。在现实世界和两种虚拟现实实验条件下都观察到了类似的时间膨胀，这表明，对于诸如计算信号间隔时间以及回顾性估计较长任务耗时之类的任务，无论任务是在何种环境中执行，都会发生时间膨胀。

一个有趣的观察结果是，总任务时间估计中的时间膨胀（~ 1.4）显著高于短时通风口任务中观察到的时间膨胀（~ 1.07）。我们无法确定这一现象的确切原因，但推测集中注意力可能有助于提高通风口任务中的估计准确性。

据我们所知，本研究首次以真实世界估计值为基线，比较不同虚拟现实条件下的时间估计。我们确实发现，所有实验条件下都出现了时间膨胀，这表明任务本身对时间估计的影响可能最大，而非执行任务的环境。人们在进行有意识、按部就班的任务（例如计算两个信号之间的时间）时，可能天生倾向于高估时间；而界面条件可能产生的任何影响，都可能被任务对时间估计的影响所掩盖。

对未观察到影响的另一种可能解释是采用了被试内实验设计。先前研究发现，重复暴露期间存在显著的时间估计偏差，这表明被试间实验可能更适合研究不同实验条件之间的时间估计差异 [11]。要验证这一假设，还需要开展耗时更长、参与者更多的进一步研究。

致谢

本研究是在美国商务部、美国国家标准与技术研究院资助项目#70NANB18H146的支持下开展的及其公共安全通信研究部的支持下完成。我们感谢所有为本项目提供意见和反馈的消防员。

参考文献

[1] F. Alvarez-Lopez、M. F. Maina、F. Arango、F. Saig´ı-Rubi´o 等。低成本便携式三维虚拟现实模拟器在微创手术心理运动技能训练中的应用：任务指标与评分效度。*JMIR Serious Games*，8(4):e19723，2020。[2] G. Bruder 和 F. Steinicke。虚拟环境中行走时的时间知觉。载于*2014 IEEE虚拟现实（VR）*，第67–68页。IEEE，2014。[3] T. Dutzik、A. Scarr 和 M. Casale。甲烷气体泄漏 [在线]。2022年。网址：https://frontiergroup.org/resources/methane-gas-leaks/ [访问日期：1月12日 2023]。[4] S. Gainer、S. Eadara、J. Haskins、W. Huse、B. Zhu、B. Boyd、C. Laird、J. Farantatos 和 J. Jerald。用于模拟危险材料检测的定制输入设备。载于*2020 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（VRW）*，第7–12页。IEEE，2020。[5] J. G. Grandi、Z. Cao、M. Ogren 和 R. Kopper。虚拟现实中下一代增强现实用户界面的设计与模拟。载于*2021 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（VRW）*，第23–29页。IEEE，2021。[6] B. E. Insko。被动触觉显著增强虚拟环境。北卡罗来纳大学教堂山分校，2001年。[7] W. Joung、B. Hesketh 和 A. Neal。利用“经验教训”训练适应性绩效：从错误中学习还是从成功中学习更好？应用心理学，55(2):282–302，2006。[8] R. W. Lindeman、J. L. Sibert 和 J. K. Hahn。手持式窗口：实现沉浸式虚拟环境中的有效二维交互。载于*IEEE虚拟现实会议论文集（目录号：99CB36316）*，第205–212页。IEEE，1999。[9] K. Lofca、J. Haskins、J. Jerald 和 R. Kopper。研究物理真实感对危险品虚拟现实模拟中时间知觉的影响。载于*2022 IEEE虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会（VRW）*，第884–885页。IEEE，2022。[10] W. J. Matthews 和 W. H. Meck。时间认知：将主观时间与知觉、注意和记忆联系起来。《心理学通报》，142(8):865，2016。[11] G. Mullen 和 N. Davidenko。虚拟现实中的时间压缩。《计时与时间知觉》，1(aop):1–16，2021。[12] NextGen Interactions。HazVR [在线]。2022年。网址：https://youtu. be/xZT89bHmBDE/ [访问日期：1月12日 2023]。[13] M. Rettinger 和 G. Rigoll。化解高风险任务训练：XR中的协作训练。载于*2022 IEEE混合与增强现实国际研讨会（ISMAR）*，第695–701页。IEEE，2022。[14] D. A. Rogers、G. Regehr 和 J. MacDonald。错误训练在外科技术技能指导与评估中的作用。《美国外科杂志》，183(3):242–245，2002。[15] S. M. Schneider、C. K. Kisby 和 E. P. Flint。虚拟现实对接受化疗患者时间知觉的影响。《癌症支持治疗》，19(4):555–564，2011。