

【特别策划】

虚拟环境中空间压缩问题的影响与改善

宋晓蕾, 汪嘉维

(陕西师范大学 心理学院, 西安 710062)

摘要: **目的** 空间压缩问题是虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 技术 1 个很重要的技术瓶颈, 为了使该技术被更好地推广与使用, 虚拟环境 (Virtual Environment, VE) 中空间压缩这个瓶颈问题必须得到有效的解决或改善。本研究从认知视角就虚拟环境中空间压缩问题产生的原因、特征和规律、影响因素和补偿方案进行了系统地分析和探讨, 以最终达到有效解决或改善空间压缩以提高保真度和用户的体验需求并最终促进 VR 技术广泛应用的目的。**方法** 采用跨学科交叉分析和文献调研分析的方法, 分别对认知心理学、人机交互和计算机科学等不同领域的大量相关文献进行了充分的检索和分析, 系统梳理了虚拟环境中空间压缩效应的特点和规律, 同时重点从个体认知和技术层面系统探讨了虚拟环境中产生空间压缩现象的原因, 并基于此提出减小空间距离压缩效应、提高用户体验的具体解决方案。**结论** 基于多感觉整合理论, 对空间距离压缩效应产生的机理进行了深入分析, 并提出在认知视角下通过提供双眼视差和丰富的深度线索, 增强用户的存在感, 以及在虚拟环境中提供不一致环境来提高虚拟环境距离估计的准确性, 最终达到有效解决或改善空间压缩问题的目的。

关键词: 虚拟环境; 距离感知; 距离压缩; 改善方法

中图分类号: TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)16-0089-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.16.010

Influence and Improvement of Space Compression in Virtual Environment

SONG Xiao-lei, WANG Jia-wei

(School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

ABSTRACT: Space compression is an important technical bottleneck of virtual reality technology. In order to promote and use this technology more broadly, the problem must be effectively solved. The causes, characteristics, influencing factors and compensation schemes of spatial compression in VE are analyzed systematically from a cognitive perspective, so as to effectively solve or improve distance compression to enhance fidelity and users' experience and ultimately promote the wide application of VR technology. The methods of literature research and interdisciplinary analysis were adopted to retrieve and analyze a large number of related literatures in cognitive psychology, human-computer interaction and computer science and systematically sort out the characteristics and laws of spatial compression effect in VE. At the same time, the causes for the spatial compression in VE were discussed from the perspective of individual cognition and technology, and based on this, the specific solutions were proposed to reduce the space compression effect and improve the users' experience. Based on the theory of multi-sensory integration, an in-depth analysis is carried out on the mechanism of the distance compression effect. It is proposed that in the cognitive perspective, the users' sense of presence can be enhanced by providing binocular parallax and rich depth cues and the inconsistent environment can be provided in VE to improve the accuracy of distance estimation in VE, thus finally achieving the purpose of effectively solving or improving the distance compression problem.

KEY WORDS: virtual environment; distance perception; space compression; improvement method

收稿日期: 2023-03-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32071065); 国家自然科学基金重大项目 (T2192931); 载人航天工程航天医学实验领域项目 (HYZHXM03001); 中央高校基本科研业务费重点项目 (GK202002010)

作者简介: 宋晓蕾 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为空间认知与导航、智能人机交互、神经人因学、用户体验等。

随着科学技术的不断发展,虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术也得到了越来越广泛的应用,并已经扩展到蛋白质结构可视化^[1]、制造^[2]、军队^[3]和消防员应急服务训练^[4]等多个领域。这些需要用户在虚拟环境中对距离有精细的把握,如果对距离的感知不准确,就可能导致操作不当,进而影响到训练的效果。因此,正确感知对象的距离是至关重要的。同时,正确的空间感知也可以作为用户接受度的指标^[5],用来衡量虚拟环境的可信性和保真度。无论是在真实环境还是虚拟环境中,正确感知对象的距离对于人类生存和发展都是至关重要的。但以往距离感知的研究表明,人类经常低估或压缩空间距离。特别是在虚拟环境中,个体感知到的主观距离往往比真实情境中要短,即出现空间压缩(Space Compression)现象^[6]。该现象是VR技术应用所面临的1个主要瓶颈问题,但目前这种现象只能被定性地说明,其规律特点仍模糊不清,也没有1个数量化的表征来描述和解释该现象。

距离感知(Distance Perception)是空间知觉的基本要素之一。准确的距离感知在人日常生活中十分重要。它能够帮助我们规避危险,如行驶中的汽车,也提高了人对物体运动时间的控制程度,如准确地击中乒乓球或网球^[7]。此外,良好的距离感知能力能够帮助人更好地对空间进行定位、规划路线等,从而更加有效地与周围的环境进行交互。但以往的众多研究表明,在虚拟环境中个体对于空间距离的感知是不准确的^[8-9]。相对于真实空间中的距离感知,虚拟空间中的远距离感知表现出更严重的低估倾向^[10-12],且随着距离的增加,用户的低估程度会越来越高。对于远距离的感知,研究发现人在虚拟环境中感知到的距离平均约为真实距离的74%^[6,13],这远低于真实环境中的距离感知。针对为何会出现距离压缩,以及如何改善人在虚拟空间中的距离感知,前人做了许多的研究,但确定影响虚拟环境中距离压缩的有限因素集已被证明是困难的。

因此,本研究从认知视角就虚拟环境中空间压缩效应产生的机理及影响因素和改善方案进行了系统地梳理和探讨。首先,基于以往研究总结了虚拟现实环境中空间压缩现象的特点和规律;然后,从影响因素角度论述了虚拟现实环境中会产生空间压缩的原因;接着,基于空间压缩产生的原因讨论了改善这一现象的方法;最后,论述了改善方法如何服务于未来虚拟现实环境中的准确距离感知。

1 空间压缩产生的原因和规律

1.1 空间压缩产生的原因

要了解虚拟环境中的距离感知,首先要清楚真实环境中个体对距离的感知是如何形成的^[5,13-15]。环境

中物体的反射光通过瞳孔到达眼睛,通过角膜和晶状体时发生弯曲,最后到达视网膜,最终形成视网膜上的1个倒置的二维图像。从图像中感知到的三维空间,其信息源则来自各种深度线索^[14]。深度线索共有3类:第1类是肌肉线索,包括:调节、辐合;第2类是单眼线索,包括:遮挡(重叠)、线条透视、空气透视、相对高度、纹理梯度、运动视差、运动透视、明暗阴影和相对大小9种;第3类则为双眼线索,主要是指双眼视差。但在虚拟环境中,个体往往是通过虚拟现实的硬件系统这1中介来感知虚拟环境,这可能会导致个体视野(Field of View, FOV)受限、头部重量增加、深度线索缺失或扭曲、立体图像失真等,这些都会在一定程度上影响距离感知而产生空间压缩现象。

此外,与真实环境相比,虚拟环境中的成分可能十分稀疏,只呈现1个对象或1个纹理地面,往往缺乏图像深度线索。同时,在HMD(Head Mounted Device)中呈现的虚拟环境中缺少可比较大小的对象,特别是缺乏自我身体的参照。而且在真实场景中,个体会经历不同场景的转换,例如从室内环境转换到室外环境,但在虚拟场景中会突然转换环境。这些因素都可能是导致虚拟环境中距离压缩现象产生的原因。多感官整合理论也提出,现实世界人们距离感知会整合多感官信息,所以距离感知准确,但虚拟世界缺乏某些知觉线索导致人脑中的经验信息和外部的客观信息不一致,经验信息和虚拟信息之间的冲突是产生空间压缩现象的主要原因(如图1所示)。

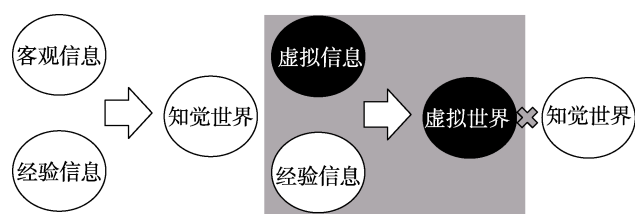


图1 虚拟环境中空间压缩现象产生的原因

Fig.1 Causes of distance compression in virtual environment

1.2 空间压缩产生的规律

1.2.1 近距离感知准确但远距离感知低估

在虚拟环境中人对远距离的感知特点与现实环境中的远距离感知是一致的,都表现为对于远距离的低估,但对于近距离的感知则有一些不同。对于距离,一般分为个人距离(Personal Distance, 0~2 m)、行动距离(Action Space, 2~30 m)和远距离(Vista Distance, > 30 m)。对于处于个人距离空间中的物体人类感知一般是准确的,甚至表现出高估的倾向^[16],影响我们在这个范围内的感知的1个重要的因素就是我们的运动能力(Action Ability)。研究发现,在人手臂所能到达(Reachable)范围内的物体,人距

离感知的准确度会更高,因此在个人空间中的距离感知是较为准确的。但对于超出人运动范围内的物体,人感知到的距离是低于真实距离的。研究发现这个规律同时存在于真实环境与虚拟环境中。例如,有研究发现当距离较小时,观察者在 2 种环境中的感知距离是接近的,而当真实距离超过 18.3 m 时,2 种环境中感知到的距离出现了较大的差异^[17]。同时,对于远距离的低估并不是成比例的,随着物体的距离越来越远,人对于距离感知的低估程度会越来越高。

1.2.2 远距离虚拟空间压缩的程度大于真实环境

对于远距离的感知(包括行动空间和远空间),无论是在真实环境中还是虚拟环境中人都会低估,但是相比较于真实环境,人在虚拟环境中感知到的距离压缩程度会更高^[18-20]。虚拟环境中的尺度(大小和距离)相对于现实世界空间被低估——在一些研究中,距离被低估了高达 50%^[21]。所以,即使同样是距离低估,在虚拟环境中,人所面临的空間压缩程度也是高于现实环境中的。部分实验中 2 种环境下对不同距离范围的估计,见表 1。

表 1 虚拟环境和真实环境中的距离估计
Tab.1 Distance estimation in virtual environment and real environment

实验	距离范围	感知距离与真实距离之比/%	
		虚拟环境	真实环境
PHILLIPS, et al. (2009 年) ^[22]	3.0 m~7.0 m	94	97
RIES, et al. (2009 年) ^[23]	2.4 m~7.6 m	91	101
ZIEMER, et al. (2009 年) ^[16]	6.1 m~36.6 m	56	79
PHILLIPS, et al. (2010 年) ^[24]	3.0 m~7.0 m	85	100
STEINICKE, et al. (2010 年) ^[25]	3.0 m~7.0 m	78	100
GRECHKIN, et al. (2010 年) ^[18]	6.0 m~18.0 m	73	94
NGUYEN, et al. (2010 年) ^[26]	6.0 m~18.0 m	86	102
JONES, et al. (2016 年) ^[27]	3.0 m~7.0 m	80	93
KELLY, et al. (2017 年) ^[28]	1.0 m~5.0 m	85	86
KELLY, et al. (2022) ^[9]	1.0 m~5.0 m	69	88
KANG, et al. (2023 年) ^[29]	3.7m~8.8m	75	97
FELDSTEIN, et al. (2020 年) ^[30]	8.0 m~13.0 m	96	94

由此可见,整体上虚拟环境中的距离估计精度小于真实环境,但是实验结果也会受到很多因素的影响,如测量方法、环境呈现顺序等^[16,28]。

1.2.3 距离感知的多模态整合

无论是在现实环境中还是虚拟环境中,人对于距离的感知都需要整合多个模态的信息,包括视觉、听觉、触觉等^[31-33]。最大似然整合理论(Maximum Likelihood Integration Theory)认为,不同信息在整合过程中有不同的效力,称之为信息的权重,权重越高,则在距离感知的过程中该类信息所贡献的程度越大,一般情况下,视觉信息的权重最大。模态信息的权重是可以改变的,不同模态的信息都有 2 个特征:可靠性(Reliability)和准确性(Accuracy)。可靠性是指信息是否可以信任,如起雾时,视觉信息的可靠性就会降低,信息的权重主要就取决于信息的可靠性。但对于信息的处理要结合信息的可靠性和准确性,准确性是指信息的准确程度,如大小幻觉就是信息的不准确。显而易见,相比较于现实环境,虚拟环境中信息的可靠性和准确度是较低的。

在总结了虚拟现实环境中空间压缩的原因和规律后,接着探讨了哪些因素影响空间压缩现象的产生。

2 空间压缩的影响因素

人的知觉世界是人脑中的经验信息和外部的客观信息共同构建的结果。在对虚拟现实环境中的物体进行距离估计时,会受到很多因素的影响,如用户自身因素^[34]、虚拟环境成分、计算机技术因素和测量方法等因素^[35]。环境成分主要是指虚拟环境中是否有地面纹理信息、是否有虚拟人物、室内室外等特定的环境信息;计算机技术主要是指一些实验的参数设置,如虚拟设备的屏幕刷新率、屏幕的视场角和视觉刺激呈现的同步性等;而测量方法主要是指不同的测量方法带来的实验操作差异,以及测量方法对观察者内心活动的真实报告水平等^[6]。基于用户认知的视角,本研究认为空间压缩是经验信息和虚拟信息之间冲突的结果,因此主要关注用户的认知等自身因素对虚拟环境中距离感知的影响。

2.1 深度线索(Depth Cues)

在距离估计的研究中,虚拟环境构成成分各有不同,从单一呈现在白色背景中的户外场景到复杂的室内场景,虚拟环境所提供的深度线索数量不同。线索

丰富度对距离估计有非常重要的影响。研究表明,在真实场景中,缺乏深度场景会直接降低距离估计的准确性^[36-37],也会导致距离和大小的扭曲^[38]。

首先,调节和辐合在距离估计方面十分重要,其作用范围可达到 2 m^[14]。在虚拟现实系统中调节与辐合与真实环境不同(如图 2 所示)。因此,在虚拟环境中个体不断面临着变化且冲突的深度信息。

除调节和辐合外,深度线索还有 2 类:静止场景,如图片中包含的深度线索叫作图像线索(Pictorial Cues),包含物体的遮挡、相对大小、视野高度等;另外 1 种是非图片线索(Nonpictorial Cues),包括双眼运动视差、双眼的适应与辐合等。双眼视差是最强的深度线索^[14]。在虚拟环境中,图像立体呈现是否比平面呈现有更好的距离感知存在研究上的争议。前人研究发现,立体图像和平面图像中的距离估计所得结果无显著差异^[39-41]。但 LUO 等^[42]所得结果则相反,立体图像中的距离估计要好于平面图像。BINGHAM 等^[43]则发现在感知匹配任务中,立体图像的距离估计准确性高于平面图像。但是这种距离估计的差异只在距离较短时出现,对于长距离的感知则没有影响。

许多研究通过改变深度线索讨论了缺乏深度线索提示或低复杂度的虚拟场景是否会导致距离压缩现象这一问题。SURDICK 等^[44]提供了简单的虚拟环境,并比较了相对亮度、相对高度、线条透视、纹理梯度和双眼视差等深度线索的作用。结果表明,视角线索(线条透视、纹理梯度等)比其他深度线索更能提高距离估计的准确性。TAI^[45]比较了各种光照条件,发现目标物与背景对比度较低的条件,距离倾向于被高估。WITMER 和 KLINE^[46]比较了各种地面纹理,但并未发现其对距离估计的影响,可能是由于

所使用的地面纹理较为简单,未能引起足够的差异。然而 SINAI 等^[47]发现虚拟环境中砖砌地面比地毯或草地条件下的距离估计更准确。相较于线索稀疏的简单场景,在深度线索丰富的复杂虚拟场景中,感知匹配任务的准确性更高^[42,48-49],如虚拟户外环境的复杂性使其比虚拟户内环境中用户感知匹配任务的准确性高^[50-52]。

综上所述,在虚拟场景增加深度线索、增加虚拟场景的复杂性可以改善距离感知。但缺乏深度线索并不能解释复杂虚拟环境中的距离压缩现象。

2.2 虚拟人物化身(Adding Avatars)

在 HMD 中呈现的虚拟环境中,用于大小比较的对象是缺失的,特别是对于自己身体的视图是不可用的。用于呈现虚拟环境的 HMD 完全阻挡了包括用户自身身体在内的真实环境。这被认为是造成距离低估的潜在原因。CREEM-REGEHR 等^[53]认为,个体无法在地面上看到自己的脚有可能导致眼睛高度相关的信息丢失,从而导致角度偏差。他们在真实的室内环境中进行了 1 项实验,将参与者的脚和脚下地板的视线遮挡到大约 1.5 m。但这种操作不会影响距离估计,这表明在真实环境中,自己脚的视图对于准确的距离感知不是必需的,MOHLER 等^[54]认为,尽管如此,身体仍为虚拟环境中的距离估计提供了度量标准。在他们的实验中,参与者被指示环顾 HMD 中呈现的虚拟环境,无论是否存在第一人称虚拟身体。该化身根据参与者的动作移动。结果表明,距离估计在化身条件下明显更好。PHILLIPS 等^[24]也得到相似结果。MOHLER 等^[54]发现静态或追踪运动轨迹的虚拟人物都能提高距离估计。RIES 等^[23]发现追踪的虚拟人物

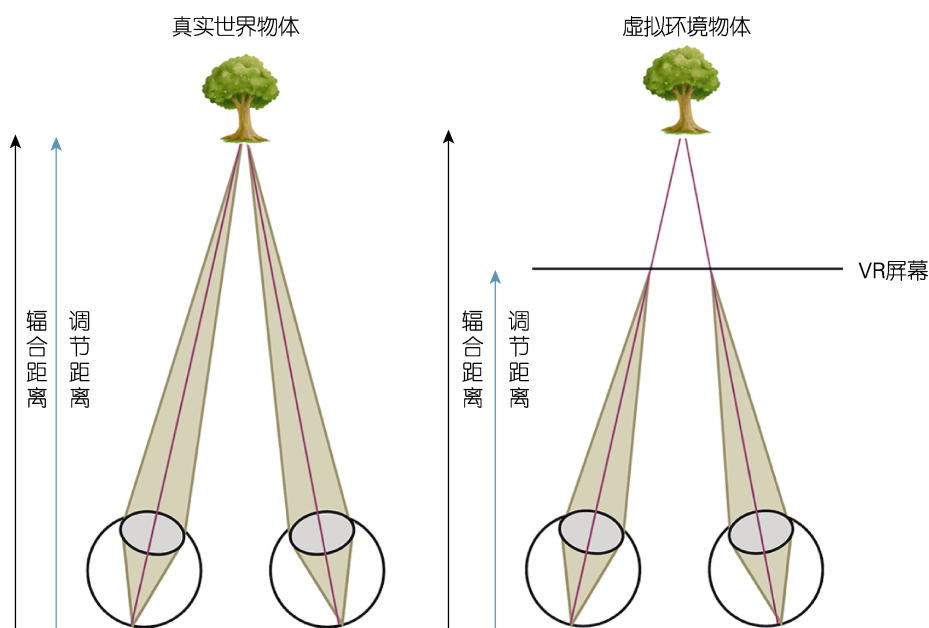


图 2 虚拟环境与真实环境中的调节与辐合

Fig.2 Adjustment and convergence in virtual environment and real environment

能提高距离估计, 但精致的虚拟人物则不能。然而 LEYRER 等^[55]、LIN 等^[56]和 MCMANUS 等^[57]并未发现追踪虚拟人物对距离估计准确性的改善, MCMANUS 等^[57]认为这可能是由于提供了镜子或看到了虚拟人物的脸导致的。

综上所述, 当虚拟场景中出现自身的虚拟人物化身时, 距离估计的准确性可能会得到改善, 原因可能是被试者将虚拟人物知觉为自己身体的表征。但这 1 结论仍需进一步验证。

2.3 个体自身因素

除了上述因素外, 个体自身因素如虚拟现实技术的相关反馈和练习经验、后效、个体差异等, 也可能影响虚拟环境中的距离感知。

2.3.1 反馈和练习的影响

视觉运动系统具有较大的适应性, 但是为了让这种适应性产生, 个体自身的运动和环境需要交互。因此, 一些研究探讨了在虚拟环境中, 何种类型的交互或反馈会导致距离估计的改善。RICHARDSON 和 WALLER^[58]通过提供不同反馈来检验其作用, 发现提供实际步行距离和实际距离的示意图改善了对距离的估计。此外, 提供停止信号也可以提高距离估计的准确性。MOHLER 等^[59]也得到了类似结果。ALTENHOFF 等^[60]发现在提供视觉和触觉反馈后, 距离估计得到了改善, 但口头反馈未出现此效果。此外, WALLER 和 RICHARDSON^[61]发现在虚拟环境中自由探索可以改善距离估计。JONES 等^[62-63]发现, 即使在不提供反馈的情况下, 随着时间的推移, 距离估计的准确性也会有所提高, 这表明只要给足够的时间, 被试者能够适应 HMD 所提供的虚拟环境。MCMANUS 等^[57]的研究也未提供反馈, 但随着时间的推移, 被试者的盲走估计成绩有所提高, 与真实场景中的结果一致^[64]。INTERRANT 等^[65]要求参与者触摸 1 张真实的桌子, 同时在同 1 位置看到 1 张虚拟桌子, 以测试触觉反馈的效果。在交互阶段之后, 距离估计对于更长的距离更好, 但对于更短的距离则不然。

总之, 单纯的练习可以改善盲走获得的距离估计。与在真实环境中一样, 包括动作成分的反馈会导致适应并增强距离估计。因此, 建议在执行实际距离感知任务之前熟悉虚拟环境 1 段时间^[60-61]。但在适应虚拟环境后, 个体可能会高估现实环境中的距离。WALLER 等^[61]、INTERRANTE 等^[65]的研究证实了这个假设。他们让被试者在虚拟环境中进行距离估计, 然后再在真实环境中进行相同的任务, 在经历虚拟环境后, 真实环境中的距离被高估。

2.3.2 个体差异

许多研究者提到了个体差异^[16,24,42,43,66], 如年龄

可能是影响距离估计的 1 个因素, 但性别变量未发现任何显著差异^[13,65,67]。PLUMERT 等^[68]发现, 相比于 12 岁的儿童和成年人, 10 岁儿童的想象步行时间明显更短。而 MURGIA 等^[69]并未发现年龄的影响, 但其被试者年龄在 22~35 岁。MURGIA 等^[69]还测试了身高和 CAVE 经验水平对距离匹配准备性的影响, 虽然经验水平达到边际显著性, 但个人身高却没有。ARMBRÜSTER 等^[70]还检验了个体立体视觉测试的分数是否与个体差异有关, 发现立体视觉测试的得分越高, 个体对距离的低估就越多。PHILLIPS 等^[71]还测试了人格特质与距离估计的关系, 他们假设一些人格特质与高存在感有关, 结果发现距离估计与吸收特质 (The Trait Absorption)^[72]有关, 对吸收和自我改变体验更开放的参与者在更大程度上低估了距离。当然, 个体差异可能是由于存在感、虚拟现实经验、立体视觉能力以及其他变量导致的, 还需进一步探索和讨论。

由于距离感知是 1 个多模态信息整合的过程, 所以除了上述的因素以外, 其他模态的信息也会影响虚拟环境中的空间压缩。

2.4 多模态信息的影响

准确的空间感知是 1 个需要多个通道信息整合 (Multisensory Integration) 的过程。在这个过程中, 视觉起到主导作用, 其他线索如听觉、触觉等也可以帮助人们更好地感知距离。在虚拟环境中, 结合 2 个或多个感官通道进行反馈也已经被证明可能产生更好的效果^[73-74], 其中听觉线索的运用已经较为广泛, 人们对于触觉反馈的兴趣在逐渐增加, 但其有效性仍在探索中。听觉线索作为虚拟环境中常用的线索, 其特征对于距离感知也有重要的作用。声源的强度及其随声源位置的变化是距离的主要声学线索。人们对整体强度的微小变化非常敏感, 能够探测到细微的距离变化^[75]。此外直达混响声能比 (Direct-to-reverberant Ratio, D-R 比率) 也是重要的影响因素。环境包括产生混响的声反射面, 在这种情况下, 总体强度受到听觉环境 (房间大小、墙壁和地板材料、家具) 和声源 (指向性) 特性的高度影响。因此, 感知到的听觉距离受直接声音强度与回响声音强度之比的影响。MERSHON 等^[76]的研究表明, 听众在混响环境中对距离的判断比在无回声环境中更准确。混响时间的增加导致感知自我中心距离的增加^[77]。

除此之外, 双耳时间差 (Interaural Time Differences) 和双耳水平差 (Interaural Time Differences) 也都是判断声音环境中距离的重要因素。ZAHORIK^[78]的研究发现, 噪声和语音信号条件下的距离估计差异不显著, 因此声音的刺激类型可能不是影响距离感知的因素。大多数关于视听空间相互作用的研究都报告了声音的感知位置通常偏向于视觉刺激^[79-80]。而视听

互动大多遵循统一原则,根据这个原则,在空间或时间方面有些不协调的多感官刺激可以合成为统一感知^[81-82]。基于这种理论观点,当音频和视觉刺激在空间上不一致时,声音仍然有可能影响视觉空间感知(即深度感知)。WOODS 等^[83]通过 1 项距离估计任务发现,与没有发出声音时相比,当声音从电视墙前面的地方发出时观察者感知到电视墙更近,此结果说明与视觉目标存在空间差异的声音可能会使视觉定位产生偏差。也有研究发现,与近距离范围相比,远距离范围内的听觉信息对视觉感知的影响更大^[84]。同样,与视觉对象在空间上不同的声音对周边深度定位的影响大于中心深度定位^[85]。

上述研究进一步表明,在不同的位置,1 种模态相对于其他模态的信息可靠性并不恒定^[86-88],这可能导致不同距离的听觉对视觉深度知觉的影响不同。KEARNEY 等^[89]证明了高阶双声技术(High Order Ambisonics Technology)能提高距离感知的准确性。高阶双声是 1 种 3D 音频形式,通过将特定点的声场分解为球面调和函数来实现多个通道,其压缩效果类似于真实世界。

3 虚拟环境中空间压缩的补偿

以往研究表明,硬件问题只是导致距离压缩现象的小部分原因。STEINICKE 等^[90]指出,沉浸式虚拟环境中的距离压缩问题很大程度上可能源于对虚拟现实更高层次的认知问题。而从认知视角增加用户的存在感或具身体验感、添加听觉等多通道信息以创设视听不一致环境以及增强虚拟信息的现实性,如添加辅助视觉信息等均可有效改善空间压缩问题,本文主要从认知视角通过提供更多认知线索来提出改善距离压缩现象的方法。

3.1 增强用户的存在感(The Sense of Presence)

在虚拟现实的空间中,个体会有一种被传送到所呈现虚拟环境中的感觉,而准确的距离感知则需要个体更倾向于感觉到自己真实处于该环境中。因此,增强用户的存在感或具身体验感可以成为改善空间压缩的 1 种方法。例如,通过排除真实世界的线索来提高存在感,因为这些线索可能会干扰或与所呈现的虚拟环境不一致^[91]。通过提供虚拟身体(Virtual Body),特别是肢体动作,也可以增强用户的存在感^[92-93]。此外,虚拟环境中的多模态反馈(Multimodal Feedback)也增加了存在感,尤其是提供触觉及触觉反馈^[94]。视觉显示设置和属性也会影响用户的存在感,如提供更广阔的视野、逼真的模拟效果^[95]、立体显示^[96]、低延迟^[97]以及动态阴影^[98]等都有助于提高用户的存在感。此外,当涉及到在虚拟环境中移动时,行走比其他移动方式更能增强存在感,例如,模拟步行的用户存在感高于模拟飞行员飞行的用户存在感^[93,99]。

利用现实世界和虚拟世界之间的过渡环境来增加用户的存在感或改善虚拟体验也可用来减少空间压缩现象。重新定位到现实世界的过程是快速完成的,但仍存在从虚拟环境回到现实世界的中断,例如,脱下 HMD 时常会对自己所面对的方位感到迷惑。SLATER 等^[92]进行了名为“Virtual Ante”的实验,被试者首先进入以实验室为模板的虚拟空间中,之后通过 1 扇门进入 1 个新房间,让被试者在该房间内完成某项任务后再返回,此时虚拟实验室和现实的实验室中都增加了 1 个盒状物体,而被试在脱下 HMD 后并未对现实实验室中新增的盒子感到惊讶。过渡环境技术也可用于 CAVE,例如 RAZZAQUE 等^[100]的实验。

提供真实环境的虚拟复制品可以使用户适应沉浸式虚拟现实系统的特性。研究表明,如果虚拟环境与个体所处环境相同,那么个体的环境感知能力会更强。在一定时间后,个体再通过 1 扇门或其他连接方式进入真正的虚拟环境中就可以提高其存在感,并更好地将现实中的情境感知和距离估计能力转移到虚拟环境中^[25]。此外,增强虚拟环境的真实感,即与真实世界的相似性,也有助于改善距离估计^[101]。

3.2 创设不一致环境

不一致环境(Incongruent Environments)是指环境中的某些通道线索的不一致。不一致环境可以在不同模式中扩展或缩小维度。例如,5 m 的距离可以在视觉上表示为 5 m,而同样的距离可以用轻微下降的音量来呈现音频。以往有研究采用不一致环境来提高个体在虚拟环境中距离估计的准确性。

ZHOU 等^[102]将 3D 声音纳入其不一致增强现实(Augmented Reality, AR)环境中距离感知的研究,结果发现 3D 音频对参与者分辨 2 种相互竞争的视听刺激的相对深度能力有显著影响,与只有视觉的情况相比,受试者的正确距离判断能力提高了 250%左右。GORZEL 等^[103]发现,在 2、4、8 m 的视觉距离范围内,尽管呈现在不一致的位置,但失调的音频仍然被认为是与视觉对象一致的。尽管视觉和听觉刺激之间存在不协调,但仍然保持了知觉结合。TURNER 等^[104]同样证明了视听刺激不一致对距离估计的影响,表明刺激不一致可以用来增加场景的深度。SUN 等^[105]还证明了本体感觉信息与视觉反馈不一致对距离估计的改善。这些都与最大似然集成理论(Maximum-likelihood Integration Theory, ML)^[88]相一致。ML 理论认为,个体会将多感官信息结合从而估计距离。例如:当被要求估计虚拟长方体的尺寸时,1 个人将对物体的感觉有多宽和多高进行估计(触觉估计),并根据物体看起来有多宽和多高进行估计(视觉估计);然后,将触觉和视觉信息整合在一起,得出长方体的宽度和高度的综合估计。该理论适用于视觉和

触觉模式。此外, 还有证据表明它同样适用于视听环境^[106]。

3.3 增加运动相关的视觉线索

空间感知是需要多模态信息整合的过程, 其中视觉起了最主要的作用。双视觉系统假说 (Two visual system hypothesis, TVSH) 是在神经生理和行为层面解释人类视觉知觉的最可靠假说, 该理论认为与感知觉和动作相关的视觉刺激通过 2 个不同的通道处理, 这 2 种通道在神经解剖学和功能上都是分离的, 分别是腹侧流 (Ventral stream) 和背侧流 (Dorsal stream)。腹侧处理与感知觉相关的视觉, 而背侧流负责与动作相关的视觉^[107], 见图 3。

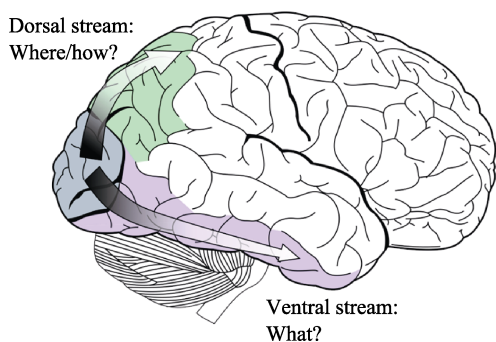


图 3 人脑的背侧与腹侧视觉流
Fig.3 Dorsal stream and ventral stream of human brain

基于这 2 种视觉系统, 视觉线索可以被分为 2 种: 物体辨认行为和视觉指导行为。腹侧流在处理客体相关信息, 如客体形状、尺寸、颜色、位置等方面有很重要的作用^[108-109]。背侧流则在处理与动作相关的信息, 如方向、运动、遮挡、阴影和几何表面图案更重要^[109-110]。基于此, AHN 等^[107]将视觉线索分为了 2 类: 视动作线索 (Visual Cues for Action, VCA) 和视知觉线索 (Visual Cues for Perception, VCP)。同时, 他们对这 2 种线索的操作进行了实验, 并发现通过提供 VCA 缓解了对距离的低估, 提高了被试者对于距离的感知准确度。同时也提出, 对于需要更广泛用户操作范围的 VE, VCA 需要得到更恰当的利用。

4 结语

为了使虚拟现实技术得到更好的推广和应用, 提高虚拟环境中距离感知的准确性非常重要。传统的 VR 是由图形技术驱动的, 但近年来 VR 已经转向多感官体验的模拟。因此, 虚拟环境中的空间压缩不仅是视觉感知的问题, 声音、触觉等因素也对距离感知有重要影响^[31], 而该问题的解决涉及心理学、计算机以及其他多种学科。本文主要基于心理学认知视角系统分析了虚拟环境中空间压缩产生的原因, 影响空间距离感知的因素, 从认知视角改善虚拟现实环境中空间压缩的方法, 以及如何将这些方法应用于未来以提高虚拟现实环境中的距离感知准确性。

综上所述, 为了减少虚拟世界与现实世界的认知冲突, 我们提出了 3 种有助于增加 VE 内距离估计准确性的因素, 从而使对距离的感知更类似于现实世界。它们分别是: 真实世界环境的视觉经验; 运动经验和基于身体的 VE 经验, 该项又进一步细分为虚拟形象体验和眼睛高度的体验。在 VE 中, 由于信息减少或缺失导致不确定性增加, 所以需要明确指定基于身体的信息。此外, 众多研究表明, 虚拟现实设备的硬件问题也是影响空间压缩的重大原因^[6,19,21], 其中 HMD 技术的 2 个重大变化 (FOV 和重量) 影响了这些线索的 1 部分。分析表明需要对 VE 中的距离感知进行额外校准, 并且可以通过不同的线索提供这种校准。总结的 6 种受经验和技術影响的校准线索, 见图 4。包括: 环境背景 (Environment Context)、地表线索 (Ground Surface Cues)、视觉身体尺度 (Visual Body Scale)、眼睛高度尺度偏角 (Eye Height-scaled Angle of Declination)、知觉-运动耦合 (Perceptual-Motor Coupling) 和存在感 (Presence)。这些线索受经验和技術影响以校准虚拟环境中的绝对比例感知。其中一些线索与现实世界中传统定义的绝对距离线索直接相关 (例如地表线索或偏角), 其他线索则更具体针对虚拟世界的独特环境, 例如视觉身体、感知-运动耦合、存在感等。

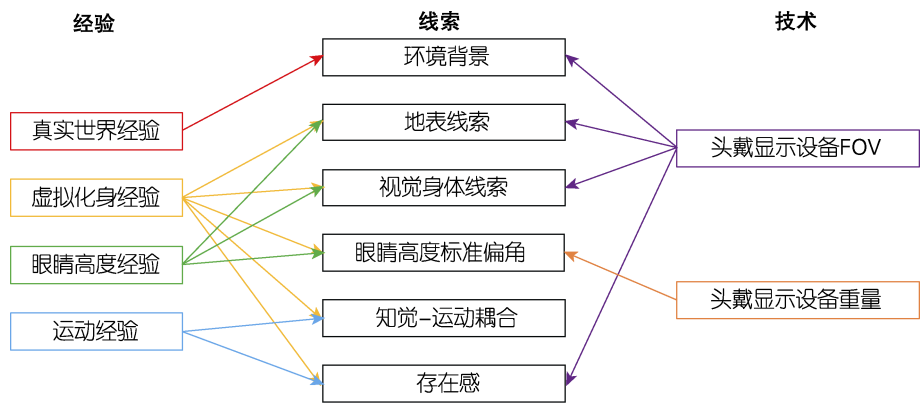


图 4 虚拟环境中绝对比例感知的校准模型^[22]
Fig.4 Calibration model for absolute scale awareness in virtual environment^[22]

因此,要提高虚拟环境中的距离感知,最重要的是提供丰富的线索,比如提供丰富的深度线索,增加过渡场景或提供更真实的场景等。此外,还可提供虚拟人物或虚拟身体通过增强用户的存在感以改善距离感知。

但就用户的存在感而言,尽管前人进行了一系列研究,但这个问题还有许多未解之处,需要做进一步研究。

1) 随着渲染技术和硬件性能的不断提高,图像质量可能不断提高,但图像质量是否与虚拟环境中的距离估计有关还需验证。

2) 环境背景的影响是未来研究的方向之一,如何通过增加虚拟环境背景中的各种线索信息以减少虚拟与现实环境的感知冲突仍需进一步探讨,而在虚拟环境中提供不一致环境可以提高虚拟环境距离估计的准确性等不失为一系列有效的方法。

3) 虚拟环境中空间压缩现象的适应问题是否对在真实场景中的应用有影响是在应用方面很重要的问题。

总之,尽管在虚拟环境中距离感知的研究已有很多,但仍有很多问题和瓶颈需进一步澄清和解决。未来应进行更多关于在虚拟环境中增强距离感知的研究,以更深入地了解更多关于人类感知的适应性。

参考文献:

- [1] AKKIRAJU N, EDELSBRUNNER H, FU P, et al. Viewing Geometric Protein Structures from Inside a Cave[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(4): 58-61.
- [2] YANG X, MALAK R C, LAUER C, et al. Virtual Reality Enhanced Manufacturing System Design[C]// Proceedings of the 7th CIRP International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens: Griechenland, 2011: 125-133.
- [3] LOFTIN R B, SCERBO M W, MCKENZIE F D, et al. Training in Peacekeeping Operations Using Virtual Environments[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(4): 18-21.
- [4] BACKLUND P, ENGSTROM H, HAMMAR C, et al. Sidh - A Game Based Firefighter Training Simulation[C]// 2007 11th International Conference Information Visualization. Zurich: IEEE, 2007: 899-907.
- [5] LOOMIS J M, PHILBECK J W. Measuring Spatial Perception with Spatial Updating and Action[M]// Embodiment, Ego-space, and Action. New York: Psychology Press, 2008: 1-43.
- [6] RENNER R S, VELICHKOVSKY B M, HELMERT J R. The Perception of Egocentric Distances in Virtual Environments -A Review[J]. ACM Computing Surveys. 2013, 46(2): 1-40.
- [7] FRENZ H, LAPPE M. Visual Distance Estimation in Static Compared to Moving Virtual Scenes[J]. The Spanish Journal of Psychology, 2006, 9(2): 321-331.
- [8] BEESLEY T, YUN TOU Y, WALSH J. Examining the Role of Depth Information in Contextual Cuing Using a Virtual Reality Visual Search Task[J]. Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance, 2022, 48(12): 1313-1324.
- [9] KELLY J, DOTY T, AMBOURN M, et al. Distance Perception in the Oculus Quest and Oculus Quest 2[J]. Frontiers in Virtual Reality, 2022, 3: 850471.
- [10] ASEERI S, PARAISO K, INTERRANTE V. Investigating the Influence of Virtual Human Entourage Elements on Distance Judgments in Virtual Architectural Interiors[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2019, 6: 44.
- [11] BUCK L, YOUNG M, BODENHEIMER B. A Comparison of Distance Estimation in HMD-based Virtual Environments with Different HMD-based Conditions[J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2018, 15: 1-15.
- [12] MARUHN P, SCHNEIDER S, BENGLER K. Measuring Egocentric Distance Perception in Virtual Reality: Influence of Methodologies, Locomotion and Translation Gains[J]. PLOS ONE, 2019, 14(10): e0224651.
- [13] CREEM-REGEHR S H, STEFANUCCI J K, THOMPSON W B. Chapter Six - Perceiving Absolute Scale in Virtual Environments: How Theory and Application Have Mutually Informed the Role of Body-based Perception[M/OL]. Cambridge: Academic Press, 2015[2023-8-7]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079742114000073>.
- [14] CUTTING J E, VISHTON P M. Perceiving layout and knowing distances: The Integration, Relative Potency, and Contextual Use of Different Information about Depth[M]// Perception of Space and Motion. Cambridge: Academic Press, 1995: 69-117.
- [15] PROFFITT D R, CAUDEK C. Depth Perception and the Perception of Events[J]. Handbook of Psychology: Experimental Psychology, 2003, 4: 213-236.
- [16] ZIEMER C J, PLUMERT J M, CREMER J F, et al. Estimating Distance in Real and Virtual Environments: Does Order Make a Difference? [J]. Attention, Perception, & Psychophysics, 2009, 71(5): 1095-1106.
- [17] WITMER B G, SADOWSKI W J. Nonvisually Guided Locomotion to a Previously Viewed Target in Real and Virtual Environments[J]. Human Factors, 1998, 40: 478-488.
- [18] GRECHKIN T Y, NGUYEN T D, PLUMERT J M, et al. How Does Presentation Method and Measurement Protocol Affect Distance Estimation in Real and Virtual Environments? [J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2010, 7(4): 26:1-26:18.
- [19] KELLY J W. Distance Perception in Virtual Reality: A Meta-analysis of the Effect of Head-mounted Display

- Characteristics[EB/OL]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, (2022-08-04) [2023-08-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35925852/>
- [20] LOOMIS J M, DA SILVA J A, FUJITA N, et al. Visual Space Perception and Visually Directed Action[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1992, 18(4): 906-921.
- [21] CREEM-REGEHR S H, STEFANUCCI J K, BODENHEIMER B. Perceiving Distance in Virtual Reality: Theoretical Insights from Contemporary Technologies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2023, 378(1869): 20210456.
- [22] PHILLIPS L, RIES B, INTERRANTE V, et al. Distance perception in NPR immersive virtual environments, revisited[C]// *Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2009: 11-14.
- [23] RIES B, INTERRANTE V, KAEDING M, et al. Analyzing the effect of a virtual Avatar's Geometric and Motion Fidelity on Ego-centric Spatial Perception in Immersive Virtual Environments[C/OL]// *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. New York: Association for Computing Machinery, 2009: 59-66[2023-08-07]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1643928.1643943>.
- [24] PHILLIPS L, RIES B, KAEDING M, et al. Avatar Self-embodiment Enhances Distance Perception Accuracy in Non-photorealistic Immersive Virtual Environments[C/OL]// 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR). Boston: IEEE, 2010: 115-1148. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5444802>.
- [25] STEINICKE F, BRUDER G, HINRICHS K, et al. Gradual Transitions and Their Effects on Presence and Distance Estimation[J]. *Computers & Graphics*, 2010, 34(1): 26-33.
- [26] NGUYEN T D, GRECHKIN T, CREMER J, et al. Effect of Measurement Setting in Judging Traveled Distance: Additional Evidence for Underestimation of Distance in Virtual Environments[C/OL]// *Proceedings of the 7th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 159. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1836248.1836281>.
- [27] JONES J, KRUM D, BOLAS M. Vertical Field-of-View Extension and Walking Characteristics in Head-worn Virtual Environments[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2016, 14(2): 1-17.
- [28] KELLY J, CHEREP L, SIEGEL Z. Perceived Space in the HTC Vive[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2017, 15(1): 1-16.
- [29] KANG J H, YADAV N, RAMADOSS S, et al. Reliability of Distance Estimation in Virtual Reality Space: A Quantitative Approach for Construction Management[J]. *Computers in Human Behavior*, 2023, 145: 107773.
- [30] FELDSTEIN I T, KÖLSCH F M, KONRAD R. Ego-centric Distance Perception: A Comparative Study Investigating Differences Between Real and Virtual Environments[J]. *Perception*, 2020, 49(9): 940-967.
- [31] FINNEGAN D J, O'NEILL E, PROULX M J. Compensating for Distance Compression in Audiovisual Virtual Environments Using Incongruence[C/OL]// *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. San Jose: Association for Computing Machinery, 2016: 200-212[2022-08-07]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2858036.2858065>.
- [32] GORI M, GIULIANA L, SANDINI G, et al. Visual Size Perception and Haptic Calibration during Development: Visual Size Perception and Haptic Calibration[J]. *Developmental Science*, 2012, 15(6): 854-862.
- [33] LIU D, RAU P L P. Spatially Incongruent Sounds Affect Visual Localization in Virtual Environments[J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2020, 82(4): 2067-2075.
- [34] PROFFITT D R, STEFANUCCI J, BANTON T, et al. The Role of Effort in Perceiving Distance[J]. *Psychological Science*, 2003, 14(2): 106-112.
- [35] TAKAHASHI K, MEILINGER T, WATANABE K, et al. Psychological Influences on Distance Estimation in a Virtual Reality Environment[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2013, 7: 1-7.
- [36] KÜNNAPAS T. Distance Perception as a Function of Available Visual Cues[J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1968, 77(4): 523-529.
- [37] PHILBECK J W, LOOMIS J M. Comparison of Two Indicators of Perceived Egocentric Distance under Full-cue and Reduced-cue Conditions[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1997, 23(1): 72-85.
- [38] KAUFMAN L, KAUFMAN J H. Explaining the Moon Illusion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(1): 500-505.
- [39] EGGLESTON R G, JANSON W P, ALDRICH K A. Virtual Reality System Effects on Size-distance Judgments in a Virtual Environment[C]// *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium*. New York: IEEE, 1996: 139-146.
- [40] ROUMES C, MEEHAN J W, PLANTIER J, et al. Distance Estimation in a 3-D Imaging Display[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2001, 11(4): 381-396.
- [41] WILLEMSSEN P, GOOCH A A, THOMPSON W B, et al. Effects of Stereo Viewing Conditions on Distance Perception in Virtual Environments[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2008, 17(1): 91-101.
- [42] LUO X, KENYON R V, KAMPER D G, et al. On the

- Determinants of Size-constancy in a Virtual Environment[J]. *International Journal of Virtual Reality*, 2009, 8(1): 43-51.
- [43] BINGHAM G P, BRADLEY A, BAILEY M, et al. Accommodation, Occlusion, and Disparity Matching are Used to Guide Reaching: A Comparison of Actual Versus Virtual Environments[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2001, 27(6): 1314-1334.
- [44] SURDICK R T, DAVIS E T, KING R A, et al. The Perception of Distance in Simulated Visual Displays: A Comparison of the Effectiveness and Accuracy of Multiple Depth Cues Across Viewing Distances[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1997, 6(5): 513-531.
- [45] TAI N C. Daylighting and Its Impact on Depth Perception in a Daylit Space[J]. *Journal of Light & Visual Environment*, 2012, 36(1): 16-22.
- [46] WITMER B G, KLINE P B. Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1998, 7(2): 144-167.
- [47] SINAI M, KREBS W, DARKEN R, et al. Egocentric Distance Perception in a Virtual Environment Using a Perceptual Matching Task[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1999, 43(22): 1256-1260.
- [48] KENYON R V, SANDIN D, SMITH R C, et al. Size-Constancy in the CAVE[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2007, 16(2): 172-187.
- [49] KENYON R V, PHENANY M, SANDIN D, et al. Accommodation and Size-constancy of Virtual Objects[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2008, 36(2): 342-348.
- [50] BODENHEIMER B, MENG J, WU H, et al. Distance Estimation in Virtual and Real Environments Using Bisection[C]// *Proceedings of the 4th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2007: 35-40.
- [51] LAPPIN J S, SHELTON A L, RIESER J J. Environmental Context Influences Visually Perceived Distance[J]. *Perception & Psychophysics*, 2006, 68(4): 571-581.
- [52] WITT J K, STEFANUCCI J K, RIENER C R, et al. Seeing beyond the Target: Environmental Context Affects Distance Perception[J]. *Perception*, 2007, 36(12): 1752-1768.
- [53] CREEM-REGEHR S H, WILLEMSSEN P, GOOCH A A, et al. The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception: Implications for Real and Virtual Indoor Environments[J]. *Perception*, 2005, 34(2): 191-204.
- [54] MOHLER B, BÜLTHOFF H, THOMPSON W, et al. A Full-body Avatar Improves Egocentric Distance Judgments in an Immersive Virtual Environment[C]// *Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV 08)*. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 194-197.
- [55] LEYRER M, LINKENAUER S A, BÜLTHOFF H H, et al. The Influence of Eye Height and Avatars on Egocentric Distance Estimates in Immersive Virtual Environments[C]// *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2011: 67-74.
- [56] LIN Q, XIE X, ERDEMIR A, et al. Egocentric Distance Perception in Real and HMD-based Virtual Environments: The Effect of Limited Scanning Method[C]// *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2011: 75-82.
- [57] MCMANUS E A, BODENHEIMER B, STREUBER S, et al. The Influence of Avatar (Self and Character) Animations on Distance Estimation, Object Interaction and Locomotion in Immersive Virtual Environments[C]// *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2011: 37-44.
- [58] RICHARDSON A R, WALLER D. The Effect of Feedback Training on Distance Estimation in Virtual Environments[J]. *Applied Cognitive Psychology*, 2005, 19(8): 1089-1108.
- [59] MOHLER B J, CREEM-REGEHR S H, THOMPSON W B. The Influence of Feedback on Egocentric Distance Judgments in Real and Virtual Environments[C]// *Proceedings of the 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 9-14.
- [60] ALTENHOFF B M, NAPIERALSKI P E, LONG L O, et al. Effects of Calibration to Visual and Haptic Feedback on Near-field Depth Perception in an Immersive Virtual Environment[C]// *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*. New York: Association for Computing Machinery, 2012: 71-78.
- [61] WALLER D, RICHARDSON A R. Correcting Distance Estimates by Interacting with Immersive Virtual Environments: Effects of Task and Available Sensory Information[J]. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2008, 14(1): 61-72.
- [62] JONES J A, SWAN J E, SINGH G, et al. Peripheral Visual Information and Its Effect on Distance Judgments in Virtual and Augmented Environments[C]// *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York: Association for Computing Machinery,

- 2011: 29-36.
- [63] JONES J A, SUMA E A, KRUM D M, et al. Comparability of Narrow and Wide Field-of-View Head-Mounted Displays for Medium-Field Distance Judgments[C]// Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception. New York: Association for Computing Machinery, 2012: 119.
- [64] KUHLE S A, CREEM-REGEHR S H, THOMPSON W B. Individual Differences in Accuracy of Blind Walking to Targets on the Floor[J]. *Journal of Vision*, 2006, 6(6): 726-726.
- [65] INTERRANTE V, RIES B, ANDERSON L. Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited[C]// IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006). Alexandria: IEEE, 2006: 3-10.
- [66] JONES J A, SWAN J E, SINGH G, et al. The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Motion Parallax on Egocentric Depth Perception[C]// Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 9-14.
- [67] NACERI A, CHELLALI R. The Effect of Isolated Disparity on Depth Perception in Real and Virtual Environments[C]// 2012 IEEE Virtual Reality Workshops (VRW). New York: IEEE, 2012: 107-108.
- [68] PLUMERT J M, KEARNEY J K, CREMER J F, et al. Distance Perception in Real and Virtual Environments[J]. *ACM Trans. Appl. Percept*, 2005, 2(3): 216-233.
- [69] MURGIA A, SHARKEY P M. Estimation of Distances in Virtual Environments Using Size Constancy[J]. *International Journal of Virtual Reality*, 2009, 8(1): 67-74.
- [70] ARMBRÜSTER C, WOLTER M, KUHLEN T, et al. Depth Perception in Virtual Reality: Distance Estimations in Peri and Extrapersonal Space[J]. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 2008, 11(1): 9-15.
- [71] PHILLIPS L, INTERRANTE V, KAEDING M, et al. Correlations between Physiological Response, Gait, Personality, and Presence in Immersive Virtual Environments[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2012, 21(2): 119-141.
- [72] TELLEGEN A, ATKINSON G. Openness to Absorbing and Self-altering Experiences ("Absorption"), a Trait Related to Hypnotic Susceptibility[J]. *Journal of Abnormal Psychology*, 1974, 83(3): 268-277.
- [73] CAMPBELL C S, ZHAI S, MAY K M, et al. What You Feel Must Be What You See: Adding Tactile Feedback to the Trackpoint[C]// INTERACT. Berlin: Springer, 1999: 383-390.
- [74] VITENSE H S, JACKO J A, EMERY V K. Multimodal Feedback: An Assessment of Performance and Mental Workload[J]. *Ergonomics*, 2003, 46(1-3): 68-87.
- [75] STRYBEL T Z, PERROTT D R. Discrimination of Relative Distance in the Auditory Modality: The Success and Failure of the Loudness Discrimination Hypothesis[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1984, 76(1): 318-320.
- [76] MERSHON D H, KING L E. Intensity and Reverberation as Factors in the Auditory Perception of Egocentric Distance[J]. *Perception & Psychophysics*, 1975, 18: 409-415.
- [77] BUTLER R A, LEVY E T, NEFF W D. Apparent Distance of Sounds Recorded in Echoic and Anechoic Chambers[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1980, 6(4): 745-750.
- [78] ZAHORIK P. Direct-to-reverberant Energy Ratio Sensitivity[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112(5): 2110-2117.
- [79] BRUNS P, RÖDER B. Repeated but not Incremental Training Enhances Cross-modal Recalibration[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2019, 45(4): 435.
- [80] CHEN L, VROOMEN J. Intersensory Binding across Space and Time: A Tutorial Review[J]. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2013, 75: 790-811.
- [81] SPENCE J C. High-resolution Electron Microscopy[M]. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [82] WALLACE M T, ROBERSON G, HAIRSTON W D, et al. Unifying Multisensory Signals across Time and Space[J]. *Experimental Brain Research*, 2004, 158: 252-258.
- [83] WOODS A J, PHILBECK J W, DANOFF J V. The Various Perceptions of Distance: An Alternative View of How Effort Affects Distance Judgments[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2009, 35(4): 1104-1117.
- [84] VAN DER STOEP N, NIJBOER T C W, VAN DER STIGCHEL S, et al. Multisensory Interactions in the Depth Plane in Front and Rear Space: A Review[J]. *Neuropsychologia*, 2015, 70: 335-349.
- [85] CHAN J S, MAGUINNESS C, LISIECKA D, et al. Evidence for Crossmodal Interactions across Depth on Target Localization Performance in a Spatial Array[J]. *Perception*, 2012, 41(7): 757-773.
- [86] ALAIS D, BURR D. The Ventriloquist Effect Results from Near-optimal Bimodal Integration[J]. *Current Biology*, 2004, 14(3): 257-262.
- [87] BURR D, ALAIS D. Combining Visual and Auditory Information[J]. *Progress in Brain Research*, 2006, 155: 243-258.
- [88] ERNST M O, BANKS M S. Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion[J]. *Nature*, 2002, 415(6870): 429-433.
- [89] KEARNEY G, GORZEL M, BOLAND F, et al. Depth Perception in Interactive Virtual Acoustic Environments Using Higher Order Ambisonic Soundfields[C]// Proc of the 2nd International Symposium on Ambi-

- sonics and Spherical Acoustics. Paris: Boland, 2010: 6-7.
- [90] STEINICKE F, BRUDER G, HINRICHS K, et al. Transitional Environments Enhance Distance Perception in Immersive Virtual Reality Systems[C]// Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization. NewYork: Association for Computing Machinery, 2009: 19-26.
- [91] SLATER M, STEED A, MCCARTHY J, et al. The Virtual Ante-room: Assessing Presence through Expectation and Surprise[C]// Slater 1998 the VA. Pennsylvania: CiteseerX, 1998: 1-8.
- [92] SLATER M, USOH M, STEED A. Depth of Presence in Virtual Environments[J]. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 1994, 3(2): 130-144.
- [93] SLATER M, USOH M, STEED A. Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality[J]. ACM Transactions on Computer-human Interaction, 1995, 2(3): 201-219.
- [94] DINH H Q, WALKER N, HODGES L F, et al. Evaluating the Importance of Multi-Sensory Input on Memory and the Sense of Presence in Virtual Environments[C]// Proceedings IEEE Virtual Reality. NewYork: IEEE, 1999: 222-228.
- [95] UNO S, SLATER M. The Sensitivity of Presence to Collision Response[C]// Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality. NewYork: IEEE, 1997: 95-103.
- [96] IJSSELSTEIJN W, DE RIDDER H, FREEMAN J, et al. Effects of Stereoscopic Presentation, Image Motion, and Screen Size on Subjective and Objective Corroborative Measures of Presence[J]. Presence, 2001, 10(3): 298-311.
- [97] MEEHAN M, RAZZAQUE S, WHITTON M C, et al. Effect of Latency on Presence in Stressful Virtual Environments[C]// IEEE Virtual Reality 2003 Proceedings. NewYork: IEEE, 2003: 141-148.
- [98] HENDRIX C, BARFIELD W. Presence within Virtual Environments as a Function of Visual Display Parameters[J]. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 1996, 5(3): 274-289.
- [99] USOH M, ARTHUR K, WHITTON M C, et al. Walking> Walking-in-place> Flying, in Virtual Environments[C]// Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. NewYork: ACM Press, 1999: 359-364.
- [100] RAZZAQUE S, SWAPP D, SLATER M, WHITTON, et al. A Redirected Walking in Place[C]// EGVE02: Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments. Goslar: The Eurographics Association, 2002: 123-130.
- [101] INTERRANTE V, RIES B, LINDQUIST J, et al. Elucidating Factors that can Facilitate Veridical Spatial Perception in Immersive Virtual Environments[J]. Presence-Teleoperators and Virtual Environments, 2008, 17(2): 176-198.
- [102] ZHOU Z, CHEOK A D, YANG X, et al. An Experimental Study on the Role of 3D Sound in Augmented Reality Environment[J]. Interacting with Computers, 2004, 16(6): 1043-1068.
- [103] GORZEL M, CORRIGAN D, SQUIRES J, et al. Distance Perception in Real and Virtual Environments[C]// Audio Engineering Society Conference: Spatial Audio in Today's 3D World. NewYork: Audio Engineering Society, 2012.
- [104] TURNER A, BERRY J, HOLLIMAN N. Can the Perception of Depth in Stereoscopic Images Be Influenced by 3D Sound?[C]// Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Washington: SPIE, 2011: 7863.
- [105] SUN H J, CAMPOS J L, CHAN G S W. Multisensory Integration in the Estimation of Relative Path Length[J]. Experimental Brain Research, 2004, 154(2): 246-254.
- [106] BATTAGLIA P W, JACOBS R A, ASLIN R N. Bayesian Integration of Visual and Auditory Signals for Spatial Localization[J]. Journal of the Optical Society of America. 2003, 20(7): 1391-1397.
- [107] AHN S, KIM S, LEE S. Effects of Visual Cues on Distance Perception in Virtual Environments Based on Object Identification and Visually Guided Action[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2021, 37(1): 36-46.
- [108] GOODALE M A, MILNER A D. Separate Visual Pathway for Perception and Action[J]. Trends in neurosciences, 1992, 15(1): 20-25.
- [109] LEE Y, KIM S. Effects of Indoor Gardening on Sleep, Agitation, and Cognition in Dementia Patients—A Pilot Study[J]. International Journal of Geriatric Psychiatry, 2008, 23(5): 485-489.
- [110] HEBART M N, HESSELMANN G. What Visual Information is Processed in the Human Dorsal Stream? [J]. Journal of Neuroscience, 2012, 32(24): 8107-8109.

责任编辑：蓝英侨