

# 基于距离认知的虚拟现实指点交互行为研究<sup>①</sup>

于佳雯, 潘伟杰, 吕 健, 付文娟

(贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025)  
通信作者: 潘伟杰, E-mail: 290008933@qq.com



**摘 要:** 虚拟现实中自我中心距离的准确认知、指点光标的合理设计对用户的交互体验及任务执行效率起着至关重要的作用. 结合费茨定律在三维指点任务中的拓展研究, 以指点光标类型、自我中心距离、目标大小及方位角作为变量, 展开虚拟空间指点交互实验研究. 首先提出指点光标、自我中心距离、目标大小及方位角的不同对自我中心距离认知准确性及目标指点速度存在影响等 6 个假设. 其次通过分析实验数据所得目标指点准确度及目标指点时间, 讨论自我中心距离认知准确度与目标指点速度的变化规律. 实验结果表明, 在虚拟现实中, 指点光标、目标大小对自我中心距离认知准确度、目标指点速度均有显著性影响, 目标方位角、自我中心距离仅对目标指点速度有显著性影响; 指点光标与自我中心距离对自我中心距离认知准确度及目标指点速度均有双向交互效应. 两种指点光标的目标指点时间均与难度系数线性正相关, 即符合费茨定律在三维指点任务中的扩展模型. 该结论揭示了自我中心距离认知的影响因素, 能够有效指导虚拟现实中交互方式及三维指点任务的设计.

**关键词:** 虚拟现实; 自我中心距离认知; 人机交互任务; 指点光标

引用格式: 于佳雯, 潘伟杰, 吕健, 付文娟. 基于距离认知的虚拟现实指点交互行为研究. 计算机系统应用, 2022, 31(3):9-18. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8361.html>

## Interactive Behavior Research of Pointing Cursors in Virtual Reality Based on Distance Cognition

YU Jia-Wen, PAN Wei-Jie, LYU Jian, FU Wen-Juan

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In virtual reality, the accurate cognition of egocentric distance and the reasonable design of pointing cursors play crucial roles in the user's interactive experience and task execution efficiency. Given the extended research of Fitts' law in three-dimensional pointing tasks, the interactive experiment of pointing cursors in virtual space is carried out taking the types of pointing cursors, egocentric distance, target size, and azimuth angles as variables. First, six hypotheses are proposed. For example, the difference among pointing cursors, egocentric distance, target size, and azimuth angles could affect the cognitive accuracy of egocentric distance and target pointing speed. Second, the target pointing accuracy and target pointing time are obtained based on the experimental data, and the change law of the cognitive accuracy of egocentric distance and target pointing speed is discussed. Experimental results show that in virtual reality, the pointing cursor and target size all have a significant effect on the cognitive accuracy of egocentric distance and the target pointing speed, while the target azimuth angles and egocentric distance could only significantly affect the target pointing speed. The pointing cursor and egocentric distance has a two-way interactive effect on the cognitive accuracy of egocentric distance and the target pointing speed. The target pointing time of the two kinds of pointing cursors is linearly and positively correlated with the difficulty coefficient, which is consistent with the extended model of Fitts' law in three-dimensional pointing tasks. This conclusion reveals the influencing factors of egocentric distance cognition, which can

<sup>①</sup> 基金项目: 国家自然科学基金 (52065010); 贵州省科技厅自然科学基金 (黔科合基础 [2018]1049); 贵州省科技厅科学支撑计划 (黔科合支撑 [2021] 一般 397)

收稿时间: 2021-05-11; 修改时间: 2021-06-14; 采用时间: 2021-06-21; csa 在线出版时间: 2022-01-24

effectively guide the design of interactive methods and three-dimensional pointing tasks in virtual reality.

**Key words:** virtual reality (VR); egocentric distance cognition; human-computer interaction task; pointing cursor

随着计算机仿真技术的进步、头戴式显示器 (head-mounted display, HMD) 的普及, 虚拟现实 (virtual reality, VR) 已成为当前研究的重点, 被广泛应用在外科、机舱安全程序安全培训、先进制造系统、可用性评估等领域. 用户使用 VR 系统时出现的视觉眩晕、物体认知误差等问题也逐渐得到当前研究者的关注.

人在虚拟环境中的空间认知能力比在现实环境中弱, 这阻碍其获得良好的交互体验. 研究表明, 人们在现实世界中的距离判断是准确的, 但是在 VR 中尤其是 HMD 界面中却倾向于低估距离<sup>[1]</sup>. 有效的交互需要准确的空间认知, 为解决虚拟环境中使用者距离认知低估问题, 相关学者尝试从交互任务<sup>[2]</sup>与非视觉刺激<sup>[3]</sup>两个角度进行了实验, 并取得了较好的成果. 空间环境提供的视觉线索已被证实对虚拟环境中的空间维度认知具有改善作用, 这表明将任务环境设计特征用于改善距离认知具有可行性<sup>[4]</sup>. 通过调整视差和瞳孔间距<sup>[5]</sup>、像素化周边帧<sup>[1]</sup>可改善虚拟环境中使用者的距离判断. Knapp 等使用 HMD 对比了视野受限和视野无限制两种视野范围, 实验结果显示, 参与者的视野是否受限并不能对被试的距离认知产生影响<sup>[6]</sup>. Hornsey 等研究了单目视觉和双目视觉下用户的虚拟环境距离认知差异<sup>[7]</sup>. Vienne 等研究了 VR 系统中屏幕距离对感知深度的影响<sup>[8]</sup>. Li 等的研究表明, 人在 VR 中的运动方式对其距离认知没有显著影响<sup>[9]</sup>. 多种交互方式及距离判断方法已被运用到距离认知准确性的研究中<sup>[10]</sup>. 一些研究者采用不同显示设备对比了人在 VR、增强现实和混合现实中距离认知的差异<sup>[11]</sup>. 近期有研究表明, 人在虚拟环境中对于目标物体尺寸的认识也存在低估问题<sup>[12]</sup>.

以上研究通过交互任务设计、任务环境布置等手段改善了 VR 环境中的空间认知准确性, 但均未考虑到指点光标类型与自我中心距离认知的关系, 且未结合三维指点任务进行研究. 本文从三维指点任务的角度出发, 通过分析被试的自我中心距离认知准确度及目标指点速度, 研究指点光标类型、自我中心距离以及三维指点任务的设计准则. 探讨 HMD 界面下指点光标、自我中心距离和三维指点任务设计对自我中心距离认知、目标指点速度的影响.

## 1 VR 中的自我中心距离认知

随着 VR 界面交互性的增强以及 HMD 的普及, 用户与界面的交互已经由视觉发展到三维空间上的操控, 因此, 准确认知自我中心距离、选择合适的指点光标、设计合理的三维指点任务尤为重要.

自我中心距离是指以观察者自身位置为中心到外部某一物体之间的深度距离, 人在虚拟环境中对自我中心距离的认知存在低估问题<sup>[13]</sup>, 如图 1 所示, 前人将此归因于测量方法与技术<sup>[14]</sup>、图形质量低<sup>[15]</sup>等问题. 且有研究证明, 自我中心距离越长, 距离认知准确度越低, 距离低估越显著<sup>[14]</sup>. 已有研究者将自我中心距离认知区域划分为以人为中心的 3 个圆形区域: 个人空间 (150 cm 以内), 动作空间 (150 cm 至 3 000 cm) 和远景空间 (超过 3 000 cm)<sup>[16]</sup>. 当前 VR 应用程序多围绕个人空间构建<sup>[17]</sup>, 因此本文研究的距离范围为个人空间. 自我中心距离认知通常可在人的额、侧、横向 3 个平面进行实验, 但由于额平面在虚拟环境中的应用更为重要<sup>[18]</sup>, 本研究主要针对额平面考察自我中心距离的认知.

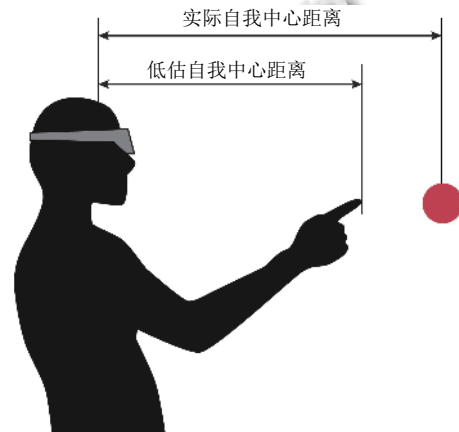


图 1 人在 VR 中的自我中心距离低估

VR 技术的发展丰富了用户在虚拟环境中的交互方式, 光标交互的广泛运用为自我中心距离的研究提供了新的可能. 光标交互是 VR 应用程序中常用的交互手段, 用户通过控制鼠标、手柄、手写笔等物理控件, 在虚拟环境中操作光标并执行特定任务. 随着 VR 技术的发展, 三维光标已逐渐替代传统平面光标被

运用到虚拟环境中的交互研究<sup>[19]</sup>,例如有研究者将虚拟仿真手光标、虚拟偏移光标、虚拟射线光标等用于目标指点<sup>[20]</sup>、远程拖动<sup>[21]</sup>实验,并针对任务执行准确率、目标指点速度的差异性进行了虚拟手光标和虚拟偏移光标的对比实验<sup>[20]</sup>。指点是图形用户界面中最基本的任务之一,用户在与目标进行其他交互前必须先执行目标指点<sup>[19]</sup>。当前研究已验证了三维光标在VR中的指点、拖动等操作性能,但将其用于自我中心距离认知并针对指点光标类型进行对比的研究较少。本研究将选取典型的指点光标进行对比实验,验证指点光标类型与自我中心距离认知的关系。

费茨定律作为一维及二维指点任务心理预测模型得到了广泛认可,已有研究者将其运用到VR中的指点定位、拖动操作任务<sup>[22]</sup>及按键布局<sup>[23]</sup>等方面。Fu等<sup>[24]</sup>研究了VR中多感官协同定位对费茨指点任务绩效的影响。费茨定律指出目标大小、起点与目标间距离影响使用者进行目标指点所需时间,目标越大、起点与目标间距离越小,目标指点所需时间越短<sup>[25]</sup>。Murata等<sup>[26]</sup>将目标方位角引入费茨定律,并指出相较于一维和二维指点任务,三维指点任务的目标指点时间更容易受目标方位角的影响。已有研究结合费茨定律二维指点任务中的因素,研究了VR中目标大小、起点与目标间距离对自我中心距离认知、目标指点速度的影响<sup>[27]</sup>。本文基于Murata等<sup>[26]</sup>对费茨定律的扩展研究,重点关注三维指点任务中目标方位角、目标大小对VR中自我中心距离认知及目标指点速度的影响,并验证该研究在VR中对三维指点任务预测的有效性。

## 2 虚拟空间指点交互实验

### 2.1 实验假设

实验将围绕VR中个人空间的自我中心距离认知、指点光标设计并结合费茨定律在三维指点任务中的拓展进行研究,通过设定自我中心距离、指点光标、目标大小与方位角4种变量因素,探讨自我中心距离认知准确度及目标指点速度的变化规律。

基于已有研究,本文提出6点假设,如表1所示。

### 2.2 实验设计

#### 2.2.1 实验变量及取值

本研究共4个变量因素:两种虚拟三维指点光标、3个自我中心距离、3种目标大小及5种目标方位角,如表2所示。

表1 实验假设

| 序号             | 假设                                      |
|----------------|---|
| H <sub>1</sub> | 自我中心距离与被试自我中心距离认知的准确度呈负相关               |
| H <sub>2</sub> | 自我中心距离与目标指点的速度呈负相关                      |
| H <sub>3</sub> | 指点光标类型对自我中心距离认知准确度存在影响,且不同自我中心距离下影响存在差异 |
| H <sub>4</sub> | 指点光标类型对目标指点速度存在影响,且不同自我中心距离下影响存在差异      |
| H <sub>5</sub> | 目标大小与目标指点速度呈正相关                         |
| H <sub>6</sub> | 目标方位角对目标指点速度存在影响                        |

表2 变量因素及其各水平取值

| 变量因素   | 水平     | 数值           |
|--------|--------|--------------|
| 光标     | 虚拟指杆光标 | —            |
|        | 虚拟手光标  | —            |
|        |        |              |
| 自我中心距离 | D1     | 45 cm        |
|        | D2     | 80 cm        |
|        | D3     | 115 cm       |
| 目标大小   | S1     | 7 cm         |
|        | S2     | 5 cm         |
|        | S3     | 3 cm         |
| 目标角度   | A1     | arcsin(1)    |
|        | A2     | arcsin(-1)   |
|        | A3     | arcsin(0.7)  |
|        | A4     | arcsin(-0.7) |
|        | A5     | arcsin(0)    |

(1) 指点光标: Dang将三维指点光标分为基于点的光标和基于线的光标<sup>[19]</sup>,本实验中基于点的光标采用虚拟手光标,基于线的光标采用虚拟指杆光标,如图2所示。依据我国成年人人体主要尺寸标准<sup>[28]</sup>,选取女性第五百分位的标准上臂长加前臂长并减去手柄部分误差,将最终长度均分为3份(10 cm、20 cm、30 cm)作为不同自我中心距离条件下的虚拟指杆长度。虚拟手光标则调整至最还原现实中被试的手掌大小及位置。

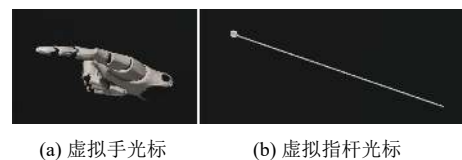


图2 两种指点光标示意图

(2) 自我中心距离: 本实验主要研究个人空间中的自我中心距离认知,即以被试为圆心半径为150 cm的圆形区域<sup>[16]</sup>。以被试所在位置为原点,将HMD显示位置至额平面150 cm处均分为5个距离,排除最近和最远端距离,选取45 cm、80 cm、115 cm为主要研究距离,如图3所示。

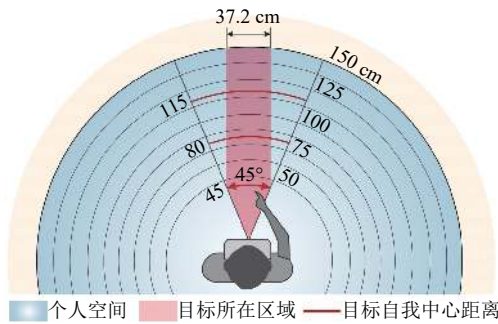


图3 实验目标目标所在自我中心距离及视角范围

(3) 目标大小及方位角: 参考已有实验范式, 以直径为 7 cm、5 cm、3 cm 的圆形为目标, 并将目标方位角按照正弦值分为 0、0.7、-0.7、1、-1 共 5 个水平<sup>[26,27]</sup>. 目标排列方式如图 4 所示.

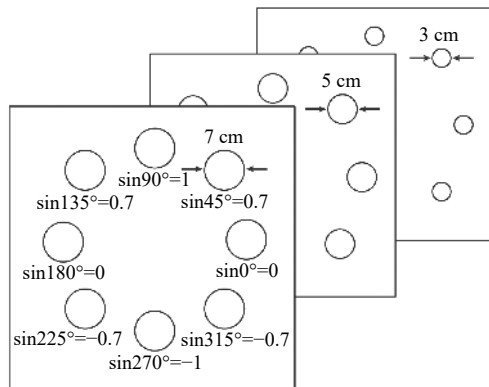


图4 目标大小及排列方式

2.2.2 评价指标

本研究中评价指标为目标指点的准确度及时间.

(1) 目标指点准确度 (accuracy, AC). 本研究中主要评价指标为目标指点 AC. 已有研究表明<sup>[29]</sup>, 可将三维指点任务中目标指点位置视为被试认知的目标位置, 因此目标指点 AC 可作为被试自我中心距离认知准确度的衡量标准. 目标指点 AC (如式 (1) 所示) 即认知值与实际值的接近程度, AC 值越接近于 1 代表自我中心距离认知越准确. 此前已有 Lin 等<sup>[27]</sup> 采用式 (1) 衡量自我中心距离的认知.

$$AC = \left(1 - \left| \frac{De - Da}{Da} \right| \right) \quad (1)$$

其中,  $De$  为被试认知到的自我中心距离,  $Da$  为实际自我中心距离.

(2) 目标指点移动时间 (movement time, MT). 目标

指点 MT 指被试将虚拟光标尖端从指定起点移动至虚拟目标所用时间. 在三维指点任务中, 目标指点 MT 越短, 代表目标指点速度越快<sup>[26]</sup>.

2.2.3 实验设置与流程

实验设计为  $2 \times 3 \times 3 \times 5$  (指点光标  $\times$  自我中心距离  $\times$  目标大小  $\times$  目标方位角) 的被试内重复测量设计方案. 将 3 种大小的红色虚拟目标按照设定的自我中心距离及角度投射至额平面, 目标高度均依据被试肩高进行调整, 如图 5 所示. 依据我国人机工程标准, 人眼对红色的色觉视野为  $45^\circ$ <sup>[28]</sup>, 对应实验中自我中心距离 45 cm 处额平面宽度为 37.2 cm, 为保持目标间距离一致, 所有目标最远中心距均设定为 37.2 cm, 如图 3.

实验按照指点光标 (虚拟指杆光标、虚拟手光标) 分为两组, 每组实验都分为预实验与正式实验两部分, 正式实验进行前被试需阅读显示器上的实验须知、熟悉佩戴 HMD、调整显示器瞳距并通过预实验练习实验具体操作流程, 随后进行正式实验. 为将记忆效果及肌肉疲劳的影响最小化, 将两组实验分为两天进行, 如图 6.

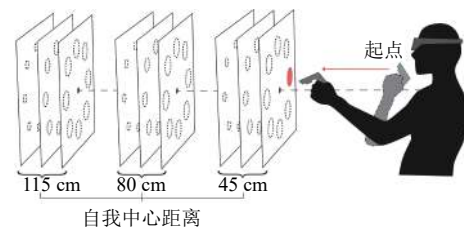


图5 实验任务示意图

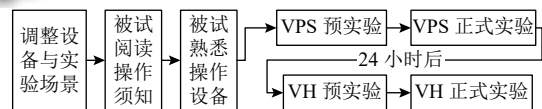


图6 实验流程

如图 5 所示, 每次仅在一个自我中心距离上随机显示一个目标. 被试通过操控手柄控制光标, 首先在起点处叩击手柄扳机 (起点与所有目标的中心在同一水平高度, 且位于显示器正下方), 此时目标出现并开始计时, 指点目标时再次叩击手柄扳机, 同时计时结束, 当前试次完成. 随后光标归位于起点, 被试开始下一试次.

所有被试均采用两种指点光标执行指点任务:

(1) 虚拟指杆光标指点: 被试以虚拟指杆尖端迅速指点

当前显示的目标,每个自我中心距离均对应不同长度的指杆。(2)虚拟手光标指点:被试通过虚拟手食指指尖指点出现的目标。

被试将虚拟指杆尖端或虚拟手指尖移动至目标位置并扣下手柄上的扳机即视为完成当前试次的自我中心距离认知及虚拟指杆光标/虚拟手光标指点任务。被试在任务执行过程中,若目标距离较远则可单脚迈出一大步,每个试次结束后均需回到原位。

### 2.3 被试与实验环境

实验共邀请了15名被试,其中8名男性、7名女性。所有被试均为18-25岁的在校学生,30%来自设计相关专业,70%来自计算机相关专业。所有被试视力均为正常或通过矫正达到正常水平,惯用手均为右手。

实验通过Unreal Engine 4完成实验平台搭建及任务开发。采用HTC Vive作为输入设备,如图7所示,可提供110°视场角,双眼像素分辨率为2880×1600。被试通过操控手柄移动虚拟光标,手柄输出的点击位置坐标及时间由系统自动记录。任务环境为一个无边际单一光源的黑色环境,避免其他因素对被试的距离认知造成影响,地面始终显示一个三角形标志以提示被试站立位置及方向。



图7 虚拟空间指点交互实验

### 2.4 数据处理

使用IBM SPSS Statistics 26对实验数据进行重复测量方差分析, $P < 0.05$ 则视为数据差异具有统计学意义。使用Matlab R2019b对实验数据进行线性拟合,并建立回归模型。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 目标指点AC的差异性比较

对AC数据进行重复测量方差分析,结果如下。

不同指点光标的目标指点AC有显著性差异( $F = 15.650, P = 0.001 < 0.05$ ) ( $F$ 表示显著性差异水平, $P$ 表

示检验水平),支持假设 $H_3$ ,即指点光标类型对自我中心距离认知准确度有显著性影响。结合图8可以看出,总体上,虚拟手光标的目标指点AC高于虚拟指杆光标。已有研究证明,在虚拟环境中增加被试熟悉的物体可以改善被试的距离认知准确度<sup>[16,30]</sup>,人体在VR中的模拟可以改善距离认知<sup>[31]</sup>。实验中虚拟手光标被调整至被试手的真实大小,为被试提供了一定的提示信息,导致被试使用虚拟手光标时总体自我中心距离认知准确度较高。

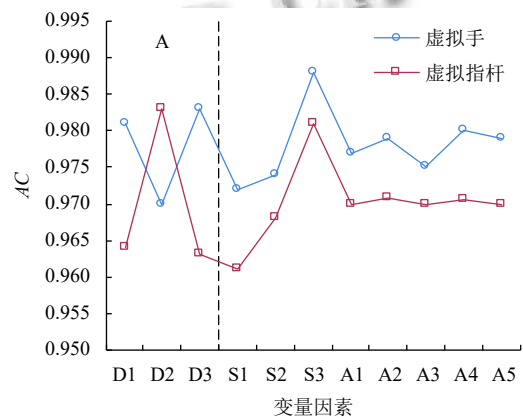


图8 各目标条件下虚拟手光标与虚拟指杆光标的平均目标指点AC

不同自我中心距离的目标指点AC无显著性差异( $F = 2.040, P = 0.149 > 0.05$ ),表明自我中心距离不能显著影响被试对其的认知准确度,假设 $H_1$ 不成立。这与前人的研究结果不同<sup>[14]</sup>,前人认为,由于人眼调节与会聚特性以及眼球转动范围的限制<sup>[32]</sup>,人在观察近距离目标时自我中心距离认知准确度会降低<sup>[33]</sup>。本实验依照人机工程标准将目标设定在人眼辨别的舒适区域内,上述人眼特性对实验结果的影响被降到了最低。同时本研究发现,被试在D1、D2、D3上均低估了自我中心距离,当目标分别显示在45 cm、80 cm和115 cm的自我中心距离上时,相应的距离认知平均值分别为44.36 cm ( $SD = 1.34$ )、78.50 cm ( $SD = 2.18$ )和113.05 cm ( $SD = 3.08$ ) ( $SD$ 表示标准差),这与已有研究结果一致<sup>[1]</sup>。

另外,本研究发现,目标大小对目标指点AC有显著性影响( $F = 9.245, P = 0.003 < 0.05$ ),即目标大小会显著影响被试的自我中心距离认知准确度。成对比较发现,直径为S3的目标指点AC显著高于S1 ( $P = 0.001 < 0.05$ )、S2 ( $P = 0.001 < 0.05$ ),直径为S2的目标指点AC显著高于S1 ( $P = 0.018 < 0.05$ ),即目标越小、目标指

点  $AC$  越高、自我中心距离认知准确度越高。通过不同大小目标的指点  $MT$  可知, 如图 9 所示, 被试在指点小尺寸目标时目标指点  $MT$  显著增加, 目标指点速度降低, 目标指点速度与准确性之间存在补偿关系<sup>[28]</sup>, 这可能是被试指点小目标时自我中心距离认知准确度更高的原因。除此之外, 目标方位角对目标指点  $AC$  无显著性影响 ( $F = 1.124, P = 0.394 > 0.05$ )。

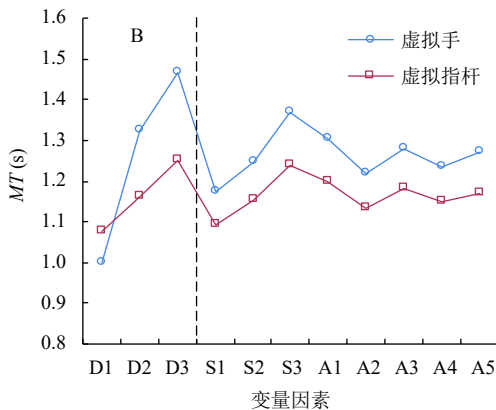


图9 各目标条件下虚拟手光标与虚拟指杆光标平均目标指点  $MT$

如图 8 中 A 区所示, 指点光标与自我中心距离对目标指点  $AC$  有双向交互效应 ( $F = 12.384, P = 0.001 < 0.05$ ), 支持假设  $H_3$ , 即两种指点光标对被试自我中心距离认知准确性的影响在不同自我中心距离下存在显著差异。根据简单效应检验结果, 可进一步分析各指点光标在 3 个自我中心距离下的目标指点  $AC$ 。

D1 条件下虚拟手光标的目标指点  $AC$  显著高于虚拟指杆光标 ( $P = 0 < 0.05$ ), 可见若目标位于被试自我中心距离 45 cm 处, 使用虚拟手光标指点目标的自我中心距离认知准确度更佳。被试在使用虚拟手光标靠近目标时, 较为容易观察到光标正在接近或已经穿过目标, 既获得一个隐性的视觉提示<sup>[16]</sup>。一方面, 被试在指点 D1 处的目标时无须移动身体, 因此视野较为平稳, 可以更好地观察目标与光标之间的遮挡关系。另一方面, 虚拟手光标与目标之间产生的遮挡关系较为明显, 而虚拟指杆光标与目标之间的遮挡关系相对微弱。

D2 条件下虚拟指杆光标的目标指点  $AC$  显著高于虚拟手光标 ( $P = 0 < 0.05$ ), 表明若目标位于被试自我中心距离 80 cm 处, 使用虚拟指杆光标指点目标的自我中心距离认知准确度更高。被试在指点 D2 处目标时

需大幅度伸展手臂, 因此使用两种指点光标进行目标指点时会调用不同的视觉系统, 即认知系统、感知运动系统, 感知运动系统的作用机制是条件反射, 不涉及对视觉信息的加工, 认知系统则会对视觉信息进行加工处理<sup>[34-36]</sup>。使用虚拟手光标时, 由于被试手的位置即虚拟手光标位置, 虚拟手光标的移动较为容易控制, 被试的视觉焦点和注意力主要集中在目标上, 倾向于依靠感知运动系统来控制手臂将虚拟手光标靠近目标; 若使用虚拟指杆光标, 被试则更为关注虚拟指杆光标与目标间的匹配关系, 倾向于调用认知系统来匹配虚拟指杆光标尖端和目标<sup>[36]</sup>。在 D2 处使用虚拟指杆光标的目标指点  $AC$  更高, 可能是由于被试调动了认知系统以实现虚拟指杆光标和虚拟手光标的位置匹配。

在 D3 条件下虚拟手光标的目标指点  $AC$  显著高于虚拟指杆光标 ( $P = 0 < 0.05$ ), 可见被试在指点自我中心距离为 115 cm 的目标时, 使用虚拟手光标指点目标的自我中心距离认知准确度更佳。Hale 等指出, 人体运动产生的运动视差可以改善人在虚拟环境中的距离认知<sup>[30]</sup>。被试在使用虚拟手光标选取 D3 处目标时, 需要移动身体以靠近目标, 因此通过运动视差获得了更好的自我中心距离认知。

另外, 交互光标类型与目标大小 ( $F = 3.541, P = 0.059$ )、目标方位角 ( $F = 0.604, P = 0.668$ ) 间的目标指点  $AC$  均无显著双向交互效应。

由以上实验分析可知, 在 VR 三维指点任务设计对自我中心距离准确度要求较高的情况下, 应将目标放置于被试自我中心距离 45 cm、115 cm 处, 并选择虚拟手光标进行交互; 或将目标放置于被试自我中心距离 80 cm 左右的区域, 并采用虚拟指杆光标进行交互。减小目标尺寸可以提高被试的自我中心距离认知准确度; 改变目标方位角对被试的自我中心距离认知准确度没有显著影响。

### 3.2 目标指点 $MT$ 的差异性比较

对  $MT$  数据进行重复测量方差分析, 结果如下。

不同指点光标类型的目标指点  $MT$  有显著性差异 ( $F = 4.728, P = 0.047 < 0.05$ ), 支持假设  $H_4$ , 即指点光标类型会显著影响三维指点任务的目标指点速度。结合图 9 可以看出, 被试使用虚拟指杆光标进行目标指点的总体  $MT$  小于使用虚拟手光标。这是由于被试使用虚拟手光标进行目标指点时, 手臂的实际移动路径较长, 导致其目标指点  $MT$  较长, 目标指点速度较慢。而

虚拟指杆光标延伸了被试自身手臂长度,使被试可以更迅速地指点目标。

不同自我中心距离的目标指点  $MT$  有显著性差异 ( $F = 13.787, P = 0.001 < 0.05$ )。结合表3可知, D1、D2、D3 间成对比较均存在显著差异, 被试在3种自我中心距离下指点目标所需  $MT$  排序为: D1<D2<D3, 支持假设  $H_2$ , 即自我中心距离影响三维指点任务的目标指点速度, 且自我中心距离越大, 目标指点速度越慢。目标

大小对目标指点  $MT$  有显著性影响 ( $F = 93.340, P = 0 < 0.05$ )。结合表3可知, S1、S2、S3 间成对比较均存在显著差异, 被试指点3种不同大小目标所需  $MT$  排序为: S1<S2<S3, 支持假设  $H_5$ , 即目标大小影响目标指点速度, 且目标尺寸越大, 目标指点速度越快。自我中心距离和目标大小对  $MT$  的影响遵循了前人对三维指点任务<sup>[26]</sup>的研究, 随着自我中心距离增加、目标尺寸减小, 被试的目标指点  $MT$  有所增加。

表3 自我中心距离、目标大小各水平成对比较结果

|        | D1 | D2                             | D3                 | 平均值 (s) | 标准误差  |            |
|--------|----|--------------------------------|--------------------|---------|-------|------------|
| 自我中心距离 | D1 | —                              | $P = 0 < 0.05$     | 1.039   | 0.050 | 支持假设 $H_2$ |
|        | D2 | $P = 0 < 0.05$                 | —                  | 1.241   | 0.073 |            |
|        | D3 | $P = 0 < 0.05$                 | $P = 0.008 < 0.05$ | 1.358   | 0.096 |            |
|        | 总体 | $F = 13.787, P = 0.001 < 0.05$ |                    |         |       |            |
|        | S1 | S2                             | S3                 | 平均值 (s) | 标准误差  |            |
| 目标大小   | S1 | —                              | $P = 0 < 0.05$     | 1.133   | 0.073 | 支持假设 $H_5$ |
|        | S2 | $P = 0 < 0.05$                 | —                  | 1.201   | 0.063 |            |
|        | S3 | $P = 0 < 0.05$                 | $P = 0 < 0.05$     | 1.304   | 0.072 |            |
|        | 总体 | $F = 93.340, P = 0 < 0.05$     |                    |         |       |            |

不同目标方位角的目标指点  $MT$  有显著性差异 ( $F = 5.007, P = 0.015 < 0.05$ ), 支持假设  $H_6$ , 即目标方位角显著影响目标指点速度。成对比较发现, 方位角 A2 的目标指点  $MT$  显著低于 A1 ( $P = 0.003 < 0.05$ )、A3 ( $P = 0.016 < 0.05$ )、A5 ( $P = 0.041 < 0.05$ ), 方位角 A4 的目标指点  $MT$  显著低于 A1 ( $P = 0.019 < 0.05$ )、A3 ( $P = 0.001 < 0.05$ )、A5 ( $P = 0.006 < 0.05$ )。已有研究证实, 在三维指向任务中, 指向下方目标所用  $MT$  小于指向上方目标<sup>[26]</sup>。另外, 本研究中方位角 A5 的目标指点  $MT$  显著低于 A3 ( $P = 0.026 < 0.05$ )。一方面可能是由于 A5 处的目标与起点夹角为  $0^\circ$ , 被试在指点时仅控制指点光标在水平面的移动, 因此目标指点速度较快。另一方面, 目标位置与人肩等高时人执行特定动作的速度较快<sup>[28]</sup>, 本实验根据被试肩高对目标高度进行了调整, 处于方位角 A5 的目标与被试肩高在同一水平高度。

如图9中B区所示, 指点光标类型与自我中心距离对目标指点  $MT$  有双向交互效应 ( $F = 22.506, P = 0 < 0.05$ ), 支持假设  $H_4$ , 即两种指点光标对目标指点速度的影响在不同自我中心距离下存在差异, 简单效应分析结果如下。

D1 条件下虚拟手光标的目标指点  $MT$  显著低于虚拟指杆光标 ( $P = 0.024 < 0.05$ ), 即被试指点自我中心

距离为 45 cm 的目标时, 使用虚拟手光标的目标指点速度更快。导致这种现象的原因, 一方面可能是由于被试对两种交互方式的熟练度不同, 采用虚拟手光标在近距离指点目标更接近被试日常生活中的交互活动(如: 触摸电子屏幕), 而被试在现实生活中极少会有类似于使用虚拟指杆光标的交互行为; 另一方面, 从人体测量学的角度解释<sup>[28]</sup>, 被试在使用有一定长度的虚拟指杆光标指点近距离目标时, 其运动会受到手掌和手臂位置的限制, 而被试使用虚拟手光标指点近距离目标时, 更容易控制手臂的运动。

D3 条件下虚拟手光标的目标指点  $MT$  显著大于虚拟指杆光标 ( $P = 0 < 0.05$ ), 可见被试指点自我中心距离为 115 cm 的目标时, 使用虚拟指杆光标的目标指点速度更快。被试使用虚拟手光标执行三维指点任务时, 手臂实际移动距离随自我中心距离增大而增长, 且增长速率较大, 这使得目标指点  $MT$  随之较快增长。而虚拟指杆光标在每个自我中心距离下均有相应的长度, 被试用其执行三维指点任务时, 手臂实际移动距离并不会随自我中心距离增大有明显增长, 因此目标指点  $MT$  不会产生明显增长。

另外, 交互光标类型与目标大小 ( $F = 1.728, P = 0.216$ )、目标方位角 ( $F = 0.190, P = 0.939$ ) 间的目标指

点  $MT$  均无显著双向交互效应。

根据上述实验分析可知, 在 VR 三维指点任务对目标指点速度要求较高的情况下, 应将目标放置于被试自我中心距离 80 cm、115 cm 处, 并使用虚拟指杆光标进行交互; 或将目标放置于被试自我中心距离 45 cm 左右的区域, 并采用虚拟手光标交互。增加目标尺寸、减小自我中心距离可以提高目标指点速度; 使目标与起点、用户肩高在同一水平高度或将目标置于起点下方可以提高目标指点速度

### 3.3 基于费茨定律的拟合度评价

根据 Murata 等对费茨定律的扩展研究,  $d$  与  $s$  的比值、 $\theta$  的正弦值越大, 难度系数 (index of difficulty,  $ID$ ) 越高, 三维指点任务的目标指点  $MT$  越长<sup>[26]</sup>, 如式 (2)、式 (3)。

$$ID = \log_2(d/s + 1.0)c \sin \theta \quad (2)$$

$$MT = a + bID \quad (3)$$

其中,  $d$  为任务中起点与目标间轨迹距离,  $s$  为目标大小,  $\theta$  为目标方位角,  $a$  和  $b$  为经验参数。

建立各指点光标目标指点  $MT$  与  $ID$  的线性回归模型, 如图 10 所示。两种指点光标用于三维指点任务的目标指点  $MT$  与  $ID$  均为显著线性正相关 (虚拟手:  $MT = 0.063 + 0.290ID$ ,  $R^2 = 0.832$ 、虚拟指杆:  $MT = 0.593 + 0.138ID$ ,  $R^2 = 0.950$ ) ( $R^2$  为拟合优度)。

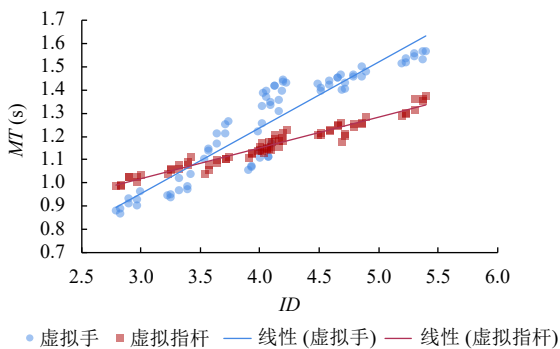
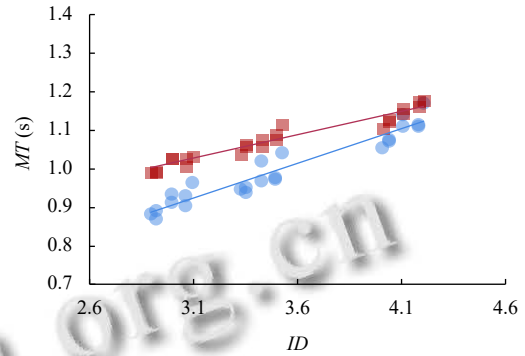


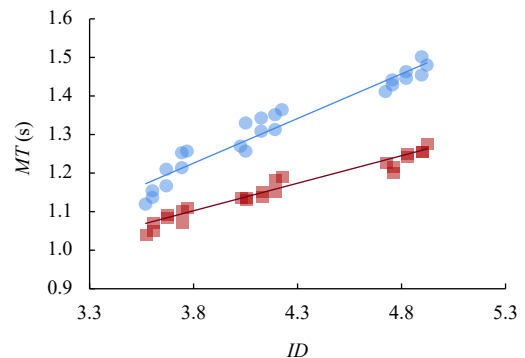
图 10 虚拟手光标/虚拟指杆光标的目标指点  $MT$  与  $ID$  的线性回归模型

各自我中心距离下虚拟手光标的目标指点  $MT$  与  $ID$  的拟合优度分别为:  $R^2_{D1} = 0.922$  ( $MT_{D1} = 0.360 + 0.182ID$ );  $R^2_{D2} = 0.903$  ( $MT_{D2} = 0.340 + 0.233ID$ );  $R^2_{D3} = 0.879$  ( $MT_{D3} = 0.936 + 0.113ID$ ); 各自我中心距离下虚拟指杆光标的目标指点  $MT$  与  $ID$  的拟合优度分别为:  $R^2_{D1} = 0.937$  ( $MT_{D1} = 0.644 + 0.124ID$ );  $R^2_{D2} = 0.919$

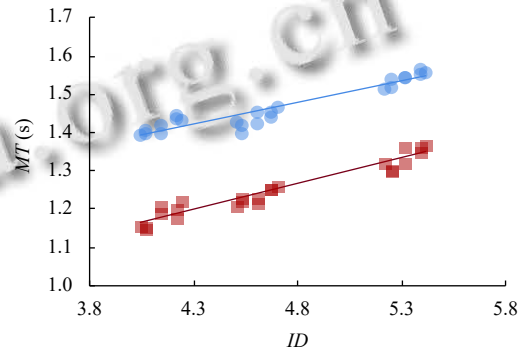
( $MT_{D2} = 0.587 + 0.136ID$ );  $R^2_{D3} = 0.900$  ( $MT_{D3} = 0.633 + 0.132ID$ ), 如图 11 所示。这表明该模型可用于 VR 中基于指点光标的三维指点任务预测。



(a) 自我中心距离 45 cm



(b) 自我中心距离 80 cm



(c) 自我中心距离 115 cm

图 11 各自我中心距离下虚拟手光标/虚拟指杆光标的

$MT$  与  $ID$  的线性回归模型

线性回归拟合线的斜率反映了  $ID$  增加导致的  $MT$  变化率, 即吞吐量。结合图 10 可知, 虚拟手光标的目标指点  $MT$  随  $ID$  增大而增长的速率较快, 即虚拟手光标的吞吐量相较于虚拟指杆光标更大。各自我中心距离下虚拟手光标/虚拟指杆光标与  $ID$  的拟合线如图 11。



D1、D2条件下,虚拟手光标的拟合线斜率高于虚拟指杆光标,可见目标位于被试自我中心距离45 cm、80 cm处时,虚拟手光标的目标指点 $MT$ 随 $ID$ 增大而增长的速率较快。D3条件下,虚拟手光标/虚拟指杆光标的拟合线斜率差异不大,即目标位于被试自我中心距离115 cm处时,使用虚拟手光标或虚拟指杆光标指点目标, $MT$ 随 $ID$ 增大而增长的速率差异不大。

因此,若需在VR个人空间中改变三维指点任务的 $ID$ 以显著影响使用者的目标指点 $MT$ ,应使用虚拟手光标作为指点光标;若需在同一自我中心距离下改变三维指点任务的 $ID$ 以显著影响使用者的目标指点 $MT$ ,则应将目标设置在被试自我中心距离45 cm、80 cm左右的区域,并使用虚拟手光标作为指点光标。

#### 4 总结

本文得出以下结论:

(1) VR中,指点光标类型、目标大小对自我中心距离认知准确度有显著影响;随着自我中心距离的变化,不同指点光标对自我中心距离认知准确性的影响有所不同。目标位于被试个人空间中自我中心距离较近或较远的区域时,被试使用虚拟手光标进行目标指点获得的自我中心距离认知较为准确;若目标位于被试个人空间中自我中心距离中等的区域,则被试使用虚拟指杆光标进行目标指点获得的自我中心距离认知准确度较高;若想提高被试的自我中心距离认知准确度,应尽量缩减目标大小。

(2) VR中,指点光标类型、自我中心距离、目标大小、目标方位角对目标指点速度有显著影响,随着自我中心距离的变化,不同指点光标对目标指点速度的影响有所不同。目标位于被试个人空间中自我中心距离较近的区域时,被试使用虚拟手光标进行目标指点的速度较快;目标位于被试个人空间中自我中心距离中等或较远的区域时,被试使用虚拟指杆光标进行目标指点的速度较快;若想提高被试的目标指点速度,应尽量增加目标大小,并将目标设置在方位角 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 或起点下方的位置。

(3) VR中,两种指点光标的目标指点 $MT$ 均基本符合费茨定律在三维指点任务中的扩展模型。整体个人空间中,使用虚拟手光标进行目标指点的 $MT$ 受任务 $ID$ 的影响较大;目标位于被试个人空间中自我中心距离较近或中等的区域时,使用虚拟手光标进行目标

指点的 $MT$ 受任务 $ID$ 的影响较大。

#### 参考文献

- 1 Li BC. Distance perception in virtual environment through head-mounted displays [Master's Thesis]. Michigan: Michigan Technological University, 2017.
- 2 Siegel ZD. Improving distance perception in virtual reality [Master's Thesis]. Ames: Iowa State University, 2015.
- 3 Liu D, Rau PLP. Spatially incongruent sounds affect visual localization in virtual environments. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2020, 82(4): 2067–2075. [doi: 10.3758/s13414-019-01929-8]
- 4 Loyola M. The influence of the availability of visual cues on the accurate perception of spatial dimensions in architectural virtual environments. *Virtual Reality*, 2018, 22(3): 235–243. [doi: 10.1007/s10055-017-0331-2]
- 5 Woldegiorgis BH, Lin CJ, Liang WZ. Impact of parallax and inter-pupillary distance on size judgment performances of virtual objects in stereoscopic displays. *Ergonomics*, 2019, 62(1): 76–87. [doi: 10.1080/00140139.2018.1526328]
- 6 Knapp JM, Loomis JM. Limited field of view of head-mounted displays is not the cause of distance underestimation in virtual environments. *Presence*, 2004, 13(5): 572–577. [doi: 10.1162/1054746042545238]
- 7 Hornsey RL, Hibbard PB. Contributions of pictorial and binocular cues to the perception of distance in virtual reality. *Virtual Reality*, 2021. [doi: 10.1007/s10055-021-00500-x]
- 8 Vienne C, Masfrand S, Bourdin C, et al. Depth perception in virtual reality systems: Effect of screen distance, environment richness and display factors. *IEEE Access*, 2020, 8: 29099–29110. [doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972122]
- 9 Li HS, Mavros P, Krukar J, et al. The effect of navigation method and visual display on distance perception in a large-scale virtual building. *Cognitive Processing*, 2021, 22(2): 239–259. [doi: 10.1007/s10339-020-01011-4]
- 10 Lin CJ, Woldegiorgis BH. Interaction and visual performance in stereoscopic displays: A review. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(7): 319–332. [doi: 10.1002/jsid.378]
- 11 El Jamiy F, Marsh R. Survey on depth perception in head mounted displays: Distance estimation in virtual reality, augmented reality, and mixed reality. *IET Image Processing*, 2019, 13(5): 707–712. [doi: 10.1049/iet-ipr.2018.5920]
- 12 Kelly JW, Hammel W, Sjolund LA, et al. Frontal extents in virtual environments are not immune to underperception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2015, 77(6): 1848–1853. [doi: 10.3758/s13414-015-0948-8]

- 13 Wu B, Ooi TL, He ZJ. Perceiving distance accurately by a directional process of integrating ground information. *Nature*, 2004, 428(6978): 73–77. [doi: [10.1038/nature02350](https://doi.org/10.1038/nature02350)]
- 14 Renner RS, Velichkovsky BM, Helmert JR. The perception of egocentric distances in virtual environments—A review. *ACM Computing Surveys*, 2013, 46(2): 1–40. [doi: [10.1145/2543581.2543590](https://doi.org/10.1145/2543581.2543590)]
- 15 Kunz BR, Wouters L, Smith D, *et al.* Revisiting the effect of quality of graphics on distance judgments in virtual environments: A comparison of verbal reports and blind walking. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2009, 71(6): 1284–1293. [doi: [10.3758/APP.71.6.1284](https://doi.org/10.3758/APP.71.6.1284)]
- 16 Cutting JE, Vishton PM. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: Epstein W, Rogers S, eds. *Perception of Space and Motion*. San Diego: Academic Press, 1995. 69–117.
- 17 Lin CJ, Abreham BT, Caesaron D, *et al.* Exocentric distance judgment and accuracy of head-mounted and stereoscopic widescreen displays in frontal planes. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1427. [doi: [10.3390/app10041427](https://doi.org/10.3390/app10041427)]
- 18 Wartenberg C, Wiborg P. Precision of exocentric distance judgments in desktop and cube presentation. *Presence*, 2003, 12(2): 196–206. [doi: [10.1162/105474603321640941](https://doi.org/10.1162/105474603321640941)]
- 19 Dang NT. A survey and classification of 3D pointing techniques. *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future*. Hanoi: IEEE, 2007. 71–80. [doi: [10.1109/RIVF.2007.369138](https://doi.org/10.1109/RIVF.2007.369138)]
- 20 Bruder G, Steinicke F, Stürzlinger W. Effects of visual conflicts on 3D selection task performance in stereoscopic display environments. *Proceedings of 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. Orlando: IEEE, 2013. 115–118. [doi: [10.1109/3DUI.2013.6550207](https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550207)]
- 21 Deng CL, Geng P, Hu YF, *et al.* Beyond Fitts's law: A three-phase model predicts movement time to position an object in an immersive 3D virtual environment. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2019, 61(6): 879–894. [doi: [10.1177/0018720819831517](https://doi.org/10.1177/0018720819831517)]
- 22 张彤, 杨文虎, 郑锡宁. 图形用户界面环境中的鼠标操作活动分析. *应用心理学*, 2003, 9(3): 14–19, 13. [doi: [10.3969/j.issn.1006-6020.2003.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6020.2003.03.003)]
- 23 何灿群. 基于拇指操作的中文手机键盘布局的工效学研究 [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- 24 Fu MJ, Hershberger AD, Sano K, *et al.* Effect of visuo-haptic co-location on 3D Fitts' task performance. *Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco: IEEE, 2011. 3460–3467. [doi: [10.1109/IROS.2011.6094707](https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094707)]
- 25 Fitts PM. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 1992, 121(3): 262–269. [doi: [10.1037/0096-3445.121.3.262](https://doi.org/10.1037/0096-3445.121.3.262)]
- 26 Murata A, Iwase H. Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task. *Human Movement Science*, 2001, 20(6): 791–805. [doi: [10.1016/S0167-9457\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00058-6)]
- 27 Lin CJ, Woldegiorgis BH. Egocentric distance perception and performance of direct pointing in stereoscopic displays. *Applied Ergonomics*, 2017, 64: 66–74. [doi: [10.1016/j.apergo.2017.05.007](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.007)]
- 28 丁玉兰, 程国萍. 人因工程学. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- 29 Nacéri A, Chellali R, Dionnet F, *et al.* Depth perception within virtual environments: Comparison between two display technologies. *International Journal on Advances in Intelligent Systems*, 2010, 3(1–2): 51–64.
- 30 Hale KS, Stanney KM. Effects of low stereo acuity on performance, presence and sickness within a virtual environment. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(3): 329–339. [doi: [10.1016/j.apergo.2005.06.009](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.06.009)]
- 31 Mohler BJ, Creem-Regehr SH, Thompson WB, *et al.* The effect of viewing a self-avatar on distance judgments in an HMD-based virtual environment. *Presence*, 2010, 19(3): 230–242. [doi: [10.1162/pres.19.3.230](https://doi.org/10.1162/pres.19.3.230)]
- 32 Bruder G, Argelaguet F, Olivier AH, *et al.* CAVE Size matters: Effects of screen distance and parallax on distance estimation in large immersive display setups. *Presence*, 2016, 25(1): 1–16. [doi: [10.1162/PRES\\_a\\_00241](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00241)]
- 33 Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, *et al.* Vergence—Accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 2008, 8(3): 33. [doi: [10.1167/8.3.33](https://doi.org/10.1167/8.3.33)]
- 34 阮晓钢, 张晓平, 武璇, 等. 基于学习自动机的具有内发动机的感知运动系统的建立. *控制与决策*, 2016, 31(2): 303–309.
- 35 任红格, 史涛, 张瑞成. 基于操作条件反射机制的感觉运动系统认知模型的建立. *机器人*, 2012, 34(3): 292–298.
- 36 Bridgeman B, Gemmer A, Forsman T, *et al.* Processing spatial information in the sensorimotor branch of the visual system. *Vision Research*, 2000, 40(25): 3539–3552. [doi: [10.1016/S0042-6989\(00\)00193-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00193-0)]