

引用格式: 马晓辉,周洁萍,龚建华,等.面向室内应急疏散标识的VR眼动感知实验与布局评估[J].地球信息科学学报,2019,21(8):1170-1182. [Ma X H, Zhou J P, Gong J H, et al. VR eye-tracking perception experiment and layout evaluation for indoor emergency evacuation signs[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(8):1170-1182.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180572

面向室内应急疏散标识的VR眼动感知实验与布局评估

马晓辉^{1,2},周洁萍^{1*},龚建华^{1,2,3},黄琳^{1,2},李文航¹,邹宇玲³

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101;2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 浙江中科空间信息技术应用研发中心,嘉兴 314199

VR Eye-Tracking Perception Experiment and Layout Evaluation for Indoor Emergency Evacuation Signs

MA Xiaohui^{1,2}, ZHOU Jieping^{1*}, GONG Jianhua^{1,2,3}, HUANG Lin^{1,2}, LI Wenhong¹, ZOU Yuling³

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhejiang-CAS Application Center for Geoinformatics, Jiaxing 314199, China

Abstract: In the context of indoor emergency evacuation, it is important to understand how people perceive emergency evacuation signs and how their perceptions affect evacuation behaviour. As a new generation of geospatial cognitive analysis tool, virtual geographic environments (VGE) provides an immersive multi-dimensional information space based on virtual reality (VR) technology. It is a three-dimensional, dynamic, and interactive space that conforms to the laws of human perception and cognition. Moreover, based on virtual geographical environments, virtual geographical perception/cognition experiment has developed rapidly, which plays an important role in many research fields including physical geography, environment and health, crowd evacuation, and human-computer interaction, providing a controlled virtual experimental environment that can be observed quantitatively. By designing a variety of experimental schemes, objective experimental data related to spatial perception and cognitive behaviour can be obtained. By combining immersive virtual environment with eye-tracking technology, a VR eye-tracking perception experiment was designed in this study. Taking the indoor corridor as an example, the data of evacuation time, eye movement fixation point, and individual movement trajectory under three types of different virtual fire escape scenarios were obtained, processed, and analyzed by quantitative observation, data statistics, and visual analysis. Finally, the layout of indoor emergency evacuation signs was evaluated and suggestions were proposed. We found that female participants were more

收稿日期:2018-11-08;修回日期:2019-04-23.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA19080101);中国科学院遥感与数字地球所所长青年基金项目(Y5SJ1900CX);国家重点研发计划项目(2017YFB0503602);装备发展部预研项目(315050501);国家自然科学基金青年基金项目(41701469)。[**Foundation items:** Strategic science and technology project of Chinese Academy of Sciences, No. XDA19080101; The Young Scientists Foundation of RADI, No.Y5SJ1900CX; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503602; Equipment development department pre-research project, No.315050501; National Natural Science Youth Foundation of China, No.41701469.]

作者简介:马晓辉(1994-),女,河北石家庄人,硕士生,主要从事虚拟地理环境研究。E-mail: annmxh@163.com

*通讯作者:周洁萍(1979-),女,江苏南京人,博士,助理研究员,主要从事虚拟地理环境、地学可视化等研究。

E-mail: zhoujp@radi.ac.cn

likely to be disturbed by the starting position of escape than male participants, and had a poorer sense of virtual space. The evacuation time differed notably among the three types of scenario (no-sign, sign, and smoke). Emergency evacuation signs, smoke, and the initial position of escape had significant influence on evacuation time. The channel wall sign had the highest perception rate (0.929) and was most easily recognized by pedestrians in fire escape. The safety exit sign had the lowest perception rate (0.333), and most of the eye fixation points were on the safety gate instead of the safety exit sign. Therefore, it is necessary to enhance the visual attraction of safety exit signs to attract the attention of people in advance through appropriate size enlargement, brightness enhancement, color flashing, and other striking effects. Different indoor passage micro-environment like the length of passage has great influence on the change of sign's fixation time. And the layout and design of signs near safety exits need to be improved. Virtual eye-tracking perception experiment provides an easy solution for evaluating the design of indoor emergency evacuation signs.

Key words: emergency evacuation signs; eye-tracking perception experiment; virtual reality; virtual fire escape; layout evaluation; virtual geographic environments; eye tracking

*Corresponding author: ZHOU Jieping, E-mail: zhoujp@radi.ac.cn

摘要:在室内应急疏散的背景下,理解人们如何感知应急疏散标识以及他们的感知如何影响疏散行为十分重要。虚拟地理环境基于虚拟现实(VR)技术构建的沉浸式多维信息空间,是一个符合人类感知认知规律的三维、动态、可交互空间。而基于虚拟地理环境的虚拟地理感知/认知实验,则可以提供一個可定量观测的可控虚拟实验环境,通过设计多种实验方案,定量地获取与空间感知、认知行为相关的客观实验数据。本文将沉浸式虚拟环境与眼动追踪技术相结合,设计了VR眼动感知实验,以室内通道为例,采用定量观测、数据统计、可视化分析等方法,对不同虚拟火灾逃生场景下的疏散时间、眼动注视点、个体移动轨迹数据进行了处理与分析,最后对室内应急疏散标识布局进行评估并提出合理建议。实验结果表明:①女性参与者比男性更容易被逃生起始位置干扰,拥有较差的虚拟空间感;②3种场景类型(无标识无烟雾、有标识无烟雾、有标识有烟雾)在疏散时间之间存在明显差异,应急标识、烟雾与逃生起始位置对疏散时间有显著性影响;③通道墙贴标识的感知率最高为0.929,在火灾逃生中最容易被识别;④安全出口标识感知率最低为0.333,眼动注视点大多在安全门而非安全出口标识上,因此需要提升安全出口标识的视觉吸引力;⑤室内通道微观环境的不同(例如通道长度)对应急标识注视时长的变化有较大影响;⑥安全出口附近的标识布局、设计有待改进。虚拟眼动感知实验为评估室内应急疏散标识的合理性和布局优化提供了一个有效的科学途径。

关键词:应急疏散标识;眼动感知实验;虚拟现实;虚拟火灾逃生;布局评估;虚拟地理环境;眼动追踪

1 引言

应急疏散标识是火灾、地震等应急疏散引导系统的重要组成部分^[1]。然而,应急疏散标识存在完整程度不高、放置位置不合理等问题,导致人群在突发事故来临时,可能无法有效地利用应急标识达到自我救助与稳步疏散的目的。因此,理解人们如何感知应急标识以及他们的感知如何影响疏散行为,对应急疏散标识的优化是十分重要的。

由于开展真实的人群疏散实验非常复杂,且存在不可控因素,沉浸式虚拟地理实验成为一种可实施的有效办法。虚拟地理实验是基于虚拟地理环境,依据一定的假设、理论、模型、情景设想等,通过虚拟现实、人机交互、眼动追踪等技术探究人在虚拟空间中的空间感知与能动思维,获取或验证某种地

理经验与知识^[2]。同时,眼动追踪技术已经成为研究人类在寻路与导航时获取视觉信息、洞察认知行为的一种流行方法。在虚拟地理实验中引入眼动追踪技术,可以更深入了解人们如何在三维空间中感知与导航,能够揭示吸引人们注意力的因素,设计以人为中心、更加高效的应急疏散标识系统。国内外学者针对虚拟现实与人群疏散行为、环境认知与交互、眼动研究相结合等方面开展了相关探索。

在人群疏散行为方面,Kobes等^[3-4]通过对比真实与虚拟酒店建筑中的疏散情况,分析参与者的路线选择、移动时间和疏散行为;Shi等^[5]获取不同疏散阶段的数据,对疏散时间、移动速度和居住者特征进行分析;Bode等^[6]使用交互式虚拟环境来研究模拟疏散中的人员出口路径决策;张培红等^[7]建立建筑物火灾事故的虚拟现实环境,研究人群疏散行为规律

以及建筑物安全疏散性状的概率危险性评价。

在环境认知与交互方面,Tang等^[8]利用虚拟现实理解应急标识如何促进疏散与寻路;Helmut等^[9]使用移动眼动跟踪系统,在沉浸式虚拟环境中获取行人对火车站导航系统的视觉注意力;Zhang等^[10]对建筑物内部不同应急出口标识设计的静态视觉认知与移动眼球追踪认知进行了比较研究;Occhialini等^[11]利用神经活动分析评价了不同位置 and 不同环境下安全出口标识的感知能力与有效性;申申等^[12]设计并开展了基于虚拟亲历行为的空间场所认知对比实验,探索基于头盔式虚拟现实与基于桌面屏幕式虚拟环境中虚拟亲历行为的空间场所认知差异;袁帅等^[13]提出了基于动作捕捉技术的沉浸式多人协同交互模式,开展虚拟燕园辅助规划设计实验。

在眼动研究方面,Kiefer^[14]使用移动眼动追踪设备得到参与者的视觉注意力,研究基于地标的自我定位过程;高雪原等^[15]利用桌面式眼动仪与PC端虚拟场景,探索场认知方式、性别和惯用空间语3个指标对地理空间定向能力的影响;Liao等^[16]使用二、三维结合的地图探索男女性别在进行空间定向任务时的差异。以眼动追踪为支撑的眼动实验研究,能够同时提供定性和定量的实验依据,挖掘得到“以用户为中心”(User-Centered Design, UCD)的视觉认知规律,不仅可以探求用户对地图、地理环境认知的心理过程,还可以评价地图、虚拟地理环境的设计^[17]。大多研究都使用眼镜式或桌面式眼动追踪设备来洞察空间导航和寻路的认知过程^[18],使用沉浸式眼动追踪设备进行实验的研究相对较少,亟待进一步探索。

现实中应急疏散标识的设计布局主要根据《消防安全标志 GB13495》^[19]、《建筑设计防火规范 GB50016》^[20]以及专家的先验知识,较难进行验证与优化,故本文将虚拟现实技术与沉浸式眼动追踪设备结合,模拟真实场所,在虚拟火灾逃生场景中,对

室内应急疏散标识进行眼动感知实验与布局评估。本文从实验设计、数据处理、数据分析3个方面描述整个实验,并进行现象发现与讨论,分析个体的疏散时间、应急标识感知程度与移动行为模式,从而评估该场所应急疏散标识布局、提出合理建议,并为现实世界的应急疏散标识设计布局提供科学性意见。

2 实验设计

2.1 实验设计流程

在本实验中,参与者被要求在虚拟火灾逃生场景中尽快找到安全出口,通过设置有无标识、有无烟雾、不同起始位置等环境变量,获得参与者的眼动数据、头部数据以及个体移动轨迹数据,分析个体的视觉关注重点和移动轨迹模式,评估个体对应急疏散标识的感知程度,最终对该应急疏散标识做出合理的优化建议。实验设计流程如图1所示。

2.2 实验环境

2.2.1 实验对象

实验时间为2018年7月24-31日,共有89名参与者参加,其中男性49名、女性40名,年龄范围从22~29岁(平均年龄24岁)。参与者对地图、火灾逃生、虚拟现实等均有所了解,可以基本避免认知能力、知识结构等方面带来的偏差。所有参与者都有正常或矫正视力。

2.2.2 实验场景

实验场景大多数都选择了较为简单的真实环境作为虚拟空间场景。Lawton等^[21]在研究不同性别人群的寻路效果差异时,为了更好地控制变量,选择相对简单的真实环境,例如室内走廊。本次实验选择某建筑物室内通道作为真实环境,如图2(a)所示。该环境没有过多的复杂交叉通道,符合较为简单的

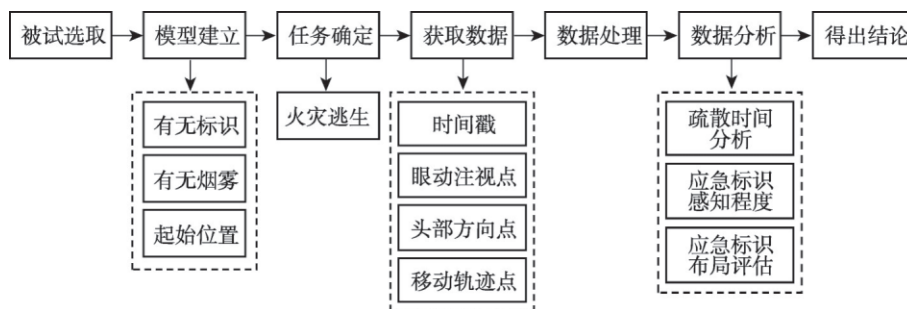


图1 实验设计流程

Fig. 1 Procedures of the experiment design

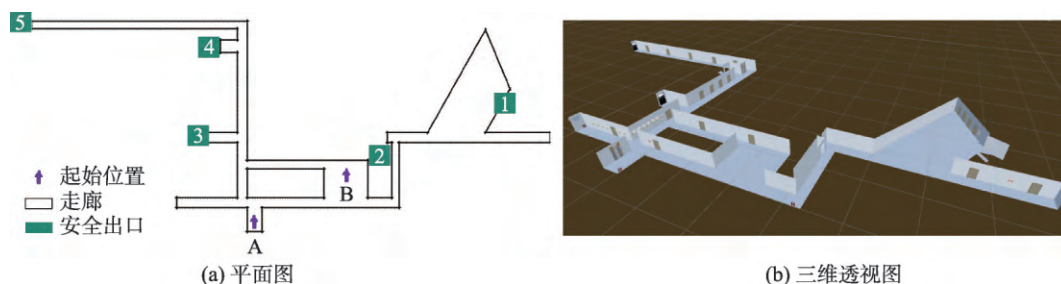


图2 实验场景视图

Fig. 2 Experimental scene view

环境要求,并构建对应三维模型如图2(b)所示。

实验背景如下:①实验场景全部只涉及走廊通道,不涉及楼层内的房间;②在寻路的过程中参与者没有来自外界的提示,目的是尽快找到安全出口完成逃生;③移动速度设置为正常行人平均快走速度,不考虑加速和减速的情况;④实验添加火灾警笛声音渲染紧张的逃生气氛。实验采用在两种不同起始位置下的三种虚拟实验场景:无标识无烟雾(no-sign)、有标识无烟雾(sign)、有标识有烟雾(smoke)来进行对比实验,如表1所示。

表1 应急疏散标识VR眼动感知实验场景

Tab. 1 VR eye-tracking perception experiment scenarios oriented to emergency evacuation signs

起始位置	无标识无烟雾 (no-sign)	有标识无烟雾 (sign)	有标识有烟雾 (smoke)
A			
B			

实验场景中的应急疏散标识系统由25个应急疏散标识组成,其中14个通道墙贴标识、8个通道悬挂标识、3个安全出口标识;疏散标识符号为双向标识、向左标识、向右标识、安全出口,如图3所示。所有场景中标识的尺寸、颜色、图案、位置、空间布局等属性均根据实际情况绘制。实验指定了处于同一通道的2个逃生起始位置A、B,其中起始位置A的正方向为正南,附近应急标识较多且较为密集地分布在道路交叉口拐点位置;起始位置B的正方向为正北,处于较为空旷的大厅,应急标识较少且

较为稀疏地分布在通道上方。

2.2.3 实验设备

实验主要使用设备为虚拟现实设备、眼动追踪设备用以及Unity3D平台。其中,虚拟现实设备采用HTC VIVE虚拟现实头戴式显示器;眼动追踪设备采用沉浸式VR眼球追踪模组aGlass DKII,双眼追踪速度为120~380 Hz,采样精度小于0.5°,延迟低于5 ms。基于虚拟场景的眼动感知实验提供了一个可控制的环境,能够反映大脑的认知过程,有效研究个体在感知视觉场景和执行认知任务时的视觉解读,为地理空间认知研究提供了新的途径^[23]。

2.3 实验流程

(1)讲解实验素材和流程。对于每位参与者,实验开始前首先由实验帮助人员介绍本实验的目标、任务、设备使用等基本情况。

(2)眼球校准。每位参与者佩戴装有眼球追踪模组的虚拟现实头盔进行9点模式眼球校准,从而获得更加准确的眼动数据。

(3)控制变量。实验的环境变量为应急标识、烟雾以及起始位置,每个变量有2种属性,即应急标识(有/无)、烟雾(有/无)、起始位置(A/B)。无标识场景中没有设置帮助导向的应急标识和干扰视线的烟雾,有标识无烟雾场景中设置了应急标识但没有设置烟雾,有标识有烟雾场景设置了应急标识和烟雾。

(4)具体任务。每位参与者被随机放置在逃生起始位置A或B,并被随机分配在无标识无烟雾、有标识无烟雾和有标识有烟雾3种场景中,具体任务是尽快找到安全出口完成逃生,与真实世界对应的5个安全出口布局如图2(a)所示。实验帮助人员不会对参与者的视觉行为、路径决策进行提示,一切选择由参与者自主决定,从而探索应急标识是否真正对参与者在火灾疏散时起作用。

(5)数据获取。实验过程中,实验平台自动记

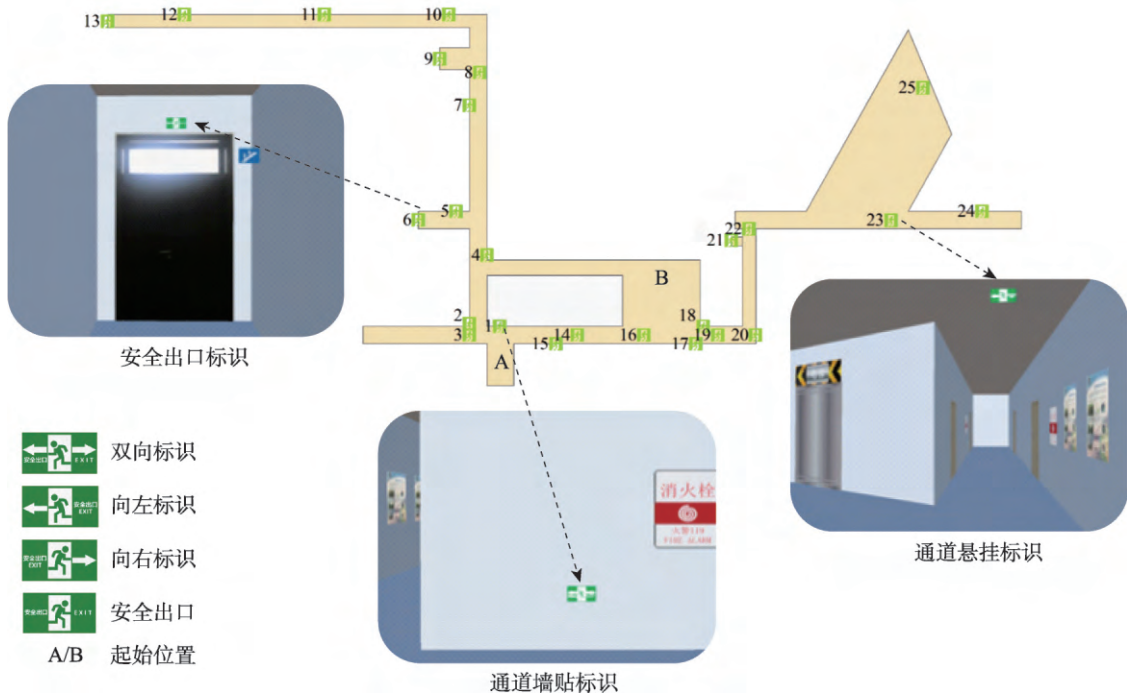


图3 应急疏散标识分布

Fig. 3 Distribution of the emergency evacuation signs

录和收集实验数据。

(6)问卷调查。实验结束后对参与者进行问卷调查,获取基本信息与实验反馈,作为补充数据。

3 数据获取、处理与可视化

3.1 实验数据获取

由于实验的目的在于探究应急疏散标识在人群疏散过程中的作用和影响,熟悉场景的参与者,可能凭靠空间认知记忆与经验确定方位与走向,无法得知应急标识对其是否起到作用;不熟悉场景的参与者,在无任何提示的背景下,基本依赖应急标识系统进行寻路与导航,由此可以得知应急疏散标识的作用与影响。因此,研究不熟悉场景的参与者数据更能达到实验目的,最终共获得不熟悉场景数据252份,其中有196份为有效数据。

眼动数据提供了空间表征的综合观点,其中注意力机制以深刻的方式影响认知过程中的高级认知过程。地图学眼动研究中的主要眼动参数可分为注视系列参数、眼跳系列参数、回视追随参数及瞳孔兴趣参数4类^[23],其中注视系列参数(例如注视点个数、注视时长等)主要用于认知心理、认知分析,因此选择眼动注视点数据作为主要实验数据之一。

实验数据共有4种:时间戳数据、眼动注视点数

据、头部方向点数据、个体移动轨迹点数据。其中,时间戳是指获取数据时所对应的毫秒数;眼动注视点是采样点经过基于距离阈值方法处理后得到的聚类^[24],具体流程图如图4所示;头部方向点是指在虚拟场景中参与者头部中心射线与场景中物体碰撞的交叉点;个体移动轨迹点是在虚拟场景中参与者的位置坐标。

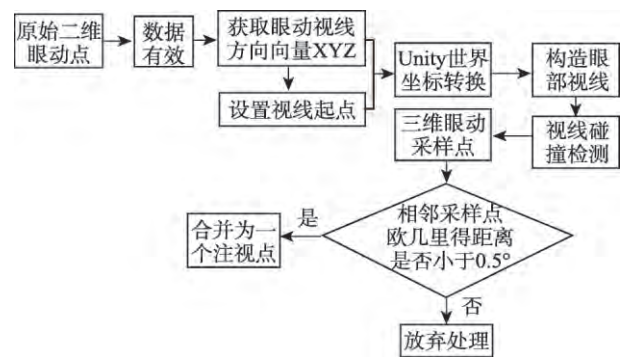


图4 眼动注视点获取流程

Fig. 4 Flowchart of acquiring eye movement fixation points

3.2 数据可视化

数据可视化有助于检测、理解和解释多维数据中的基本关系,特别是当可视化的数据被叠加到三维环境中时,能够发掘参与者的视觉注意力。眼动注视点可视化能够帮助分析参与者对标

识的关注程度,评估每个标识是否存在眼动注视点从而探索标识的感知程度;同时,轨迹可视化有助于发现个体在逃生时,其移动行为模式是如

何受到标识具体影响的。对参与者的眼动注视点数据和个体移动轨迹数据进行三维可视化,具体如图5所示。

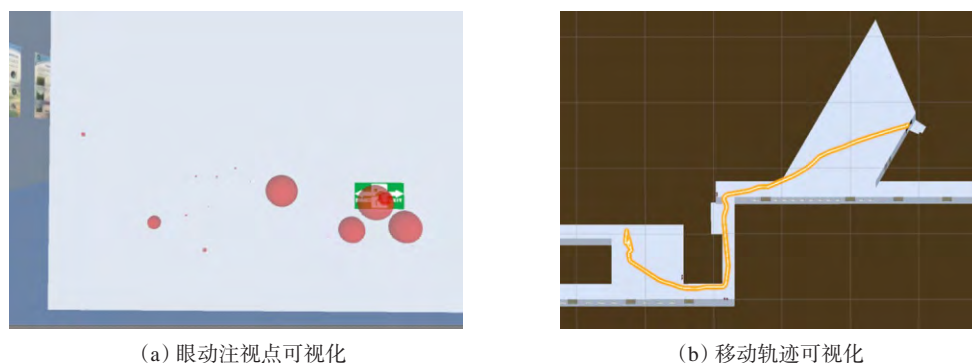


图5 眼动注视点与移动轨迹数据可视化

Fig. 5 Data visualization of eye fixation points and movement trajectory

4 数据分析与讨论

4.1 疏散时间分析

在发生火灾的情况下,逃离火灾现场的疏散时间长短是决定生存的重要因素^[25]。从性别、场景类型、起始位置3个方面分析对疏散时间是否有显著影响,采用描述性统计方法、单因素方差分析方法(one-way ANOVA)、双样本异方差假设检验方法(T-检验)比较不同因素下的疏散时间。

4.1.1 性别差异

通过比较男性与女性参与者的平均疏散时间猜测性别对疏散时间有显著影响。为了进一步证明,建立检验假设 H_0 :性别对疏散时间没有显著影响,即男性、女性参与者的疏散时间均值 μ_1 、 μ_2 均相等,以 $\alpha=0.05$ 的显著性水平进行检验。从表2可以看出, P 值为0.042,由于 $P<\alpha$,故拒绝原假设 H_0 ,性别对疏散时间有显著影响,即男性、女性参与者在疏散时间之间存在明显差异。同时根据平均疏散时间趋势(图6),男性参与者位置A、B下的平均疏散时间趋势大体一致,而女性参与者的评价疏散时间趋势差异较大,说明男性在火灾逃生寻路时不易被起始位置所干

扰,而女性易受所处空间位置变化的影响。这与Liao等^[16]的研究结果有一定相似性,他们发现男性在使用三维地图获得空间知识时的表现要优于女性,并从进化论的角度解释男性表现出更好的空间感是因为史前时代的男性需要在大型陌生环境中狩猎,而女性需要记住地点并在居住地周围收集食物。三维虚拟火灾逃生场景与三维地图类似,对所有参与者来说都是陌生的,男性不容易受三维虚拟场景中所在空间位置变化的影响。因此,男性被认为虚拟空间感更好,女性被认为虚拟空间感较差。

4.1.2 场景类型

如表3所示,参与者在无标识无烟雾场景中的疏散时间最长,在有标识无烟雾场景中的疏散时间最短,因此猜测疏散时间受场景类型影响。为了进一步验证猜测,建立检验假设 H_0 :场景类型对疏散时间没有显著影响,即无标识无烟雾(no-sign)、有标识无烟雾(sign)、有标识有烟雾(smoke)的疏散时间均值 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 均相等。采用自由度为 df 的单因素方差分析与最小显著差异方法(LSD)多重比较方法,以 $\alpha=0.05$ 的显著性水平进行检验。从表4可看出, F 值为6.195, P 值为0.002,由于 $F>F_{0.05}$ 且

表2 不同性别参与者的疏散时间T检验

Tab. 2 T-test of the evacuation time for male and female

性别	平均疏散时间/s	方差	df	t Stat	$P(T \leq t)$ 双尾	t 双尾临界
男性	54.821	1519.135	191	2.050	0.042	1.972
女性	44.989	786.019				

注:df:自由度;t Stat: t-统计量(=回归系数/系数标准误差); $P(T \leq t)$ 双尾:双尾显著性检验下的P值;t 双尾临界:双尾显著性检验下与目前t值比较的临界t值。

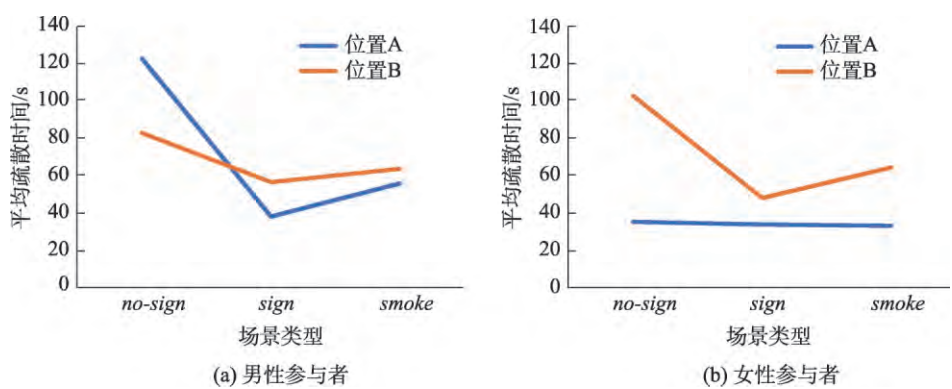


图6 不同性别参与者在不同位置的平均疏散时间

Fig. 6 Average evacuation time for participants of different genders in different locations

表3 不同场景的疏散时间描述性统计量

Tab. 3 Statistics of evacuation time for the different scenarios

场景类型	最小值	最大值	平均值	标准差
no-sign	20.615	222.731	85.744	79.815
sign	15.210	99.868	43.454	20.268
smoke	19.267	226.848	54.324	39.486

表4 不同场景的疏散时间单因素方差分析

Tab. 4 One-way ANOVA of the evacuation time of the different scenarios

差异源	SS	df	MS	F 值	P 值	F _{0.05}
组间	14 609.641	2	7304.821	6.195	0.002	3.043
组内	227 578.151	193	1179.161			
总计	242 187.792	195				

注:SS代表离均差平方和,组间SS反映各组数据的差异性,组内SS反映组内数据的变异情况;df代表自由度,组间df=列数-1,组内df=数据个数-列数;MS均方代替离均差平方和以消除各组内数据个数不同产生的影响;F值为检验统计量(F统计量),组间均方与组内均方的比值,用于评估组间差异;P值代表计算的显著性检验水平,与显著性水平 $\alpha=0.05$ 比较并作出推断; $F_{0.05}$ 值代表显著性水平 $\alpha=0.05$ 下F统计量对应值。

$P<\alpha$,故拒绝原假设 H_0 ,场景类型对疏散时间有显著影响,3种场景之间存在明显差异。同时从表5中可知,无标识无烟雾与有标识无烟雾场景之间P值为0.002, $P<\alpha$,二者之间存在显著差异;无标识无烟雾与有标识有烟雾场景之间P值为0.020, $P<\alpha$,二

表5 不同场景之间疏散时间多重比较

Tab. 5 LSD of the evacuation time between the different scenarios

因变量	场景类型	P 值
疏散时间	no-sign/sign	0.002
	no-sign/smoke	0.020
	sign/smoke	0.031

者之间存在显著差异;有标识无烟雾与有标识有烟雾场景之间P值为0.031, $P<\alpha$,二者之间存在显著差异。以上比较表明:在火灾逃生中应急标识与烟雾对疏散时间有显著影响。这与Tang等^[8]在应急标识如何影响室内寻径的实验中得到的研究结果类似,他们发现了应急标识对室内寻径有正向作用,即有标识比没有标识要好;但与之不同的是本实验发现了烟雾对疏散时间有显著影响。

4.1.3 起始位置

通过对比不同起始位置的疏散时间(表6),发现参与者从位置B出发的平均疏散时间较长,猜测疏散时间受逃生起始位置的影响。建立检验假设 H_0 :逃生起始位置对疏散时间没有显著影响,即起始位置A、B的疏散时间均值 μ_1 、 μ_2 均相等。以 $\alpha=0.05$ 的显著性水平进行检验,从表6可看出,P值为0.001,由于 $P<\alpha$,故拒绝原假设 H_0 ,即逃生起始位置对疏散时间有显著影响。

表6 不同起始位置疏散时间T检验

Tab. 6 T-test of evacuation time at two different starting positions

起始位置	平均疏散时间/s	方差	df	t Stat	P(T≤t) 双尾	t 双尾临界
A	42.131	1286.604	192	-3.399	0.001	1.972
B	58.849	1082.395				

4.2 应急疏散标识感知程度

通过疏散时间分析发现,在没有应急疏散标识的环境中,人们很难在室内环境找到一条通往安全出口的路径,需要花费更多的时间去理解周围环境、在大脑中构建空间意象图。应急标识与环境形成鲜明对比,因而很容易被人们感知。在建筑物内,通过研究应急标识的感知程度(即被感知的数量)与表现形式(即空间布局),能够帮助人们对环境进行结构化理解,逐步建立环境的路径知识和结构知识,洞察行人对环境的认知过程^[26]。

应急疏散标识感知程度帮助发现应急标识对行人寻路是否起到作用。本文认为只要应急标识上存在注视点,即视为标识被看到、被感知。25个标识中,有19个标识(ID=1,2,4,5,6,7,8,10,11,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24)被看到。统计每个标识被看到的次数(图7),次数越多即标识感知程度越高。其中,最高的是位于多通道交叉口的标识1(66次),其次是位于单通道向左拐点的标识20(59次)。

对不同类型的应急标识进行统计,发现每种类型的标识感知率。在14个通道墙贴标识中,有13个标识被感知;在8个通道悬挂标识中,有5个标识被感知;在3个安全出口标识中,有1个标识被感知。根据式(1)可得不同类型标识的感知率,如表7所示。

$$Sd_i = \frac{Sn_i}{S} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

式中: Sd_i 为标识感知率; Sn_i 为某类型被感知到的标

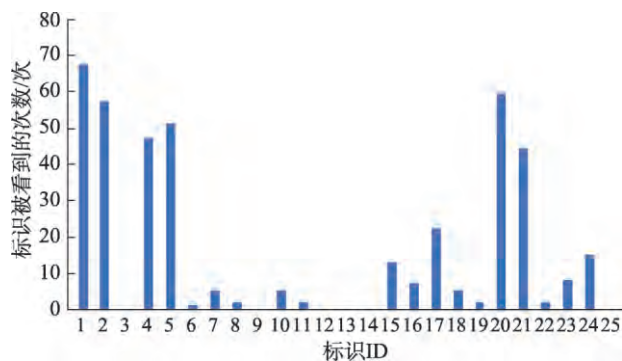


图7 每个应急疏散标识被看到的次数

Fig. 7 Number of each emergency evacuation sign has been seen 标识数量; S 为该类型标识总数。

对上述3种类型标识(通道墙贴、悬挂、安全出口)上的眼动指标(总注视点个数和总注视时长)进行分析。建立检验假设 H_0 :3种类型标识对总注视点个数、总注视时长没有显著影响,即通道墙贴、悬挂、安全出口标识的总注视点个数均值 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 均相等、总注视时长均值 μ_4 、 μ_5 、 μ_6 均相等。采用自由度为 df 的单因素方差分析,以 $\alpha=0.05$ 的显著性水平进行检验,从表8可看出, P 值为0.003, $P<\alpha$;从表9可看出, P 值为0.047, $P<\alpha$;因此拒绝原假设 H_0 ,即3种类型标识对总注视点个数、总注视时长有显著影响。

另外,对每个标识上的眼动指标进行统计分析,发现通道墙贴标识的总注视时长在有标识有烟雾场景(smoke)和有标识无烟雾场景(sign)下的数

表7 应急疏散标识感知率

Tab. 7 Perception rate of emergency evacuation signs

序号	标识类型	标识总数 S	被感知的标识数量 Sn_i	被感知的标识ID	感知率 Sd_i
1	通道墙贴	14	13	1,2,4,5,7,10,11,15,17,18,20,21,24	13/14=0.929
2	通道悬挂	8	5	8,16,19,22,23	5/8=0.625
3	安全出口	3	1	6	1/3=0.333

表8 3种类型标识的总注视点个数单因素方差分析

Tab. 8 One-way ANOVA of the fixation points of the three types of signs

差异源	平方和	df	均方	F	P 值	$F_{0.05}$
组间	1 862 804.935	2	931 402.468	6.713	0.003	3.195
组内	6 521 366.045	47	138 752.469			
总计	8 384 170.980	49				

表9 3种类型标识的总注视时长单因素方差分析

Tab. 9 One-way ANOVA of the fixation time of the three types of signs

差异源	平方和	df	均方	F	P 值	$F_{0.05}$
组间	398 216.394	2	199 108.197	3.264	0.047	3.195
组内	2 866 736.465	47	60 994.393			
总计	3 264 952.859	49				

值差异较为明显,其中标识20和21在有烟雾场景下的总注视时长数值较大,如图8(b)所示。

选取同为通道尽头的标识1与标识20相比较,如图9(a)、(b)所示,可发现标识1是起始位置A正方向的通道墙贴标识,从能看到它的位置到它的距离较短;而标识20是位于“L型”通道尽头拐角处,从能看到它的位置到它的距离较长;因此标识20虽然注视点数量小于标识1,但注视时间更长。选取同为安全出口附近的标识5与标识21相比较,如图9(c)、(d)所示,可发现在看到标识5后会很快看到安全出口,但看到标识21后只有拐弯进入通道后才能看到安全出口,因此标识21的注视时间更长。从对通道墙贴标识20、21的注视时长分析表明,室内通道微观环境的不同对标识注视时长的变化有较

大影响,这是以往研究中提出的注视点个数和注视时长主要由标识兴趣度和符号认知难易程度影响之外的另一个影响因素^[23]。

4.3 应急疏散标识布局评估

(1) 通道墙贴标识

根据应急标识感知率可知, $Sd_1 > Sd_2 > Sd_3$,通道墙贴标识的感知率最高为0.929,远大于其他两种应急标识,在火灾逃生中最容易被感知。将标识感知程度与应急标识空间分布图叠加,在标识1、2、4、5、20、21出现关注重点,颜色越深说明被感知次数越多,且上述标识多位于通道拐角处,如图10(a)所示。

(2) 通道悬挂标识

通道悬挂标识的感知率为0.625,较易被看到,但是空间位置两两相隔较远。因此,需要增加悬挂

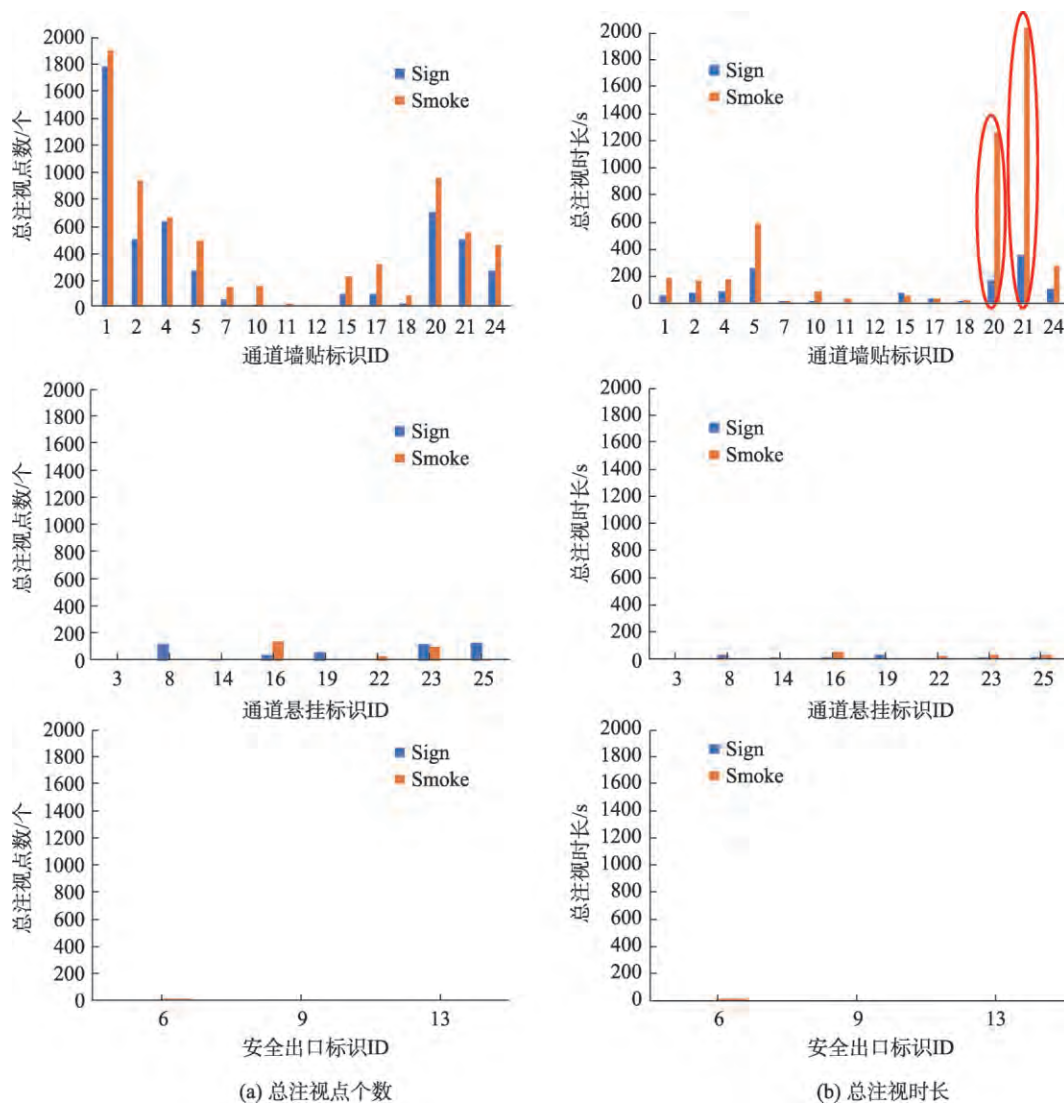


图8 不同场景下各标识的总注视点个数与总注视时长

Fig. 8 Number of fixation points and fixation duration of each sign under the different scenarios

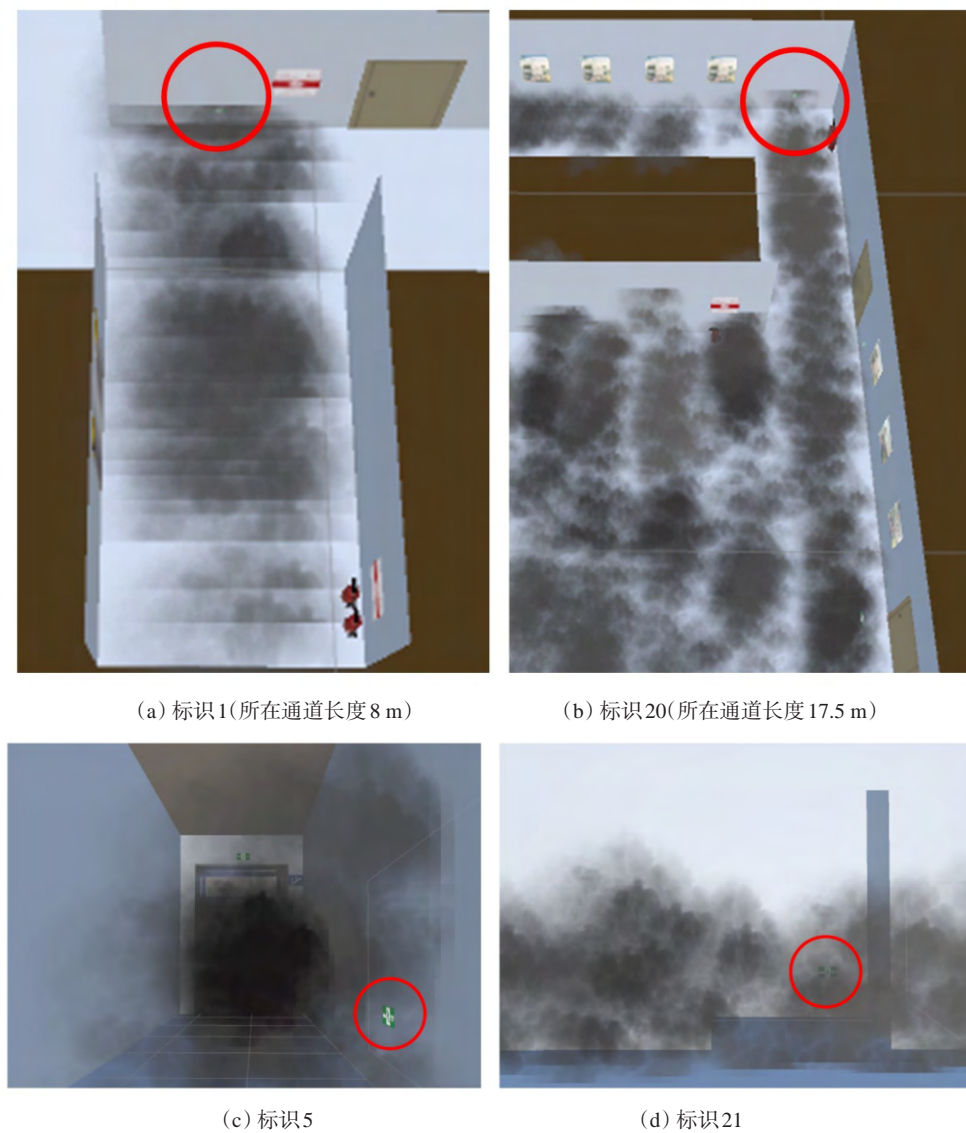


图9 有烟雾场景下的通道墙贴标识位置

Fig. 9 Location of channel wall signs in the smoke scenario

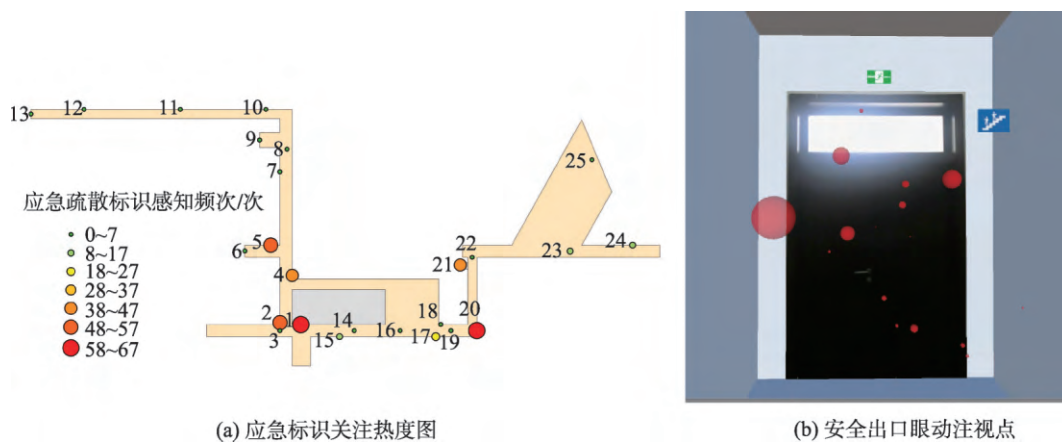


图10 应急疏散标识关注重点

Fig. 10 The focus of emergency evacuation signs

标识的数量并且设置为容易被感知的方向。

(3)安全出口标识

安全出口标识的感知率为0.333,最不易被看到,大多数参与者没有注意到安全门出口上方的安全出口标识。通过可视化分析发现,参与者抵达安全出口时,眼动注视点大多在“安全门”而非安全出口标识上,如图10(b)所示。这表明安全门相较于安全出口标识的视觉吸引力更大,参与者更倾向于看安全门以及根据日常生活经验去探索其是否为安全出口;但如果安全门不是真正的安全出口,将会造成重新选择逃生路径的情况,从而降低了安全逃离火灾现场的概率。因此需要提升真正安全出口上方的安全出口标识的视觉吸引力,通过适当扩大尺寸、增强亮度、颜色闪烁等效果提前吸引行人的注意力。

(4)应急标识空间布局

对从起始位置A、B出发的个体移动轨迹数据进行二维可视化(图11),并以从起始位置A出发的个体轨迹为例,观察通向每个安全出口的轨迹集合,通过个体移动轨迹模式发现应急标识的空间布局问题。从图11(a)可看出,从起始位置A出发的个体,选择安全出口3的最多,其次为安全出口4,再次为安全出口2、1、5。其中,通往安全出口1的轨迹集合中存在靠近标识25后再前往安全出口形状的轨迹簇,表示行人只有靠近标识才能得到正确指示;安全出口1附近环境为空旷的大厅,只有悬挂标识且标识之间距离相隔较远,在逃生过程中不易被感知。通往安全出口2、4的轨迹集合均存在折返形状轨迹簇,表示行人看到与行进路径相反的标识(标识24、标识10和11)后折返到达安全出口;安全出口2、4均位于通道拐角处,附近各类应急标识较少,存在行人无法直接抵达安全出口的可能。通往安全出口3的轨迹集合在标识1附近存在环绕走廊

的回型形状轨迹簇,表示行人被标识误导;标识1为双向标识,不理解双向标识含义的人容易被迷惑,从而选择较远路径。综上所述,需要在安全出口1附近空旷大厅、安全出口2和4附近通道拐角处以及安全出口3附近的回型走廊中增加适量的通道墙贴标识,并改善双向标识设计,从而使得行人在紧张的火灾逃生过程中得到连续、明确的指示。

5 结论与展望

5.1 结论

在室内应急疏散的背景下,理解人们如何感知应急疏散标识以及他们的感知如何影响疏散行为是十分重要的。本文将沉浸式虚拟环境与眼动追踪技术相结合,设计了一种较为新颖的沉浸式虚拟眼动感知实验,探索了个体在虚拟火灾逃生环境中的疏散行为以及对应急疏散标识的感知程度,并对该场所应急疏散标识布局提出了合理的优化建议。实验表明:

(1)女性参与者比男性更容易被逃生起始位置干扰,虚拟空间感较差;3种场景类型(无标识无烟雾、有标识无烟雾、有标识有烟雾)在疏散时间之间存在明显差异,应急标识、烟雾与逃生起始位置对疏散时间有显著影响;

(2)通道墙贴标识感知率最高,在火灾逃生中最容易被行人识别;安全出口标识感知率最低,眼动注视点大多在安全门而非安全出口标识上,需要提升真正安全出口上方的安全出口标识的视觉吸引力;室内通道微观环境的不同对应急标识注视时长的变化有很大影响;

(3)安全出口附近的标识布局、设计有待改进,可以在安全出口1附近空旷大厅、安全出口2和4附近通道拐角处以及安全出口3附近的回型走廊中增

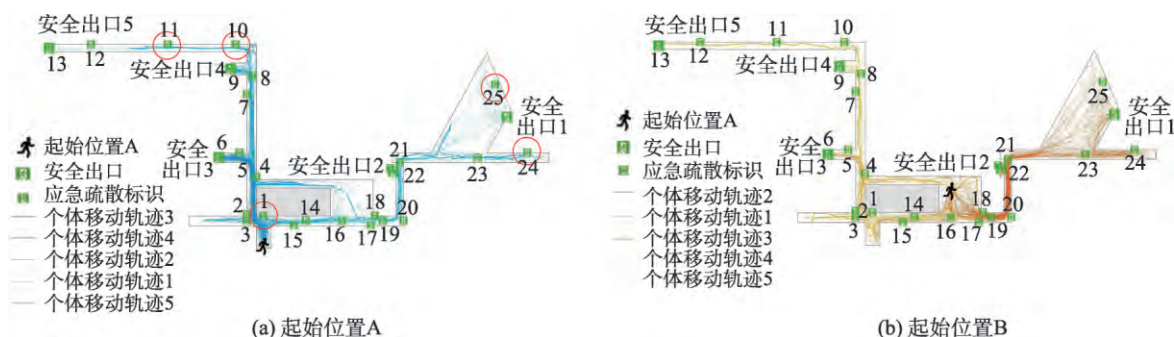


图11 个体移动轨迹可视化

Fig. 11 Visualization of individual movement trajectories

加通道墙贴标识数量,并且修改双向标识符号以便人们更好地理解。

5.2 展望

本文开展的沉浸式虚拟眼动感知实验,由于涉及室内火灾疏散问题的复杂性以及目前虚拟体验和观测设备技术的局限性,后续研究还可以在以下方向进一步探索和完善:①在实验场景设计方面,建模与真实环境有所差异,模型的不真实感影响实验模拟与实验结果的可信性,因此有必要通过更加细致的材质贴图提升模型真实度;②在数据分析方面,本文选择了不熟悉场景的参与者数据进行分析,参与者对场景的熟悉程度代表参与者是否拥有先验环境知识,先验环境知识对火灾逃生是否有影响有待进一步研究;同时未利用到头方向点数据,头部视线方向与眼部视线方向在逃生路径选择、观看微小场景(如地图)与亲历宏观场景(如室内外导航)等方面的异同值得思考和探索;③由于实验设备的局限性暂且无法利用多种眼动指标进行眼动数据分析,不同的眼动指标代表不同的感知意义,因此尝试更换更先进、完善的眼动实验设备,以辅助获得参与者在虚拟火灾逃生场景中更丰富的视觉特征。

参考文献(References):

- [1] 王海.西安市购物场所应急标识有效性研究[D].西安:西安科技大学,2017. [Wang H. Study on the effectiveness of emergency labeling for shopping sites in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.]
- [2] 龚建华.论虚拟地理实验思想与方法[J].测绘科学技术学报, 2013,30(4):399-408. [Gong J H. Experimental thoughts and methods of virtual geography[J]. Journal of Surveying and Mapping Science and Technology, 2013,30(4): 399-408.]
- [3] Kobes M M, Helsloot I I, Vries D B B, et al. Building safety and human behaviour in fire: A literature review [J]. Fire Safety Journal, 2010,45(1):1-11.
- [4] Kobes M, Helsloot I I, Vries D B B, et al. Exit choice, (pre-)movement time and (pre-) evacuation behaviour in hotel fire evacuation - Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research [J]. Procedia Engineering, 2010,3(3):37-51.
- [5] Shi L, Xie Q, Cheng X, et al. Developing a database for emergency evacuation model[J]. Building and Environment, 2009,44(8):1724-1729.
- [6] Bode N W F, Codling E A. Human exit route choice in virtual crowd evacuations[J]. Animal Behaviour, 2013,86(2): 347-358.
- [7] Zhang P H, Chen B Z, Liu L Z, et al. Study on virtual reality and human emergent evacuation behavior in building fire[J]. China Safety Science Journal, 2002,12(1):46-50.
- [8] Tang C H, Wu W T, Lin C Y. Using virtual reality to determine how emergency signs facilitate way-finding[J]. Applied Ergonomics, 2009,40(4):722-730.
- [9] Schrom-Feiertag H, Settgaest V, Seer S. Evaluation of indoor guidance systems using eye tracking in an immersive virtual environment[J]. Spatial Cognition & Computation, 2016,17(1-2):163-183.
- [10] Zhang Y, Zheng X, Hong W, et al. A comparison study of stationary and mobile eye tracking on EXITS design in a wayfinding system[C]// Signal and Information Processing Association Summit and Conference. IEEE, 2016:649-653.
- [11] Occhialini M, Bernardini G, Ferracuti F, et al. Fire exit signs: The use of neurological activity analysis for quantitative evaluations on their perceptiveness in a virtual environment[J]. Fire Safety Journal, 2016,82:63-75.
- [12] 申申,龚建华,李文航,等.基于虚拟亲历行为的空间场所认知对比实验研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2018,43(11):1732-1738. [Shen S, Gong J H, Li W H, et al. A comparative experiment on spatial cognition based on virtual travel behavior[J]. Journal of Wuhan University (information science edition), 2018,43(11):1732-1738.]
- [13] 袁帅,陈斌,易超,等.虚拟地理环境中沉浸式多人协同交互技术研究及实现[J].地球信息科学学报,2018,20(8):1055-1063. [Yuan S, Chen B, Yi C, et al. Research and implementation of immersive multi-user collaborative interaction technology in virtual geographic environment[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(8):1055-1063.]
- [14] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M. Where Am I? Investigating map matching during self-localization with mobile eye tracking in an urban environment[J]. Transactions in GIS, 2015,18(5):660-686.
- [15] 高雪原,董卫华,童依依,等.场认知方式、性别和惯用空间语对地理空间定向能力影响的实验研究[J].地球信息科学学报,2016,18(11):1513-1521. [Gao X Y, Dong W H, Tong Y Y, et al. Study on the influence of field cognitive style, gender and spatial terminology on geographical spatial orientation ability: Based on experiments in virtual space[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(11):1513-1521.]
- [16] Liao H, Dong W. An exploratory study investigating gender effects on using 3D maps for spatial orientation in wayfinding[J]. International Journal of Geo-information, 2017,6(3):60.

- [17] 董卫华,廖华,詹智成,等. 2008年以来地图学眼动与视觉认知研究新进展[J]. 地理学报,2019,74(3):599-614. [Dong W H, Liao H, Zhan Z C, et al. New research progress of eye tracking-based map cognition in cartography since 2008[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(3):599-614.]
- [18] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M, et al. Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges [J]. *Spatial Cognition & Computation*, 2017,17(1-2):1-19.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB13495.1-2015消防安全标志第1部分:标志[S]. 北京:中国标准出版社,2015. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. GB13495.1-2015 Fire Safety Signs Part 1: Signs[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50016-2014 建筑设计防火规范[S]. 中国计划出版社,2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50016-2014 Code for Fire Protection of Building Design[S]. China Planning Press, 2015.]
- [21] Lawton C A, Charleston S I, Zieles A S. Individual and gender-related differences in indoor wayfinding[J]. *Environment & Behavior*, 1996,28(2):204-219.
- [22] Dong W, Zheng L, Liu B, et al. Using eye tracking to explore differences in map-based spatial ability between geographers and non-geographers[J]. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 2018,7(9):337.
- [23] 李伟,陈毓芬. 地图学眼动研究及实验参数解析[J]. 测绘通报,2012(10):16-20. [Li W, Chen Y F. Analysis of cartographic eye movement research and experimental parameters[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012 (10):16-20.]
- [24] 王剑,赵歆波,马钟,等. 基于眼动交互的增强现实抬头显示系统[J]. 科学技术与工程,2017(2):86-92. [Wang J, Zhao X B, Ma Z, et al. Eye-controlled augmented reality head up display system[J]. *Science, Technology and Engineering*, 2017(2):86-92.]
- [25] Cosma G, Ronchi E, Nilsson D. Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation: A virtual reality experiment with Oculus Rift[J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2016,8(1):101-117.
- [26] Thierbach C. Map design aspects, route complexity, or social background? Factors influencing user satisfaction with indoor navigation maps[J]. *Cartography & Geographic Information Science*, 2013,40(3):201-209.