

人偶驱动机制对虚拟候机楼寻路实验结果的影响

孙澄宇^{1,2}, 邹明妍^{1,2}, 李舒阳³

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 同济大学 上海市城市更新及其空间优化技术重点实验室, 上海 200092; 3. 新加坡国立大学 设计与工程学院, 新加坡 119077)

摘要: 为提高机场候机楼内旅客寻路效率研究中, 被广泛采用的虚拟寻路实验的结果准确性, 通过 13 712 人次, 分 5 组进行的周边人偶的虚拟对照实验, 研究了随机生成机制与真实轨迹变换机制及两者混合应用对实验结果的影响。研究表明, 就决策时间而言, 无人环境与完全由真实轨迹变换机制驱动的周边人偶有明显差异, 而与完全由随机生成机制驱动的人偶比较则未有显著差异。并且随着两种驱动机制中随机生成机制比例的提高, 差异逐渐消除。此外, 在寻路成功率、绕路系数上, 两种机制相较于无人环境均没有显著差异。因此, 是否选择恰当的驱动机制会影响到关乎决策时间的虚拟实验的准确性。

关键词: 寻路; 虚拟实验; 机场; 人群; 对照试验

中图分类号: TU248.6, TP399

文献标志码: A

Influence of Avatar Locomotion Model on Virtual Wayfinding Outcomes in Airport Terminal Experiments

SUN Chengyu^{1,2}, ZOU Mingyan^{1,2}, LI Shuyang³

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Urban Renewal and Spatial Optimization Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Design and Engineering, National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore)

Abstract: To enhance the accuracy of virtual wayfinding experiments widely used in the study of wayfinding efficiency in airport terminals, this paper conducted a virtual controlled experiment involving 13 712 participants divided into five groups to investigate the influence of stochastic-trajectory-driven mechanism, true-trajectory-driven mechanism, and their combined application on the experimental outcomes. The findings reveal that,

significant differences in decision-making time between the no-avatar environment and those entirely driven by the true-trajectory-driven mechanism, while no significant differences were observed when compared to the fully stochastic-trajectory-driven mechanism. Moreover, as the proportion of the stochastic-trajectory-driven mechanism in both driving mechanisms increased, these differences gradually diminished. Additionally, in terms of the success rate of wayfinding tasks and detour rates, there were no significant differences between the two mechanisms and their different combinations compared to the no-avatar environment. Therefore, the driving mechanisms can influence the accuracy of virtual experiments related to decision time.

Key words: wayfinding; virtual experiments; airports; crowd; controlled experiment

研究行人寻路行为及其影响因素对于提高机场建筑设计质量、换乘效率、行人安全、消防救援至关重要。传统上, 现场寻路实验被广泛用于研究正常或紧急情况下机场建筑内行人的寻路行为^[1]。然而, 这种方法存在实验成本高、条件控制困难以及场地批准等方面的局限性。随着虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术的发展与普及, 它为研究人员提供一种更加经济高效的方法来获取逼真虚拟场景中不同受控条件下详细的寻路数据, 越来越多的虚拟寻路实验被用于研究行人在机场建筑内的寻路行为^[2-4]。

研究表明, 在真实环境中寻路时, 社会影响 (即建筑内部其他人群的存在) 是影响行人寻路决策的重要因素^[5]。在虚拟现实实验中, 虚拟人偶的应用

收稿日期: 2023-07-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51778417)

第一作者: 孙澄宇, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为基于 VR 的设计可视化与优化、人机交互、环境行为。
E-mail: ibund@126.com

通信作者: 邹明妍, 博士生, 主要研究方向为基于 VR 的设计优化、环境行为研究。E-mail: azoumingyan@163.com



论文
拓展
介绍

能够增强参与者的沉浸感与体验感,使他们做出更贴近真实环境反应的行为^[6]。已有研究指出,被试在特定虚拟空间(T型走廊)非紧急状态下的寻路决策受到周边人偶存在与否的显著影响^[7]。因此,越来越多有关行为研究的虚拟实验开始关注虚拟人偶的设计。虚拟实验中虚拟人偶设计通常涉及三个方面:外貌特征^[8]、动作表现^[9]以及虚拟人偶的移动驱动机制(即行为逻辑)^[10]。前两个方面通过细化虚拟人偶个体的拟人行为,使其更贴近真人。虚拟人偶的驱动机制则侧重于模拟人群的运动轨迹与行为表现。机场建筑因其规模体量庞大、人流密集、流线复杂等特点,往往以人群作为讨论对象,而不过分强调周边人群微观层面的个体特征。因此,在机场建筑虚拟寻路实验中,虚拟人偶设计的关注点主要集中在虚拟人偶的驱动机制方面。虽然已有大量研究探讨了虚拟人偶驱动的不同方法或模型^[11-13],但关于虚拟人偶各种驱动机制对寻路实验结果的影响研究尚不充分。为了提高虚拟寻路实验结果的正确性,本研究旨在研究周边人偶的不同驱动机制是否会影响到虚拟寻路实验结果。

为探究此问题,本研究根据虚拟人偶的两种驱动机制(即随机生成机制、真实轨迹变换机制),共设计了不同驱动机制虚拟人偶的5种混合比例,利用上海浦东国际机场S1卫星厅的后评估项目,在导向标识有效的虚拟环境中研究虚拟人偶驱动机制对参与者寻路结果的实际影响。本研究的结果为虚拟人偶驱动机制如何影响虚拟环境中参与者的寻路决策提供更加全面的见解,有利于提高利用虚拟技术研究寻路行为的有效性。

1 虚拟人偶的驱动模型

虚拟人偶被认为是影响虚拟实验参与者沉浸感与反应的重要因素,广泛用于行为研究、教育培训、人机交互等领域。虚拟人偶驱动机制在虚拟实验中的研究主要集中在如何增加虚拟人偶行为、移动轨迹的真实感方面^[11-15]。一些研究专注于利用数学模型或算法、真实行为数据复现某些场景下虚拟人偶逼真的移动轨迹,从而促进参与者更贴近真实情境的行为^[11]。有的研究则解决虚拟场景中虚拟人偶之间的距离保持问题,使其表现出合理的避让行为^[12]。虚拟人偶的驱动模型主要是来自于学术研究中的人群模拟,一般分为三个层级:宏观层面的活动序列、中观层面的路径规划以及微观层面的局部避让。

1.1 宏观层面的驱动模型

该层面的驱动机制主要解决个体在建筑中一系列前后进行的活动序列。国内外多接受基于活动表的模型(activity-based model, ABM)^[16]。虚拟人偶在可能的目的地间进行选择,涉及活动调度及其活动区域选择。ABM为虚拟人偶提供了一个由连续活动子目标构成的行为序列,使其能够执行假设的活动列表,包括活动的起始时间、持续时间、位置、顺序等。

1.2 中观层面的驱动模型

该层面的驱动机制主要在上述活动序列中的两个先后发生的活动之间一次性计算(考虑静态障碍物)规划空间路径,常见有如基于最短路径的模型^[17-18]、基于智能体的模型^[19]等。其中,基于最短路径是众所周知的路线选择方法。它将虚拟人偶中观层面的路径选择简化为“最短路径”问题,将复杂的导航环境抽象为节点和边,利用迪杰斯特拉算法(Dijkstra)算法^[17]或A*算法^[18]计算两个活动位置之间的最短路径。基于最短路径的模型以距离作为路线选择的首选项。而路线选择过程中,除了距离以外,还涉及时间、成本、风险、周边人偶的密度等多种偏好与因素。由此,衍生出其他启发式方法,如双目标或多目标Dijkstra算法、安全区间路径规划(safe interval path planning)算法,对最短路径进行加权处理。相反地,其他模型,例如活动选择模型^[20]在预期成本函数中并不考虑与目的地的距离,而是根据行为规则选择活动路线。基于智能体的模型^[19]赋予每个虚拟人偶某种形式的智能(如视觉感知、环境认知)实现简单的行为规则,通过模拟背景知识与虚拟环境信息(如度量、语义、拓扑)的相互作用选择全局路径。

1.3 微观层面的驱动模型

该层面的驱动机制主要解决个体在沿已规划好的空间路径行进时遇到动态障碍物避免碰撞的局部避让行为。一般来说,可以使用任何基于碰撞预测的局部方法处理避让问题。现有大多数方法或模型根据虚拟人偶局部所在区域的环境信息进行避让计算,主要集中在距离、方向和速度三个参数值。例如,基于力的模型^[21]根据距离场控制虚拟人偶之间的间隙,使其不会发生碰撞;基于速度的模型^[10]引导虚拟人偶的速度参数,使其在将来不会发生碰撞。基于视觉的模型^[22]则通过局部最佳转向使虚拟人偶之间避免碰撞。其中,社会力模型最为流行^[23],个体运动的变化由社会力场(包括指向目的地的驱动力、

来自其他行人与障碍物的排斥力)引导,使虚拟人偶之间保持正常的社交距离,从而实现虚拟人偶的避让行为。

一个有目的的虚拟人偶要以连贯有效的方式在宏观、中观、微观等抽象层级上做出行动选择,制定活动计划,拥有一个全局路径规划,从而产生具有逻辑序列的寻路行为。在行人动力学与人群模拟的背景下,现有研究关于宏观层面活动计划的生成与微观层面局部避让的处理基本达成一致,在宏观层面以基于活动表的模型、微观层面以社会力模型最为常见与流行,而关于中观层面路线规划或路线选择的研究本质上是跨学科的,涉及心理学、数学、行为学、计算机科学等多个学科的概念、方法和技术,现有驱动模型间的争议性较大,尚未达成一致。因此,本研究集中探讨宏观层面与微观层面驱动模型设定相同(即宏观层面的基于活动表的模型、微观层面的社会力模型),而中观层面驱动模型设定不同的两种人偶驱动机制(即随机生成机制、真实轨迹变换机制)对常态条件下机场建筑虚拟环境中参与者寻路结果的影响。

2 驱动机制的对照实验设计

2.1 虚拟人偶的两种驱动机制

2.1.1 随机生成机制

随机生成机制在宏观层面使用ABM为虚拟人偶提供活动计划。本研究以“出发点-途经点-目的地”的模板描述虚拟人偶执行哪些活动以及活动的执行顺序。出发点、途经点与目的地作为三个独立数据集,每个集合包含若干个坐标点数据 $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) \dots (x_i, y_i, z_i)\}$,活动计划的生成是按照一定概率从三个集合中随机选取坐标数据。虚拟人偶在出发点(即活动的空间位置)被生成,并被随机赋予潜在活动选择集 $S\{A_1, A_2 \dots A_i\}$ 中与途经点相匹配的某项活动 A_i 。例如,途经点为迪奥店铺,那么匹配的活动为购物。对于同一机场建筑空间来讲,活动类型是通用的,常见的包含购物、去卫生间、离境退税等。活动 A_i 的起始时间、持续时间根据活动计划在预设范围内随机赋值。

中观层面由 A^* 最短路径算法测量活动位置间的成本距离,生成从当前位置到另一活动位置的全局最短路径,在可通行区域内直接生成串联各点的最短路径,驱动虚拟人偶遵循计划的最短路径进行移动。微观层面利用社会力模型模拟虚拟人偶的局

部避让行为,考虑了个体之间的社交距离以及与动态障碍物的相互作用,使得虚拟人偶能够以更接近现实的方式进行避让,从而提高了实验的真实性和可靠性。为了更有效地检测碰撞,模型被解析为多边形对,本研究采用三角形人偶避让检测机制,将虚拟人偶避让的检测范围设定为一个倒圆角的等腰三角形(图1),当三角形在几何上的最近距离小于给定阈值时,将其视为发生碰撞。相比于圆形相切的检测机制,不但扩大了人偶避让检测的范围,还减少了“粘连”现象发生的可能性。

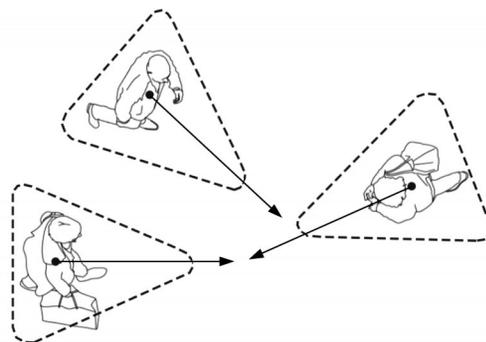


图1 虚拟人偶的避让

Fig. 1 Local collision avoidance of virtual humans

2.1.2 真实轨迹变换机制

真实轨迹变换机制在宏观层面与微观层面的设定与随机生成机制相同,而在中观层面根据实际捕获的真实寻路轨迹数据规划虚拟人偶的全局路径。不同于随机生成机制的随机选择,真实轨迹变换机制的路径规划均来自于目标建筑内使用者真实的寻路轨迹,可能是完整的一条真实寻路轨迹或者真实寻路轨迹的一部分。

2.2 不同驱动机制虚拟人偶的5种混合比例

为了研究周边人偶驱动机制对虚拟寻路实验结果的实际影响,需要进行对照实验,并将虚拟环境中不设置虚拟人偶(即无周边人群)作为控制组,分析虚拟人偶驱动机制作为特定变量对虚拟寻路实验中被试寻路结果的影响。因此,对照实验需要操纵两个变量:虚拟人偶的规模 and 不同驱动机制驱动的虚拟人偶的混合比例。虚拟人偶的规模是指虚拟场景中虚拟人偶的绝对数量。虚拟人偶的混合比例是指两种驱动机制(即随机生成机制、真实轨迹变换机制)所驱动的虚拟人偶的组合情况。整个对照实验为不同驱动机制虚拟人偶的5种混合比例(图2)设置了5组过程相同的虚拟寻路实验。除了虚拟人偶的混合比例这一自变量,每组实验遵循相同的程序

和实验设计,被试会遇到含有某种混合比例(图 2 中 a-e)周边人偶的虚拟实验环境,被要求按照所派发的一项寻路任务完成虚拟寻路实验。

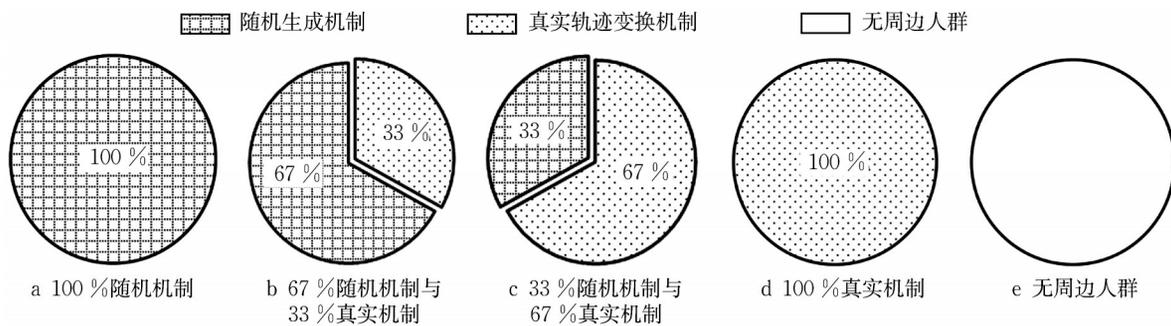


图 2 不同驱动机制虚拟人偶的 5 种混合比例

Fig. 2 Virtual humans with different driving mechanisms constituting five ratios

3 虚拟寻路实验

虚拟寻路实验以上海浦东国际机场 S1 卫星厅的国际出发层为实验环境,利用 Unity3D 软件开发在线虚拟实验环境。实验开始时,虚拟人偶在各个活动的空间位置被生成,人偶规模会快速达到动态稳定。

3.1 人偶个体特征设定

研究团队在 Unity3D 环境下利用 C# 语言开发了具有亚洲人体态特征的虚拟人偶工具包,包含 12 个虚拟人偶模板(图 3),其中男女各 6 人,老中青的比例为 1:2:1。它们具有坐、走、跑、招手、边走边打电话、站着看手机、起立等 14 个机场建筑公共空间中的常见动作。

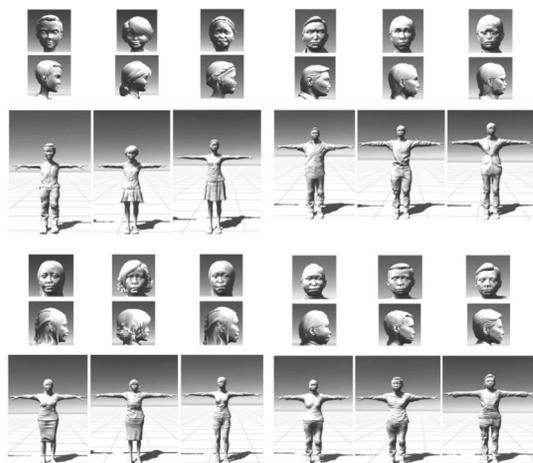


图 3 虚拟人偶模板

Fig. 3 Virtual humans

3.2 虚拟寻路任务

虚拟寻路实验采用相同的寻路任务模板,即“起

点一支线打卡任务(商店购物或上卫生间)—登机任务”。国际出发层(图 4)包括 4 个起点、21 个终点、2 种沿途打卡任务,共有 168 种寻路任务(表 1),与 5 种虚拟人偶混合比例相组合,共计 840 个不同的寻路任务场景。被试需按照虚拟登机牌(交互界面右下角)提示的航班信息(图 5),包括登机口、起飞时间、航班号等内容,在截止登机之前赶到登机牌显示的登机口,完成虚拟寻路登机任务,获得 60 分。其次,被试被鼓励在商铺、卫生间等途经点通过随机翻找“离开”卡牌的形式完成支线打卡任务,获得 40 分。对照实验采用随机派发寻路任务的模式,利用后台服务器端设置指针,保证多并发状态下寻路任务分配的均好性。

3.3 虚拟人偶的规模

根据实地调研与机场运营管理数据统计,国际出发层中央人流交织区(图 4)乘客可通行区域的建筑面积约为 8 102 m²,人流平均密度约 0.05 人·m⁻²,根据国际出发层的可通行区域面积估算出虚拟人偶的绝对数量为 1 400 人。因此,虚拟寻路实验中,虚拟人偶的规模均控制为 1 400 人(图 6)。

4 对照实验开展与结果分析

4.1 被试招募与实验开展

本次实验招募了 435 名被试,其中男性 211 名,女性 224 名,男女比例均衡。被试的年龄分布为 18~25 岁,视力及精神状态均正常,都接受过良好的教育,且有乘坐飞机的经历,了解基本的候机值机流程。本次实验前,被试均未到达过浦东国际机场卫星厅国际出发层。

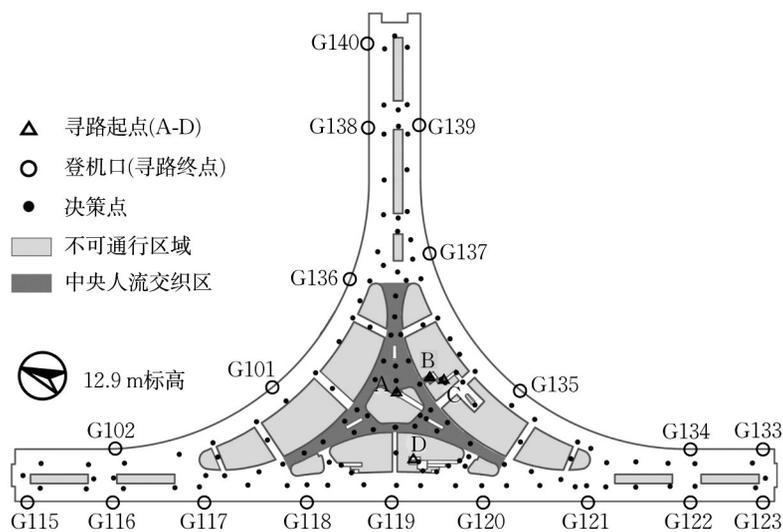


图4 国际出发层平面示意

Fig. 4 Plan view of International Departure

表1 虚拟寻路任务示例

Tab. 1 Examples of virtual wayfinding tasks

任务编号	起点	虚拟开始时刻	登机口	虚拟航班号	虚拟起飞时刻	支线打卡任务
448	A	7:43	G136	KL855	9:35	上卫生间
611	C	13:35	G101	QF357	14:25	上卫生间
52	B	12:04	G135	QF324	12:45	商店购物
505	D	6:59	G118	KL895	8:15	商店购物
...



图5 虚拟寻路实验的交互界面

Fig. 5 Interactive interface of virtual wayfinding experiment



图6 虚拟人偶的数量控制

Fig. 6 Number adjustment of virtual humans

本次实验为线上实验,被试可以在个人终端(电脑、平板、手机)通过互联网浏览器(如 Microsoft Edge,

Google Chrome, FireFox, Safari)登陆实验入口(<http://pvg.plans.run>)。被试录入性别、年龄等个人属性信息后,即开始在线虚拟寻路实验。每名被试被要求参与实验三次,每次需要完成10项寻路任务。单项寻路任务大约需要花费3~5 min,每次实验的时长约为40 min。为保证被试参与在线实验时具备良好的反应能力,每次实验间隔一周进行。在累计72 h的实验窗口期内,随机为5种人偶驱动机制混合比例,分别采集了2 768、2 902、2 656、2 774、2 612条路径数据(共13 712人次)。

4.2 数据清洗

无效数据会对研究结果造成干扰,数据清洗是保证研究结果有效性的前提。被试从环境认知到寻路决策需要一定的时间,特别对流线复杂、规模体量庞大的机场建筑而言,情况更为复杂。因此,被试在各决策点的平均寻路决策时间被期待至少需要花费2 s。若被试的寻路任务得分少于或等于40分,且平均寻路决策时间低于2 s,那么此条寻路数据被认为是无效数据。经统计,有效数据为13 010条,数据有效率94.8%。被试的寻路数据均以JSON格式进行存储,包括被试个人信息数据、寻路任务(主线任务、打卡任务)数据、寻路轨迹数据(图7)。

4.3 寻路结果的分析与对比

寻路性能的评价指标量化分析了个体的寻路表现,反映个体的寻路结果,大多与被试的寻路轨迹、寻路状态等有关,较常见的包括寻路成功率、寻路决策时间、步行距离、绕路系数、决策困难(如错误转弯、迷茫、停留、折返、后退)的次数、步速等。寻路任务是否被完成是衡量被试寻路性能的最直观表现,

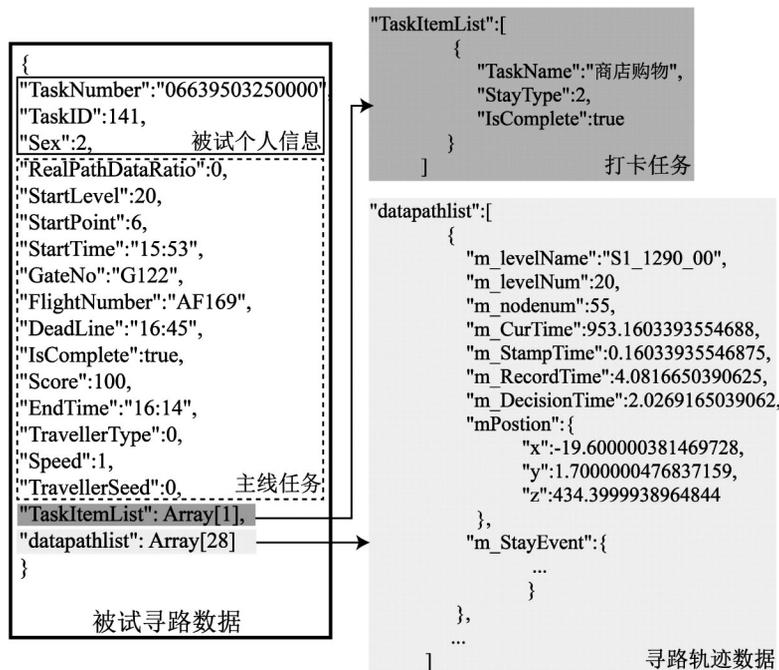


图 7 被试的某条寻路实验数据

Fig. 7 Wayfinding data of a participant

即单项寻路任务的成功率。寻路决策时间与步行距离越短,被试决策困难的次数较少,认为个体在寻路任务中的表现越好。绕路系数是指最短路径的长度与被试实际寻路轨迹长度的比值,值域为(0, 1],数值越接近0表示越绕路^[1],寻路表现越不理想。寻路成功率、寻路决策时间、绕路系数三个评价指标能够比较全面具体地解释个体寻路表现与寻路结果。因此,本研究利用13 010条有效数据,分析上述三个寻路性能评价指标,从而探究虚拟人偶及其驱动机制对虚拟寻路实验结果的影响。

4.3.1 寻路成功率

不同比例的虚拟人偶作用下,被试的登机任务成功率并不相同(表2)。周边人偶为100%随机生成机制驱动的虚拟人偶(a)时,被试的登机任务成功

率最低,但5种混合比例下(图2中a-e)登机任务成功率的差异无统计学意义($\chi^2=5.789, P=0.215 > 0.05$),即虚拟人偶及其驱动机制对于登机任务达成情况的影响无差异(表2)。同理,卡方检验结果表明,5种混合比例分别作用下的商店购物打卡任务成功率各不相同,但差异无统计学意义($\chi^2=2.715, P=0.608 > 0.05$)。5种混合比例分别作用下卫生间打卡任务的成功率各不相同,但差异无统计学意义($\chi^2=8.174, P=0.085 > 0.05$)。因此,虚拟人偶及其驱动机制对虚拟寻路实验寻路成功率的影响无显著差异。此外,上卫生间打卡任务的成功率要低于商店购物打卡任务的成功率,分析发现,浦东国际机场卫星厅国际出发层卫生间指示标识较少是主要的诱因。

表 2 寻路成功率统计结果

Tab. 2 Results of wayfinding success rate

在线任务类型与完成情况	虚拟人偶的混合比例					χ^2	P值
	a	b	c	d	e		
登机任务成功数量	2 607	2 749	2 505	2 623	2 464	5.789	0.215
登机任务未成功数量	19	15	9	11	8		
登机任务成功率/%	99.27	99.45	99.64	99.58	99.68		
商店购物任务成功数量	1 293	1 359	1 229	1 312	1 210	2.715	0.608
商店购物任务未成功数量	26	32	23	20	27		
商店购物任务成功率/%	98.03	97.70	98.16	98.50	97.82		
上卫生间任务成功数量	1 269	1 337	1 235	1 270	1 187	8.174	0.085
上卫生间任务未成功数量	38	36	27	32	48		
上卫生间任务成功率/%	97.09	97.38	97.86	97.54	96.11		

4.3.2 绕路系数

根据寻路数据,统计各寻路起点(A-D)不同人偶混合比例下相同虚拟寻路任务的绕路系数(寻路起点至目标登机口的最短路径长度与被试寻路轨迹长度的比值的平均值),表3显示了不同寻路起点各混合比例下绕路系数的平均值。由于样本数据量大于50,采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验法检验不同寻路起点下各组绕路系数数据的正态性。结果表明,寻路起点为A、B、C的5种混合比例下的各组绕路系数的显著性均 >0.05 ,服从正态分布。经Levene's方差齐性检验,寻路起点为A、B、C下的各组数据方差齐($P>0.05$),满足方差分析的适用条件。而寻路起点为D的5组绕路系数数据的显著性均 <0.05 ,不服从正态分布,采用Kruskal-Wallis H检验寻路起点为D时5种混合比例作用下的绕路系数是否不同。根据检验结果(表3),各起点(A-D)不同混合比例下被试寻路任务的绕路系数的组间差异没有统计学意义。因此,虚拟人偶及其驱动机制对虚拟寻路任务绕路系数的影响无显著差异。

表3 绕路系数统计结果

Tab. 3 Results of detour rate

寻路起点	混合比例	平均值	标准偏差	F或H	P值
A	a	0.577	0.140	F=0.087	0.986
	b	0.577	0.150		
	c	0.595	0.116		
	d	0.590	0.111		
	e	0.590	0.115		
B	a	0.574	0.182	F=0.061	0.993
	b	0.579	0.198		
	c	0.582	0.204		
	d	0.599	0.197		
	e	0.595	0.199		
C	a	0.519	0.167	F=0.102	0.982
	b	0.516	0.173		
	c	0.516	0.174		
	d	0.534	0.171		
	e	0.542	0.166		
D	a	0.549	0.156	H=0.364	0.985
	b	0.538	0.166		
	c	0.534	0.160		
	d	0.541	0.169		
	e	0.552	0.169		

4.3.3 寻路决策时间

实验记录了被试位于决策点的寻路决策时间(指被试到达某决策点至离开该决策点前往下一决策点所消耗的时间),统计周边人偶为相同比例的虚拟人偶时,各被试在不同决策点的平均寻路决策时间。5种混合比例(图2中a-e)分别作用下,被试的

平均寻路决策时间的中位数(四分位距)依次为10.49(10.77)、10.62(11.56)、10.35(10.30)、10.61(11.47)、10.69(10.69)。各组数据均存在极端值。在已剔除无效数据的前提下,存在某被试在空间形式较为复杂的决策点的寻路决策时间较长的可能性,因此,本研究认为极端值合理,无需剔除。由于样本数据量大于50,采用K-S检验法检验各组平均寻路决策时间数据的正态性,结果显示各组数据的显著性均为 <0.05 ,表明数据不服从正态分布。

采用Friedman检验比较5种混合比例作用下被试各决策点的平均寻路决策时间是否存在差异。结果显示,虚拟人偶的不同混合比例对于平均寻路决策时间的差异有统计学意义($\chi^2=54.092, P<0.001$)。即虚拟人偶及其驱动机制对被试寻路决策时间的影响具有显著差异。分析极端值的情况发现,当被试位于超视距大空间双向决策点、超视距大空间多向决策点、视野受限小空间双向决策点等三类空间形式的决策点时,5种混合比例分别作用下被试的平均寻路决策时间存在明显差异。借助在线实验的回放功能,复现被试在此三类场景中寻路决策时的状态。分析发现,三类场景中,被试会观察周边虚拟人偶的行为,并对决策点周边的导向标识进行仔细阅读,随后做出寻路决策。

采用Bonferroni法校正显著性水平的事后两两比较发现,a和c,a和d,b和c,b和d,c和d,c和e,d和e比例对于被试平均决策时间的差异有统计学意义(表4);而a和b,a和e,b和e比例对于平均决策时间的差异无统计学意义(表4)。因此结果显示,无周边人偶(e)与完全由真实轨迹变换机制驱动的人偶(d)作用下的寻路决策时间有显著差异,而其与完全随机机制驱动的人偶(a)作用下的决策时间未有显著差异,且随着两种决策机制中随机生成机制比例的提高,差异逐渐消除(表4)。在本研究中,当周边人偶中真实轨迹变换机制驱动的虚拟人偶所占比例低于33%(b)时,被试的寻路决策时间与周边无人偶时被试的寻路决策时间差异无统计学差异,即无法发挥周边人群对被试寻路决策的社会影响。

5 讨论

以往研究强调了机场等交通建筑中参与者对导向标识的依赖^[24-25]。但本研究发现,周边人偶作为环境线索在参与者寻路过程中同样起到重要作用。参与者在机场虚拟环境中较为复杂的决策点(如超视

表4 平均寻路决策时间统计结果

Tab. 4 Results of decision-making time

混合比例	平均值	标准偏差	中位数	P值(两两比较)				
				a	b	c	d	e
a	12.87	9.607	10.49		1.000	0.002	0.005	1.000
b	12.75	9.375	10.62	1.000		0.000	0.043	1.000
c	12.72	9.850	10.35	0.002	0.000		0.000	0.004
d	12.55	7.834	10.61	0.005	0.043	0.000		0.002
e	12.09	7.656	10.69	1.000	1.000	0.004	0.002	

距大空间多向决策点)进行寻路决策时,会仔细观察周边人群的行为。在某些情况下,参与者更有可能跟随周边人群而非导向标识。但本研究尚且不确定虚拟环境中周边人群对于参与者引导的作用机制,可能是因其规律性移动产生的引导效应,也有可能是与导向标识等其他因素的交互作用,这有待进一步研究。此外,本研究以上海浦东机场S1卫星厅作为研究对象探讨了机场虚拟寻路实验中周边人偶驱动机制对寻路结果的影响,那么本研究结果对于其他类型交通建筑的普适性需要进一步的分析与验证。

6 结语

既有研究证明了虚拟环境中周边人群与寻路行为的相关性^[7],并检验了周边人偶对个体疏散时路线选择的影响^[13],行为研究的虚拟实验则较为关注在如何开发或驱动更加逼真或贴近人类真实行为的虚拟人偶^[11-15],但尚未研究周边人偶驱动机制对虚拟寻路实验结果的影响。在虚拟现实实验广泛用于行人寻路行为研究的背景下,了解虚拟环境中周边虚拟人偶驱动机制是否影响虚拟寻路实验中参与者的寻路结果是十分重要的。

本文进行了一项基于在线虚拟现实的对照实验,研究虚拟人偶驱动机制对虚拟寻路实验结果的实际影响。实验结果表明,常态条件下,(1)在导向标识有效的机场建筑中开展虚拟寻路任务时,周边人偶会对被试的寻路结果产生影响。(2)虚拟人偶的驱动机制(即随机生成机制、真实轨迹变换机制)对被试寻路任务的寻路成功率以及绕路系数的影响没有明显差异。(3)不同驱动机制驱动的周边人偶会影响被试的寻路决策时间,但是对被试寻路决策的正确性影响较小。因此,为保证虚拟寻路实验结果的有效性与可用性,倘若虚拟寻路实验为了获取个体的寻路决策时间数据,那么虚拟寻路实验中的周边虚拟人偶应由100%真实轨迹变换机制驱动。

研究揭示了机场建筑虚拟环境中周边人偶驱动机制对个体寻路结果的影响。这不仅拓展当前建筑寻路中周边人群对个体寻路行为影响的发现,也为虚拟寻路实验中周边人偶的设计提供了重要见解与支撑,从而更大程度提高了行为研究中虚拟寻路实验结果的正确性。虽然本研究以机场候机楼为案例,但由于在旅客的寻路效率诉求上的相似性,本研究对于其他交通类建筑而言都具有启发性。未来计划进一步探讨地铁、高铁等其他类型交通建筑虚拟环境中周边人群驱动机制对寻路结果的影响。

作者贡献声明:

孙澄宇:研究思路,审阅论文并提出修改意见,提供经费支持。
邹明妍:调研及整理文献,数据整理与分析,论文撰写与修订。
李舒阳:数据整理与分析,参加研究工作。

参考文献:

- [1] 李斌,石雨蕉,刘智.上海轨道交通枢纽站中特殊人群的路径探索研究[J].建筑学报,2015(S1):53.
LI Bin, SHI Yujiao, LIU Zhi. Wayfinding of special groups in interchange subway stations of Shanghai [J]. Architectural Journal, 2015(S1):53.
- [2] SUZER O K, OLGUNTURK N, GUVENC D. The effects of correlated colour temperature on wayfinding: A study in a virtual airport environment[J]. Displays, 2018,51:9.
- [3] 孙澄宇,李舒阳,胡伟林.航站楼开航后的旅客寻路效率评估方法——以上海浦东国际机场卫星厅为例[J].建筑学报,2021(S1):169.
SUN Chengyu, LI Shuyang, HU Weilin. A method of wayfinding efficiency evaluation for an operating terminal-taking the satellites terminal of pvg airport as an example [J]. Architectural Journal, 2021(S1):169.
- [4] BIRRELL S, PAYRE W, ZDANOWICZ K, et al. Urban air mobility infrastructure design: Using virtual reality to capture user experience within the world's first urban airport [J]. Applied Ergonomics, 2022,105:103843.
- [5] DALTON R C, HÖLSCHER C, MONTELLO D R. Wayfinding as a social activity [J]. Frontiers in Psychology, 2019,10:142.
- [6] DICKINSON P, GERLING K, HICKS K, et al. Virtual reality crowd simulation: Effects of agent density on user experience and behaviour[J]. Virtual Reality, 2019,23(1):19.
- [7] YASSIN M, EL ANTABLY A, ABOU EL-ELA M A S. The others know the way: A study of the impact of co-presence on wayfinding decisions in an interior virtual environment [J]. Automation in Construction, 2021,128:103782.
- [8] NELSON M G, MAZUMDAR A, JAMAL S, et al. Walking in a crowd full of virtual characters: Effects of virtual character appearance on human movement behavior [C]// Advances in

- Visual Computing. ISVC 2020. Cham, Switzerland: Springer, 2020: 617-629.
- [9] PAUW L S, SAUTER D A, VAN KLEEF G A, *et al.* The avatar will see you now: Support from a virtual human provides socio-emotional benefits [J]. *Computers in Human Behavior*, 2022, 136: 107368.
- [10] KARAMOUZAS I, OVERMARS M. Simulating and evaluating the local behavior of small pedestrian groups [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(3): 394.
- [11] TANG M. From agent to avatar: Integrate avatar and agent simulation in the virtual reality for wayfinding [C]// *Proceedings of the 23rd Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 503-512.
- [12] LIU W S, ZHANG J, LI X D, *et al.* Avoidance behaviors of pedestrians in a virtual-reality-based experiment [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 590: 126758.
- [13] FU M Q, LIU R, ZHANG Y. Do people follow neighbors? An immersive virtual reality experimental study of social influence on individual risky decisions during evacuations [J]. *Automation in Construction*, 2021, 126: 103644.
- [14] LOVREGGIO R, GONZALEZ V, FENG Z A, *et al.* Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City hospital case study [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 38: 670.
- [15] KYRIAKOU M, PAN X N, CHRYSANTHOU Y. Interaction with virtual crowd in immersive and semi-immersive virtual reality systems [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2017, 28(5): e1729.
- [16] 杨超, 缪子山, 史晟. 基于活动的城市出行需求层次选择模型 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 1504.
YANG Chao, MIAO Zishan, SHI Sheng. Activity-based urban passenger travel demand hierarchy selection model [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(10): 1504.
- [17] 刘一松, 魏宁, 孙亚民. 基于栅格法的虚拟人快速路径规划 [J]. *计算机工程与设计*, 2008(5): 1229.
- LIU Yisong, WEI Ning, SUN Yamin. Path planning algorithm based on grid method for virtual human [J]. *Computer Engineering and Design*, 2008(5): 1229.
- [18] PARK S I, QUEK F, CAO Y. Simulating and animating social dynamics: Embedding small pedestrian groups in crowds [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2013, 24(3/4): 155.
- [19] SHENDARKAR A, VASUDEVAN K, LEE S, *et al.* Crowd simulation for emergency response using BDI agents based on immersive virtual reality [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, 16(9): 1415.
- [20] HOOGENDOORN S P, BOVY P H L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(2): 169.
- [21] 马尚, 张蕊, 齐泽阳, 等. 对向行人避让与接触行为社会力模型改进研究 [J]. *计算机仿真*, 2021, 38(3): 63.
MA Shang, ZHANG Rui, QI Zeyang, *et al.* Research on improvement of social force model of opposite pedestrian avoidance and contact behavior [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(3): 63.
- [22] DUTRA T B, MARQUES R, CAVALCANTE-NETO J B, *et al.* Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms [J]. *Computer Graphics Forum*, 2017, 36(2): 337.
- [23] ZHAO H T, THRASH T, KAPADIA M, *et al.* Assessing crowd management strategies for the 2010 Love Parade disaster using computer simulations and virtual reality [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2020, 17(167): 20200116.
- [24] HU X J, XU L R. How guidance signage design influences passengers' wayfinding performance in metro stations: Case study of a virtual reality experiment [J]. *Transportation Research Record*, 2022, 2677(1): 1118.
- [25] LIN J X, SONG R, DAI J F, *et al.* Pedestrian guiding signs optimization for airport terminal [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 2014: 125910.