

# 基于VR孪生实验的群组疏散时空行为特征分析

黄琳<sup>1</sup>, 李文航<sup>1</sup>, 龚建华<sup>1,2</sup>, 马浩男<sup>1,2</sup>, 胡梦雨<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院 国家遥感应用工程技术研究中心, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 101408

**摘要:**“数字孪生”概念的提出为人群行为研究提供了新思路, 本文提出了数字孪生人群行为实验理论框架, 从基本理论、基本原则等方面进行总结, 包括地理认知理论、相似性理论、尺度理论、复杂性问题理论和地理智能模拟原理, 以及实验相似性、协同和异构、规范化和标准化原则, 并进一步提出数字孪生人群疏散实验研究内容及分类。根据该理论框架开展基于VR的群组疏散孪生实验, 并根据实验数据定性和定量分析群组空间结构特征和疏散行为特征。结果表明, 群组成员在孪生疏散过程中呈现出V型和“side by side”结构, 在扶梯这类特殊区域中群组的空间结构有较大的变动, 疏散个体面向方向与其他群组成员间的夹角小于 $60^\circ$ , 并且群组成员间的较小间距和信息扩散交互可以大大提高疏散效率。此外, 分析孪生场景中的疏散轨迹和眼动轨迹得出疏散人群在柱子、出口、换乘通道等位置与环境交互较多, 表明疏散人群在这些位置期望得到环境信息的需求较大。本文的孪生实验结果能够发现地铁站内的疏散瓶颈区域和群组行为规律, 为地铁站内的布局规划和应急预案提供优化建议。

**关键词:** 遥感, 数字孪生, 人群行为实验, 地铁疏散, 群组, 交互行为

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 黄琳, 李文航, 龚建华, 马浩男, 胡梦雨. 2024. 基于VR孪生实验的群组疏散时空行为特征分析. 遥感学报, 28(5): 1314-1329

Huang L, Li W H, Gong J H, Ma H N and Hu M Y. 2024. Social groups' spatio-temporal behavior characteristics analysis in subway evacuation process based on VR digital twin experiments. National Remote Sensing Bulletin, 28 (5): 1314-1329 [DOI: 10.11834/jrs.20243381]

## 1 引言

行为数据的获取和解译一直以来都是人群模拟领域的一大难点, 尤其是人群应急疏散行为数据, 例如火灾、地震等现场的人群疏散数据很难采集。“数字孪生”、“元宇宙”等概念的提出为人群行为模拟领域提供了新的数据获取思路。以个体人及时空行为的孪生为基础, 实现群体人及时空行为的孪生, 从而构建与现实映射和交互的虚拟世界(李文航等, 2023), 以该模式开展人群行为实验获取数据, 继而对特定情景下人的时空行为进行研究, 成为了人群模拟领域和室内GIS研究的重要方向。

目前, 国内外利用数字孪生人群实验主要开

展人群时空行为、空间布局、应急处置方案优化、疏散路径规划及培训演练等几个方面的研究。(1) 设置不同的孪生实验场景条件, 如出口(Guo等, 2020; Lovreglio等, 2022)、转弯角度(Zhang等, 2021)、人流情况(Lin等, 2020)等, 分析不同因素对疏散行为的影响; 根据灯光、疏散标志状态及引导机器人等研究疏散标志对疏散行为的影响(Arias等, 2019), 及行人对疏散标志的感知行为(Huang等, 2021); 还有通过实验数据分析个体、群组的时空行为特征(Cao等, 2018; Lin等, 2018; 张冬等, 2019)。(2) 利用疏散实验及模拟数据进行应急处置方案优化(李润法等, 2021)、建筑消防设计优化(张磊等, 2015)、应急疏散指示标志系统优化(马晓辉等, 2019)及空间格局

收稿日期: 2023-09-12; 预印本: 2024-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2020YFC0833103); 国家自然科学基金(编号:41971361); 中国科学院空天信息创新研究院前沿科学与颠覆性技术研究先导基金(编号:E0Z211010F)

第一作者简介: 黄琳, 研究方向为人群行为模拟、数字孪生应用。E-mail: huanglin@radi.ac.cn

通信作者简介: 李文航, 研究方向为微观人群行为建模与模拟。E-mail: liwh@aircas.ac.cn

优化 (Snopková 等, 2021) 等。(3) 将数字孪生疏散实验与机理模型相结合, 考虑灾害环境对疏散行为的影响, 从而进行路径选择和规划 (张莉, 2021; 王勇, 2023)。(4) 搭建数字孪生疏散实验平台进行疏散演练与培训, 在不同环境、条件下能够低成本、较安全地提高疏散效率 (Bernardes 等, 2015; Zhenan 等, 2018; 胡珉和刘婍雯, 2018; 白寒 等, 2021; 王志伟 等, 2022)。以上数字孪生人群实验研究都取得了较好的成果, 但在数字孪生人群实验理论方面研究存在不足。基于此, 本文提出数字孪生人群行为实验理论框架, 从数字孪生人群行为实验的理论、原则等进行剖析, 继而提出数字孪生人群疏散实验研究的内容及分类。

## 2 数字孪生人群实验理论框架

### 2.1 数字孪生人群行为实验

数字孪生人群行为实验是探索人群行为、地理现象与过程以及现实地理环境中“人—地”关系的创新性地理实验。以往的地理实验研究注重建立有“诠释力”的虚拟地理环境, 来表达和模拟现实地理实体和过程, 缺乏人对地理环境的感知、认知的研究 (Zhang 等, 2018)。从“人”的角度出发, 研究人对复杂地理环境的评估和反应行为是数字孪生领域的一项重大挑战, 数字孪生人群行为实验为该研究方向提供了一种有效方式。本文从数字孪生人群行为实验目的、实验对象、实验过程、实验评价、实验结果与分析等, 提出了数字孪生人群行为实验理论框架 (图1)。

数字孪生人群行为实验根据传统GIS数据库和三维模型数据库构建数字孪生人群实验地理环境, 融合传感器数据形成富语义智能数字孪生地理环境, 支撑数字孪生地理实验平台。结合虚拟现实、眼动追踪和人机交互等技术, 在数字孪生地理实验平台的基础上开展数字孪生人群行为实验。从“实验人”的角度可将数字孪生人群行为实验分为真人参与数字孪生实验和计算机模拟的数字孪生实验。顾名思义, 真人参与的数字孪生实验中的“实验人”为现实人类, 在实验过程中表现的行为即为现实人群行为。计算机模拟的数字孪生实验中的“实验人”则为计算机生成的智能体, 遵守一定的行为规则, 并非现实人类, 其表现出的行为方式能在一定程度上表现真实人群行为, 但无

法完全还原。真人参与的数字孪生实验可获取人群轨迹数据、头部方向数据、眼睛注视点数据和问卷调查数据等多种数据类型。相比而言, 计算机模拟的数字孪生实验能获取的数据较少, 包括智能体的轨迹数据、面向方向等。分析两种孪生人群实验获取的实验数据可以获取人地关系及交互方式, 抽取人群行为方式构建人群行为模型, 例如个体行为模型、群组行为模型、人地交互模型等。模型模拟结果可应用于室内结构规划、消防安全设计、人群疏散预案、路径实时规划等多方面, 以达到虚拟空间反作用于现实空间的目的, 并不断从现实感知器中获取实时数据进行自我迭代和升级, 形成数字孪生过程中虚实数据与过程交互的闭环。

#### 2.1.1 数字孪生人群行为实验基本理论

数字孪生人群行为实验是凭借地理实验工具开展人群与孪生地理环境 (现实地理环境的镜像) 之间的关系与交互研究, 从而反应人群与现实地理环境关系与交互的创新性地理实验。其研究内容包括现实人群行为及地理环境数据实时获取、数字孪生人群和孪生地理环境构建、孪生人群与孪生地理环境交互、孪生行为时空特征分析、人群行为模型构建、对现实人群行为的作用等, 完整的数字孪生过程如图2所示。

其基本理论包含以下几个方面: (1) 地理认知理论。研究人群如何观察、感知和认知孪生地理环境, 分析孪生地理环境给予人群的信息如何影响人群行为并具象表达, 尤其是复杂变化的孪生地理环境对人群行为的影响, 需要借助地理空间认知与地理信息认知等理论。(2) 相似性理论。孪生地理环境中的人群行为能多大程度还原现实地理环境中的人群行为, 包括地理环境相似性、人群行为相似性、人—地交互作用相似性等。只有证明孪生地理环境中的人群行为与现实地理环境中的人群行为具有一定相似性, 才能利用数字孪生人群行为实验探索人群行为特征。(3) 尺度理论。人群行为可分为宏观、微观和介观尺度, 因此数字孪生人群行为实验的开展需要考虑相关地理参数、行为参数、交互参数的尺度问题。不同尺度的数字孪生人群行为实验适应性是其有效性的基础。(4) 复杂性问题理论。人群系统是一个复杂性系统, 由于系统规模效应、个体异质性

和智能性造成难以预测的复杂性。因此,数字孪生人群行为实验需要研究复杂性系统的相关理论。(5)地理智能模拟原理。数字孪生人群行为实验是以人为主体的,以孪生地理环境为基础,以地理

规律、过程信息、“人—地”交互为媒介,最终探索人群与现实地理环境的关系和交互作用,这些都离不开智能计算。

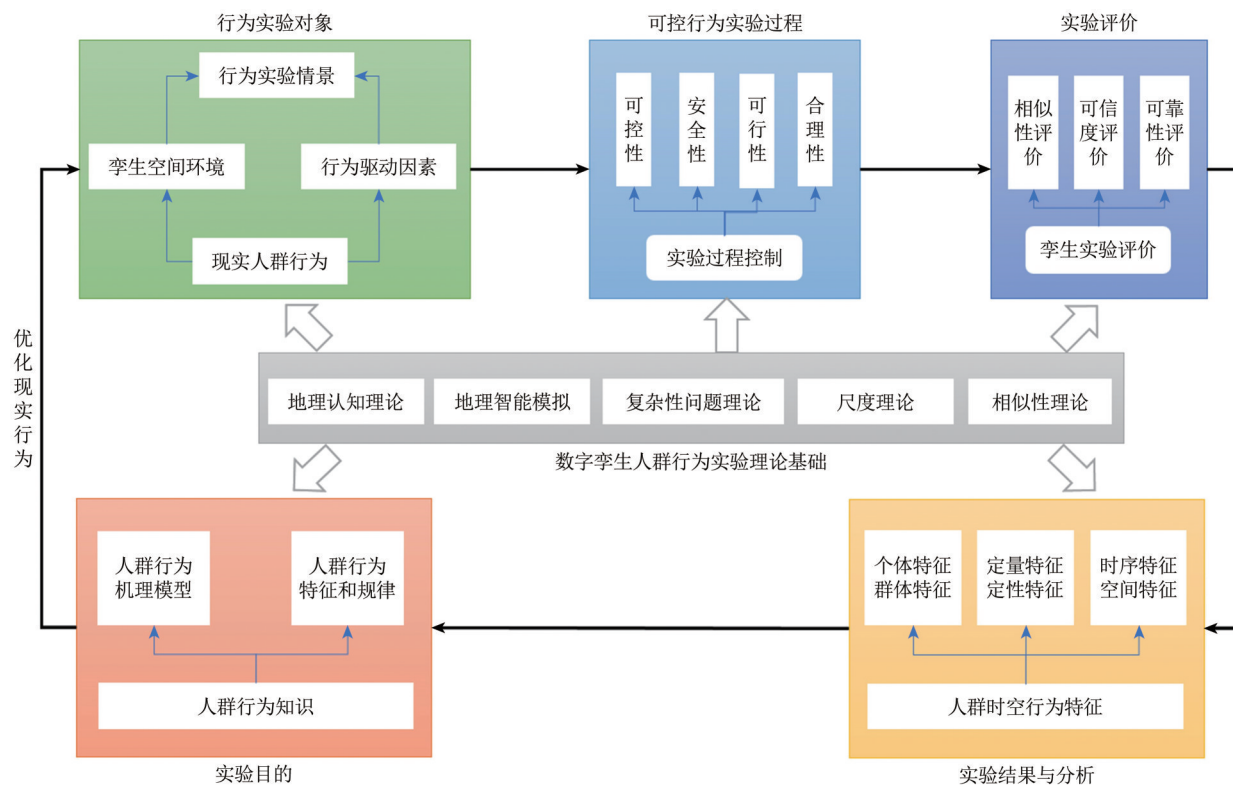


图1 数字孪生人群行为实验理论框架

Fig. 1 Theoretical framework of digital twin crowd behavior experiment

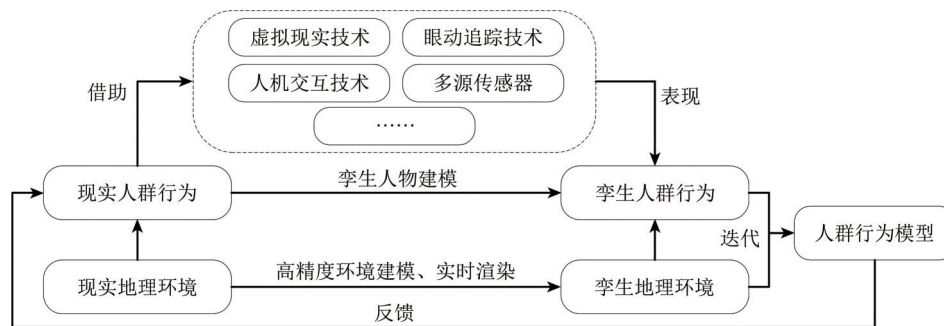


图2 人群行为实验数字孪生过程

Fig. 2 The digital twin process of crowd behavior experiment

### 2.1.2 数字孪生人群行为实验基本原则

数字孪生人群行为实验的开展需要考虑以下几个原则：(1)数字孪生人群行为实验相似性原则。孪生实验情景应尽可能与现实地理情景相似,且实验环境中叠加的信息应尽可能来源于现实。相似的孪生地理实验情景和数据才能保证数字孪生人群行为实验有效性。(2)协同和异构的数字

孪生人群行为实验原则。数字孪生人群行为实验应支持多用户协同和多异构设备,多用户协同的数字孪生实验才能探索群体与地理环境的关系,兼容异构设备的数字孪生人群行为实验平台需能真正实现多用户同时孪生且实时交互。(3)规范化和标准化原则。实验工具和应用的多样化,造成了数字孪生人群行为实验的多样化。因此,需



要对数字孪生人群行为实验系统、实验设计、实验执行等进行规范化和标准化。

2.2 数字孪生人群疏散实验

2.2.1 数字孪生人群疏散实验内容

数字孪生人群疏散实验是研究灾害事件中人群应急疏散行为特征的实验，是数字孪生人群行为实验研究的一个重要分支。数字孪生人群疏散实验与数字孪生地理实验、数字孪生人群行为实验的关系如图3所示。

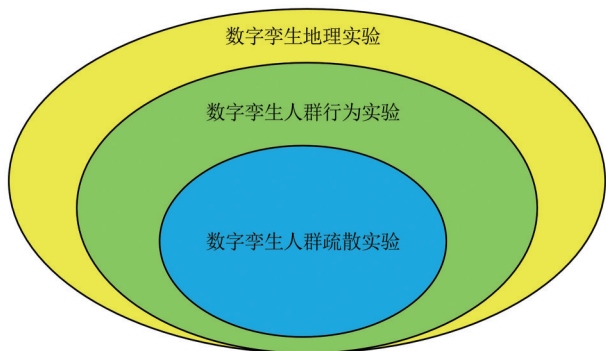


图3 数字孪生地理实验、数字孪生人群行为实验与数字孪生人群疏散实验关系

Fig. 3 The relationship between digital twin geographic experiment, digital twin crowd behavior experiment and digital twin crowd evacuation experiment

数字孪生地理实验是在与现实地理环境相似的虚拟地理环境中，通过模型构建、参数与条件控制以及可视化分析等方式，获取新的地理经验

与知识的方法。数字孪生地理实验的研究对象可以是虚实映射与交互过程中的一切地理实体、信息和过程等。

数字孪生人群行为实验属于数字孪生地理实验研究的其中一个重要分支。数字孪生人群行为实验的研究主体为“人”，通过人群在孪生地理环境中的属性特征表达、行为特征表达和交互特征表达等，反应人群在现实世界中的主体特征，以及现实世界中的“人—地”交互特征，从而将该特征反作用于现实世界中。

数字孪生人群疏散实验是数字孪生人群行为实验中更专注研究灾害事件中人群应急疏散行为的实验方法。期望通过孪生地理环境中的人群疏散实验，研究现实世界中的人群疏散行为特征，解决现实世界应急疏散预案制定、方案优化、实时预测与指导等问题。

2.2.2 数字孪生人群疏散实验分类

人群疏散行为实验从实验方式来看可分为现实演练人群疏散实验、相似物理还原人群疏散实验、真人参与式数字孪生人群疏散实验和计算机模拟的数字孪生人群疏散实验。本文所提的数字孪生人群疏散实验即真人参与式和计算机模拟的两类数字孪生人群疏散实验。其中真人参与式数字孪生人群疏散实验从交互设备上又可分为桌面式数字孪生人群疏散实验和沉浸式数字孪生人群疏散实验。人群疏散行为实验分类如图4所示。

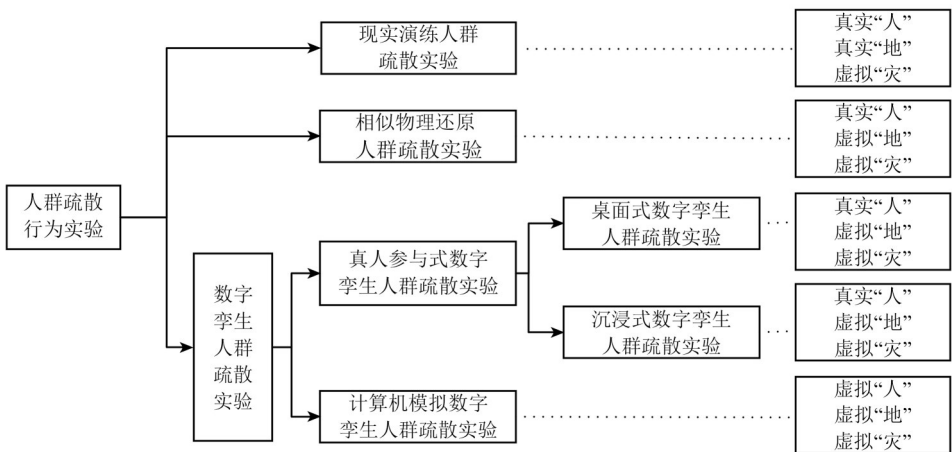


图4 人群疏散行为实验分类

Fig. 4 Classification of crowd evacuation behavior experiments

现实演练人群疏散实验指由真实人在现实场景中完成设定灾害事件的应急疏散任务。实验场景和实验人员都是真实，但设定的灾害事件为虚

拟的，如地震、火灾等应急事件。

相似物理还原人群疏散实验指由真实人在与现实相似的物理场景中完成设定灾害事件。实验

人员为真实人类，实验场景为物理搭建场景，灾害事件为虚拟。

桌面式数字孪生人群疏散实验指实验者并不是置身于孪生实验环境中，而是在屏幕上观察实验环境，实验者通过操作鼠标、键盘等输入设备完成实验任务。实验人员为真实人类，实验场景和灾害事件皆为虚拟的。这种数字孪生人群疏散实验对设备要求较低，每位实验者只需一台电脑即可参与实验，因此支持多人在线协同实验。但是该实验方式对孪生环境的体验效果较差，人群疏散行为表现较差，导致实验效果不尽如人意。实验过程中，实验者必须互相等待，实验开展困难，效果欠佳。

沉浸式数字孪生人群疏散实验，则是邀请参与者穿戴虚拟现实头盔，通过头部和身体的转向实现孪生场景中的视角移动，使用手柄等实现孪生场景中的位置移动。该实验方式中实验人员为真实人，实验场景和灾害事件为虚拟。允许实验者沉浸在孪生地理环境中，孪生场景与现实场景的高相似度可以极大地提升实验效果。但目前沉浸式虚拟现实设备价格较高，多人协同实验很难开展。并且多人协同实验对数据传输和计算效率要求较高，限制了沉浸式数字孪生人群行为实验的实验人数。

计算机模拟的数字孪生人群疏散实验则是由计算机生成的智能体在孪生地理环境中完成疏散任务的实验方式。该实验方式中实验人员、实验场景和灾害事件都是虚拟的。该类实验成本较低，

实验简便，通过修改人群模型参数适应孪生环境，即可完成过程模拟。然而，计算机生成的智能体无法完全表达现实人群行为，且已有的人群模型专题性较强。

### 3 数字孪生人群疏散实验

本文以数字孪生人群行为实验理论框架为指导，通过构建相似的人物和环境模型，在保持个体异质性的基础上，研究微观尺度的人群认知方式和疏散行为方式，为人群疏散行为模型构建和智能计算奠定基础。

本文采用真实“人”、虚拟“地”和虚拟“灾”的模式，开展真人沉浸式参与的数字孪生人群疏散实验研究，实验详细内容如下。

#### 3.1 数字孪生疏散实验环境

##### 3.1.1 实验场景

本文以北京奥林匹克公园地铁站（Olympic Park Station）为数字孪生实验物理场景。奥林匹克公园站，是北京地铁8号线和15号线的地铁车站，两线呈“L”形相交，两个车站间设置换乘通道。8号线地铁站是一座地下两层的车站，负一层为乘车层，一层为出口层，岛式站台设计，站台宽度为16 m，车站长度330 m，宽25 m。15号线车站是地下两层三跨结构，除与8号线连通层以外，负一层为出口层，负二层为乘车层，岛式站台设计，车站总长205.5 m，标准段宽度为23.3 m（图5）。

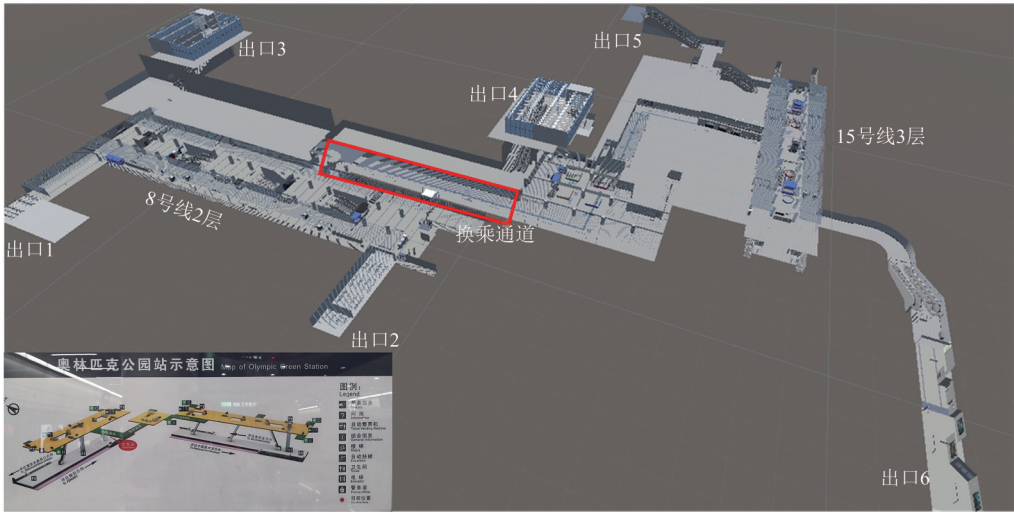


图5 奥林匹克公园地铁站空间结构  
Fig. 5 The spatial structure of the Olympic Park Station



本文利用软件3dsmax构建奥林匹克公园地铁站三维模型，该虚拟地铁站内的空间结构、标志系统、出口数量等与现实奥林匹克公园地铁站一致。选择该地铁站作为孪生疏散实验场景，是因为（1）地铁站是城市出行的重要交通方式之一，是非常典型的公共场所；（2）奥林匹克地铁站是换乘车站，人流量较大，人群行为复杂；（3）奥林匹克地铁站内空间结构复杂，指示标志多样。

奥林匹克地铁站内共有6个出口，一条换乘通道连接8号线和15号线。此外，在三维模型中建模了安检口、闸机口、围栏、隔离带、自动售票机、自动贩卖机、楼梯、自动扶梯等，还包括指示鸟巢、水立方、国家会议中心等指示地标建筑物方向的标志，以及应急疏散指示标志和功能区域指示标志。虚拟三维模型细节如图6所示。

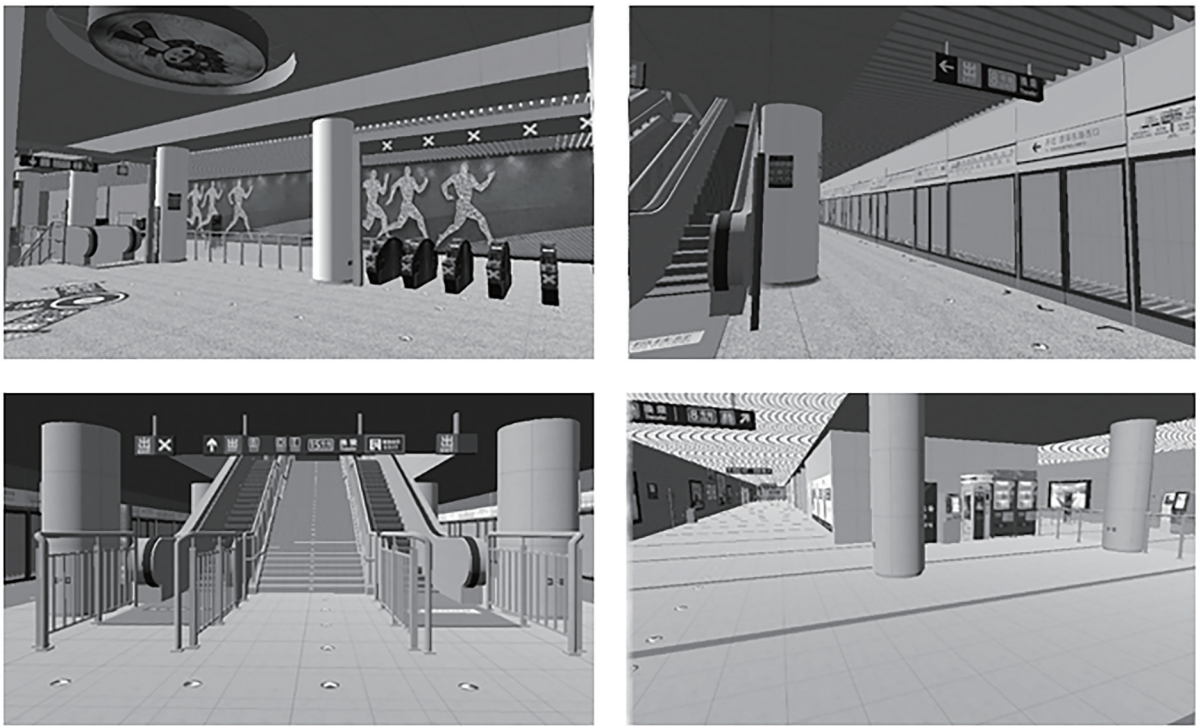


图6 奥林匹克地铁站模型  
Fig. 6 Model of the Olympic Park Station

奥林匹克公园地铁站内设置的方向指示标志具有图7所示的几种类型。包括集成文字、图案、方向信息的壁贴式疏散标志，部分壁贴式疏散标志采用电光源标志。此外，地铁站内墙壁、柱子等位置还会粘贴具有“出”和“EXIT”等文字的疏散指示标志，以及“应急救援专用通道”和“Emergency Use Only”疏散标志。这些疏散标志都指向最近的安全出口，对应急情况下人群疏散具有重要的影响。

根据GB/T 15566.4公共信息导向系统设置原则与要求，地铁站导向系统可分为进站导向、候车导向、换乘导向和出站导向。奥林匹克公园地铁站内具有出口导向信息的标志包括带有“出”、和“东南口”等文字信息的标志，以及带有出口编号和方向的标志，如“G”、“H”等。在紧急情况

下，除了基本的应急疏散指示标志系统以外，出口指示标志对疏散行为和路径选择也有重要影响。因此，本文同时也建模出口导向标志系统，考虑其对疏散行为的影响。

由于地铁站是一个公共场所，除了应急疏散标志和出口导向标志以外，还必须包括功能指示标志，指示公共设施的位置，如卫生间、电梯等。因为奥林匹克地铁站是一个换乘地铁站，站内还设置了换乘指示标志。此外，由于奥林匹克地铁站距离鸟巢、水立方等著名旅游景点较近，站内设置了许多直接指示景点位置的标志。我们认为虽然这些标志都属于导向标志，但在应急情况下这些标志对逃生出口的寻找没有辅助作用。换言之，即使在疏散过程中人群感知到这类标志的信息，也只是无效信息，对疏散行为不产生影响。

因此, 本文不考虑这类标志对疏散行为的影响, 对这类标志不进行统计分析。奥林匹克公园地铁

站内的功能标志系统如图8所示。



图7 地铁站内应急疏散指示标志类型

Fig. 7 Types of emergency evacuation sign in the subway station



图8 功能标志系统

Fig. 8 Functional sign system

### 3.1.2 实验设备

本文在奥林匹克地铁站内开展的孪生人群疏散实验采用虚拟现实头盔 HTC Vive Pro Eye, 包括一个外接式头戴设备、一个串流盒、两个手柄和两个激光定位器, 如图9所示。HTC Vive Pro Eye 视场角  $110^{\circ}$ , 刷新率 90 Hz, 注视数据输出频率 (双目) 120 Hz, 精度  $0.5^{\circ}$ — $1.1^{\circ}$ , 追踪可视角  $110^{\circ}$ 。



图9 虚拟现实头戴设备 HTC Vive Pro Eye

Fig. 9 HTC Vive Pro Eye

### 3.2 数字孪生疏散实验流程

本文开展的孪生人群疏散实验, 在开展实验之前通过微信进行志愿者报名。由于实验设备的限制, 一次疏散实验只邀请2—3人作为一个孪生群组进行实验 (图10), 图10 (a) 和 (b) 分别为真实空间和虚拟空间的第三视角, 其中图10 (b) 中展示了疏散实验中地铁换乘通道环境及虚拟群组成员形象。

实验前: 向实验者说明实验设备的穿戴方式、手柄的使用方式以及眼动校准流程。需要特别提醒实验者的是, 在孪生人群疏散实验中, 是通过手柄正上方圆盘的上下左右实现参与者在孪生空间中的自由移动, 但是在孪生场景中的转向需要依靠实验者自身转向, 避免实验者在现实环境中走动的危险问题。孪生实验前最重要的一个步骤为眼动校准, 只有校准之后才能获得实验者在孪生场景中的准确眼动数据。首先, 上下调整头盔至屏幕内的方框中; 然后, 旋转 IPD 旋钮调整两镜片之间的距离, 以符合每位实验者瞳距; 最后实验者需要跟随屏幕内部闪现的圆点进行眼动校准。完成以上步骤并成功后, 告知实验者本实验为一次孪生人群疏散实验, 实验者的目的为与同伴一起尽快找到逃生出口。在实验前我们并不要求和告知实验者需根据标志信息疏散, 所有疏散行为均由实验者自己判断和表现。通过给予实验者奖励, 来刺激实验者认真对待本次疏散实验, 例如, 保持紧张感、积极寻找安全出口等。



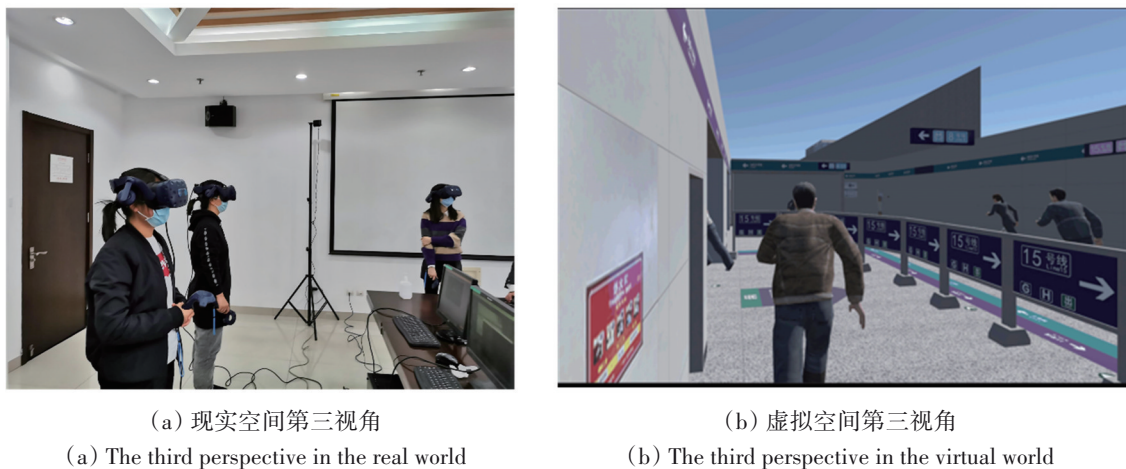


图 10 群组疏散实验

Fig. 10 Evacuation experiments of social groups

实验中：疏散实验过程中，需要保护实验者的安全，不给予实验者任何提示信息，实验者需根据自己与同伴的判断和选择寻找逃生出口，实验同伴之间允许通过语言进行信息交流。

实验后：实验结束后，先帮助实验者脱下头盔，让实验者在椅子上休息几分钟，避免晕眩等不适反应。最后，给参与者分发实验奖品，并对参与者表示感谢。

为了增加实验饱和度，我们在实验场景中设置3个初始位置，分别为 position 1，position 2 和 position 3，实验者需从3个初始位置分别开展孪生疏散实验（图11）。由于整个实验场景较大，3个初始位置距离较远，可以排除场景熟悉度造成的实验干扰性。在实验结束时，如果实验者并未根据环境信息判断逃生路径，而是凭借前一次的疏散实验记忆，则实验数据无效。否则，均视为有效数据。

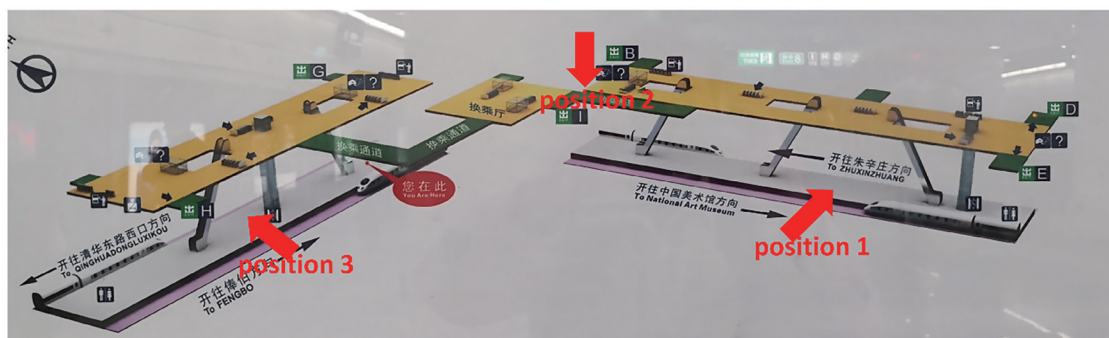


图 11 实验的3个初始位置

Fig. 11 Three initial positions of experiments

本文在实验的3个初始位置 position 1、position 2 和 position 3，分别开展了18组、17组、16组2人群组疏散实验，每个初始位置12组3人群组疏散实验。一共开展87组群组疏散实验，其中2人群组实验51组，3人群组实验36组。实验可获得的数据包括群组ID、群组成员ID，时间戳、头部方向数据、行人位置数据、眼动注视点数据，其中头部方向数据、人群位置数据和眼动注视点数据为空间三维坐标点。

## 4 数字孪生人群疏散实验数据与分析

### 4.1 人群空间结构特征

#### 4.1.1 群组空间结构特征

为了研究群组结构对疏散行为的影响，本文分别对两种类型群组疏散过程中的相对位置进行可视化，如图12所示。从图12(a)中可以看出，



3人群组在逃生过程中表现出较强的群组性, 群组成员在空间结构上具有一定的紧凑性。且群组在逃生路线上呈现的空间结构, 与 (Moussaïd 等, 2010) 研究结果相似。从图 12 (b) 中可以看出, 2人群组在空间结构上一直保持着一个相对稳定的

距离, 这与非应急状况下相同。以上结果表明, 群组在应急疏散状况下也具有稳定的空间结构, 群组成员间保持一定紧凑性。该结果对群组疏散空间结构建模具有重要意义。

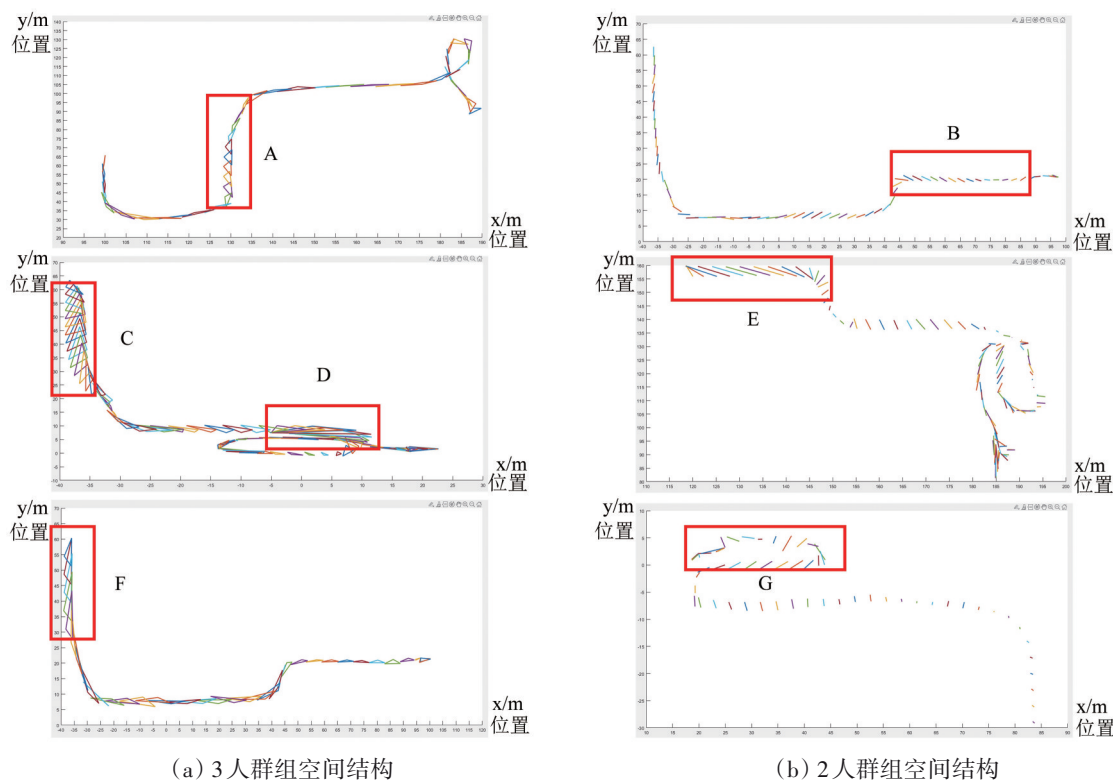


图 12 虚拟实验中的群组空间结构,  $x$  和  $y$  为平面位置, 三角形和线段分别为 3 人群组成员和两人群组成员之间的连线  
Fig. 12 Group spatial structure in virtual experiments,  $x$  and  $y$  are the plane positions, triangles and line segments represent the connections between members of a three person group and members of a two person group, respectively

例如图 12 区域 A 中 3 人群组在通道内保持稳定的三角结构, 而区域 B 内两人群组保持稳定的相对距离。从区域 C-G 可以看出群组在这些区域内结构变化较大, 经分析发现这些区域是扶梯或楼梯, 群组成员在该特殊位置的行为与平面通道上不同。这与处于该区域的群组成员目标更明确有关, 群组成员期望尽快通过该危险区域再等待其他成员, 此时在行走速度与群组交流的平衡中更偏向于行走速度。

总的来说, 即便是在应急状况下, (1) 群组依然保持着空间紧凑性, 表明群组成员拥有期望一同寻找安全出口逃生的意愿, 这种意愿对人群疏散行为具有重大影响。(2) 在空旷逃生通道内, 群组成员保持稳定的空间结构, 3 人群组形成 V 型结构, 两人群组形成“side by side”结构。(3) 群组

在楼梯、扶梯等特殊区域内的空间结构变化较大, 具有提高行走速度尽快通过该区域优先于保持群组空间结构的倾向。

#### 4.1.2 群组成员间夹角特征

为了定量分析群组疏散的空间结构, 我们统计了疏散过程中群组成员面向方向与其他成员间夹角 (图 13), 结果显示绝大多数夹角在  $60^\circ$  以内, 由于人眼左右对称即人的可视范围为  $120^\circ$ , 该结果与 Mehdi Moussaïd 等 (2010) 的研究结果一致。当面向方向与其他成员间夹角大于  $60^\circ$  时, 表示其他成员不在该成员可视范围内。当夹角为  $180^\circ$  时, 表示该行人与群组成员间在面向方向上形成一前一后的空间结构。总体来说, 行人在逃生过程中依然保持群组内其他成员在可视范围内, 在一些特殊区域如楼梯、扶梯等, 群组成员间夹角变大。

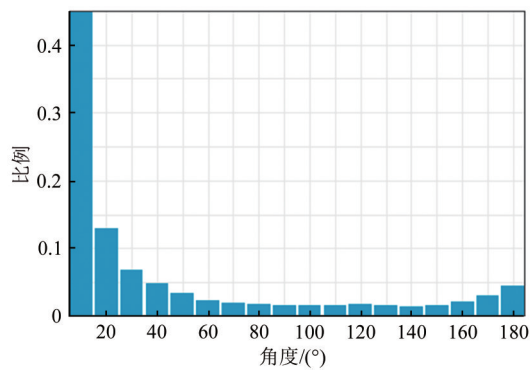


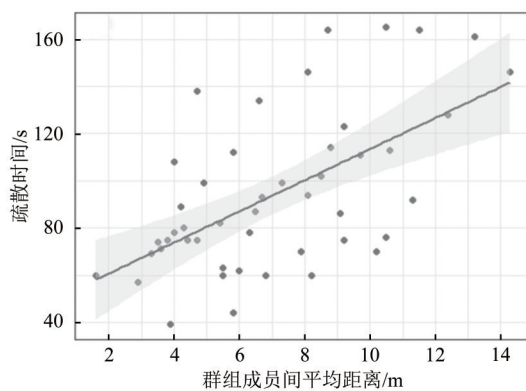
图13 行人面向方向与群组其他成员间夹角

Fig. 13 The angle between the evacuee's facing direction and other members of the same social group

#### 4.1.3 群组成员间距离特征

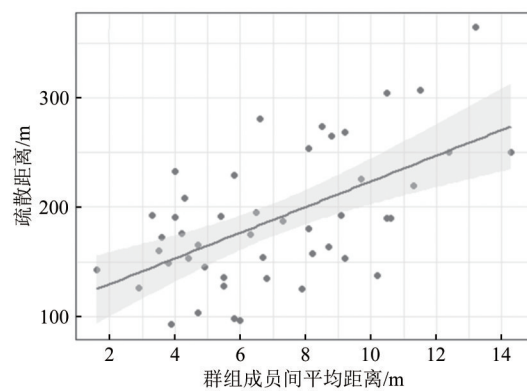
从疏散过程中群组的结构表明群组成员间保持稳定的间距。为了分析群组结构对群组疏

散时间和疏散距离之间的影响，本文统计了群组成员间平均距离与群组整体疏散时间及疏散距离的关系（图14）。图14（a）展示了成员间平均距离与群组疏散时间的关联关系，可以看出两者呈正相关，即疏散时间随成员间平均距离的增大而增大。拟合直线为 $y=47.483+6.594x$ ， $x$ 表示群组成员间平均距离， $y$ 表示该群组的疏散时间。 $R^2=0.3372$ ， $p=1.122E-05$ ，表明两者拟合效果较好。图14（b）表明群组疏散距离与群组成员间平均距离同样呈正相关，拟合直线为 $y=106.130+11.732x$ ， $x$ 表示群组成员间平均距离， $y$ 表示该群组的疏散距离。 $R^2=0.03184$ ， $p=2.158E-05$ ，表示两者拟合效果较好。以上结果表明，群组成员之间距离越大，整个群组的疏散时间和所需的疏散路程越大。这说明，群组保持空间紧凑性有利于提高疏散效率。



(a) 群组成员间平均距离与整体疏散时间的关系

(a) The relationship between the average distance among group members with the overall evacuation time



(b) 群组成员间平均距离与整体疏散距离的关系

(b) The relationship between the average distance among group members with the overall evacuation distance

图14 群组成员间平均距离与疏散时间和距离关系

Fig. 14 The relationship between the average distance among group members with the evacuation time and distance

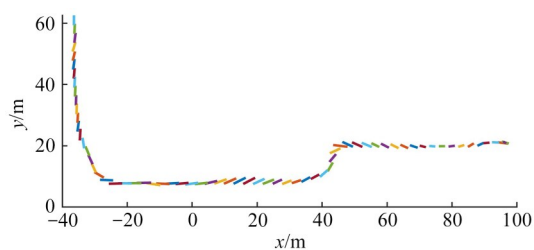
#### 4.1.4 群组信息扩散特征

在疏散实验过程中，我们会观察和记录实验者如何分享场景感知信息的行为。几乎所有群组实验者在疏散过程中，都会通过语言交流与同伴商讨和分享疏散路径信息，例如“选择H出口”、“往左边走”等等。实验发现，当群组中的一个成员获取场景确定的出口信息后，则会立即告知群组中的其他成员，多数群组成员在听到同伴告知的信息后选择跟随。这种群组内部的信息扩散行为，降低了群组感知出口信息的平均时间，提升了群组整体的疏散效率。

## 4.2 人群疏散行为特征

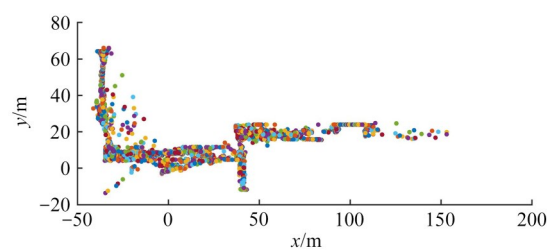
#### 4.2.1 群组疏散轨迹数据分析

群组感知场景信息对群组疏散行为有重要影响作用。本文分析群组疏散轨迹与眼动注视点轨迹（图15）发现，群组在疏散轨迹周围分布了大量眼动注视点，表明群组在疏散过程中不断观察周围场景信息。而且，从眼动数据的分布可以看出，无论在宽敞的通道内还是在狭窄的扶梯、楼梯区域，都有较多的眼动注视点，本文从眼动点数据探究群组疏散轨迹数据的特征，以期发现群组感知行为对疏散行为的影响。



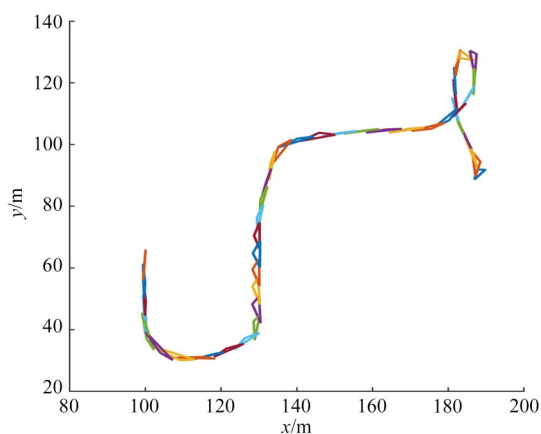
(a) 2人群组疏散轨迹

(a) The evacuation trajectories of a social group with two members



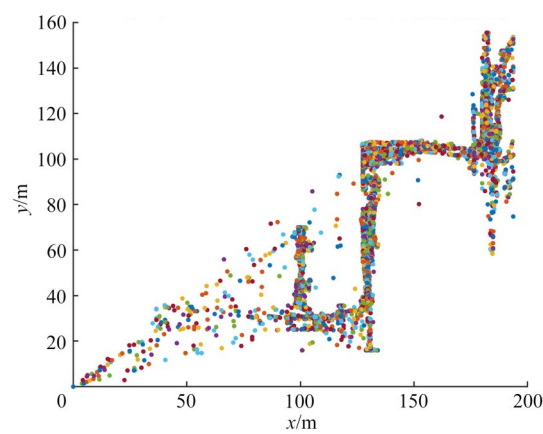
(b) 2人群组眼动轨迹

(b) The eye tracking points' trajectories of a social group with two members



(c) 3人群组疏散轨迹

(c) The evacuation trajectories of a social group with three members



(d) 3人群组眼动轨迹

(d) The eye tracking points' trajectories of a social group with three members

图15 群组疏散轨迹与眼动点轨迹, x和y为群组成员的疏散轨迹和眼动轨迹位置

Fig. 15 Group trajectories and eye tracking points' trajectories, x and y represent the locations of evacuation trajectories and eye tracking points' trajectories of group members

除了每个群组在疏散路径上的空间结构及眼动数据分布, 本文还将所有群组的疏散轨迹进行可视分析, 如图16所示。图16(a)中的群组选择出口1—3, 图16(b)中的群组选择了出口2—4和出口6, 图16(c)中的群组选择了出口4—6。从群组所在初始位置和群组选择的逃生出口来看, 实验中群组绝大部分选择了距离较近的出口逃生。只有在初始位置2时, 部分群组选择了距离较远的出口6(图16(b))。初始位置2在8号线与15号线的换乘通道内, 两边都有较近的出口。但选择出口6逃生的群组需从所处初始位置乘扶梯通往15号线负一层, 经过一条较长的通道达到出口6。这种现象表明从初始位置2开始逃生的部分群组, 感知到场景中出口6的信息, 说明了从初始位置2至出口6的路途中存在不合理的场景信息, 引导群组选择了距离较远的出口, 且由于4号出口处于行进路线的反方向而被错过, 极大地增加了逃生时间。此外, 在图16(a)中红色框选区域内, 存在

行人进入初始位置2所在的换乘通道内后回头的行为。上述不合理行为是由于行人没有感知到正确的标志或者受到低效指示标志的影响。

#### 4.2.2 群组疏散眼动数据分析

本文将3个初始位置疏散群组的眼动数据进行可视分析。图17展示了眼动数据三视图, 分别用3个颜色区分3个初始位置的眼动注视点分布。从侧视图17(a)可以看出群组成员在疏散过程中的注视点在地面、墙壁及天花板等都有分布。从俯视图17(c)中眼动数据的分布可看出不同初始位置群组的疏散范围分布较广。总的来说, 群组在疏散过程中与环境有较多的信息交互, 人群疏散行为受感知信息的影响。因此, 构建群组感知行为对于孪生人群疏散模拟必不可少。

图18通过热力图对疏散过程中的眼动注视点数据进行分析。图18(a)和图18(b)分别为初始位置1和2的疏散人群眼动轨迹热力图。A、B



区域为实验场景中的柱子,可以看出柱子所在位置的热力值较高,说明人群观察柱子上的标志信息较多。C-E等3个区域为地铁站进出口闸机,闸机附近的眼动热力值较高,经过分析,这是由于人群在闸机口拥堵使得眼动点不断叠加造成,而不是人群期望从闸机上感知方向信息。F-H这类出口区域的眼动热力值同样也较高,其中F出口附近墙面的高热值表示疏散人群在该区域寻找方向标志信息需求较大,而G和H出口的热力值较大主要是因为疏散拥挤导致的眼动数据叠加。除了以上热力值较高的区域以外,图18(a)中还存在区域I的热力值相对较高,表明人群逃生过程中在这个区域寻找场景信息的需求较高。从初始位

置2开始的人群眼动热力图同样显示了上述几个重点区域的现象,但初始位置2开始疏散的人群在换乘通道内的眼动热力值较高,并且眼动点主要分布在地面上。结合现实场景情况分析,主要是由于换乘通道内的墙面上设置了换乘标志和少量的壁贴式应急疏散指示标志,没有提供给疏散人群足够的逃生出口信息。且由于换乘通道内的应急疏散指示标志存在两个指示方向,一部分指向15号线,一部分指向8号线,容易造成混淆和犹豫。这两个方面共同作用造成了换乘通道内的眼动热力值较高,表明疏散人群寻找方向信息的需求较高,说明该区域的方向指示可能存在问题。

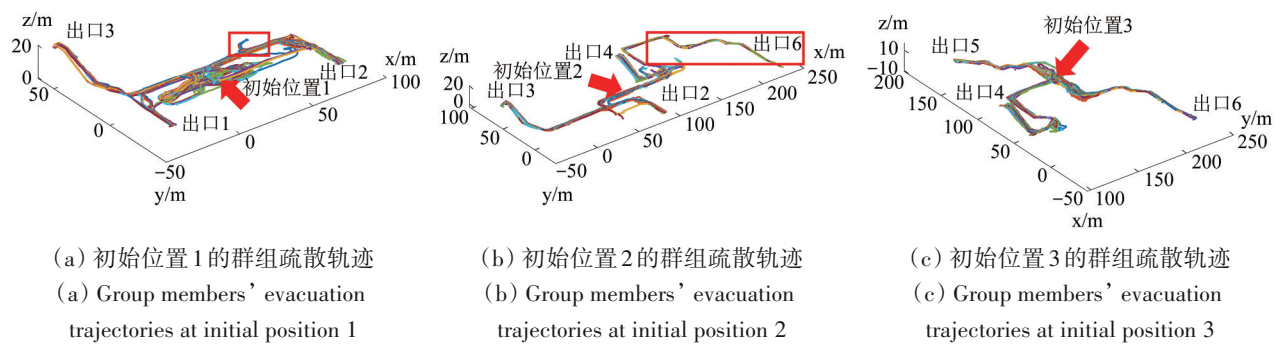


图16 3个不同初始位置的群组疏散轨迹,  $x$ 、 $y$ 和 $z$ 为群组成员疏散轨迹的空间位置

Fig. 16 Group members' evacuation trajectories at three different initial positions,  $x$ ,  $y$ , and  $z$  are the spatial locations of the evacuation trajectories of group members

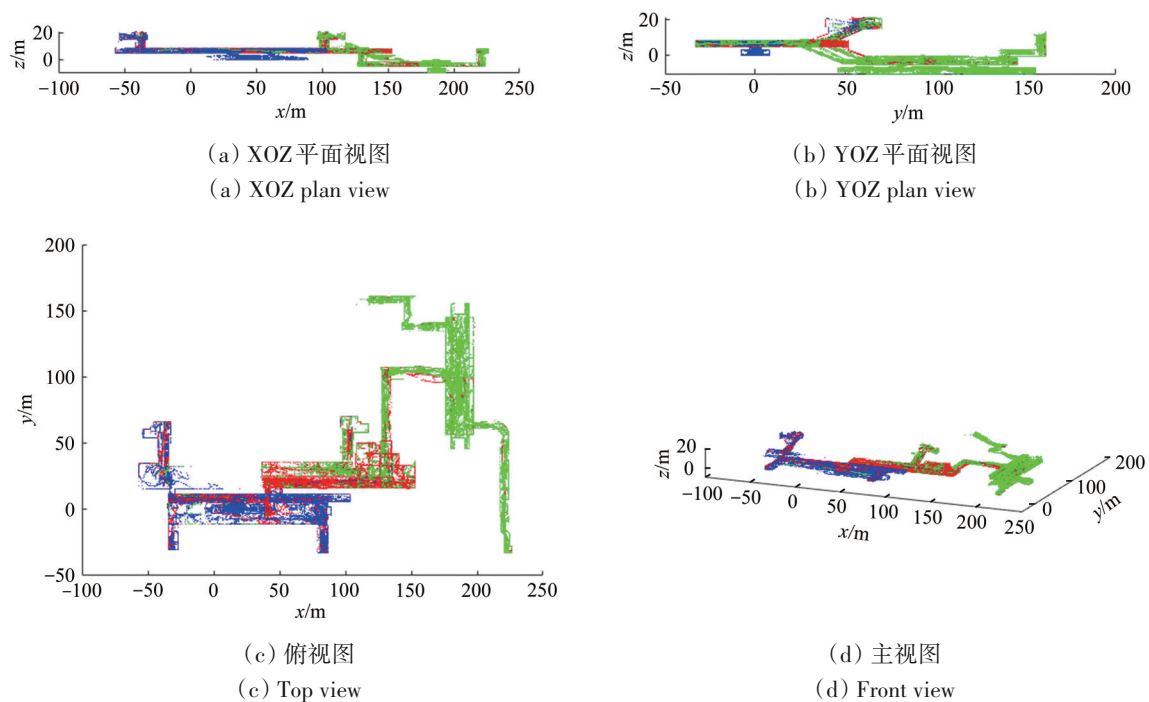


图17 眼动点轨迹多视图

Fig. 17 Multiple views of eye tracking points' trajectories

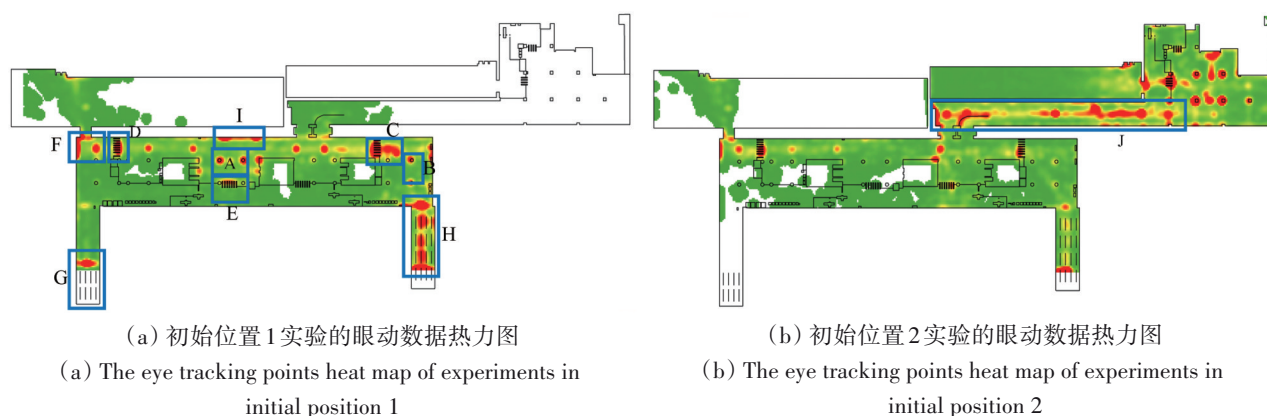


图18 眼动数据热力图

Fig. 18 The heat map of eye tracking data

### 4.2.3 地铁指示标志感知分析

本文认为群组对成员独立感知行为无影响,因此在统计感知参数时不考虑群组差异,将每个成员的实验数据作为独立的一份感知数据使用。

实验一共采集了207份有效感知数据,用于统计标志感知角度。地铁站内悬挂导向标志感知角度阈值统计如图19所示。

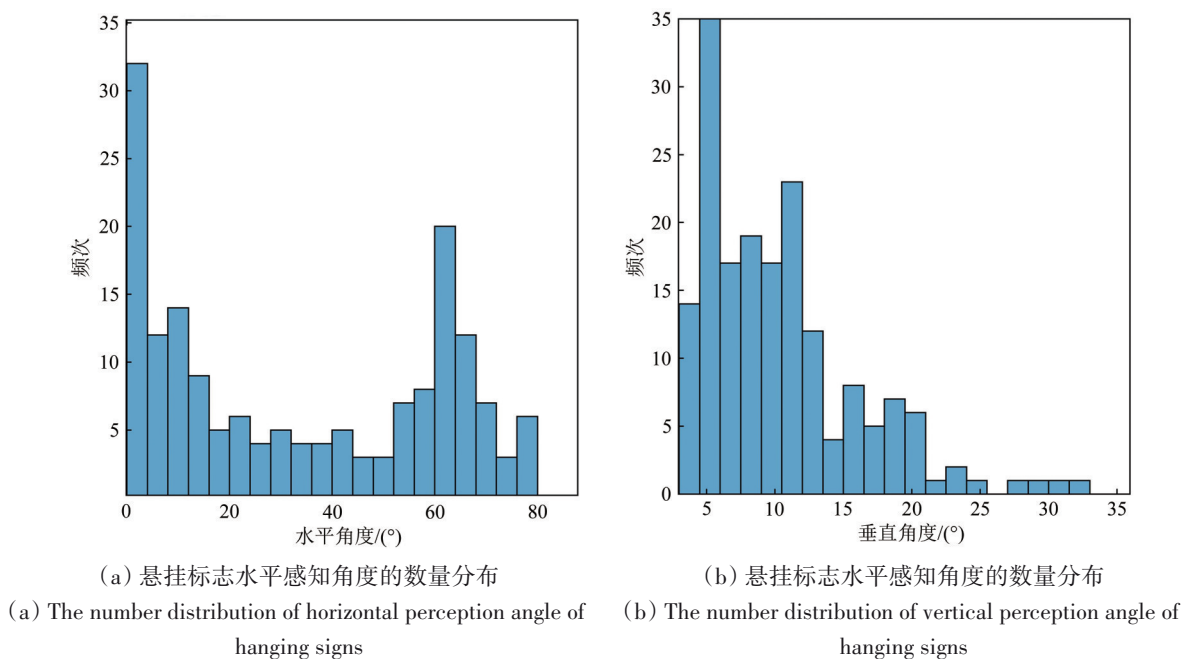


图19 地铁站内悬挂标志感知角度

Fig. 19 Perception angle of hanging signs in the subway station

图19(a)统计了悬挂导向标志感知的水平角度,可以看出水平感知范围在 $[0, 80^\circ]$ ,水平角度接近 $0^\circ$ 表示逃生行人正对导向标志,此时感知率较高。图19(b)展示了悬挂标志感知的垂直角度范围,约为 $[0, 30^\circ]$ ,悬挂标志的水平感知范围大约在 $60^\circ$ 的位置出现了一个峰值。且地铁站内垂直感知角度在低角度区域,也就是 $[0, 15^\circ]$ 有不少逃生者感知到了悬挂出口导向标志,主要是因

为地铁站内空间相对宽阔,行人视野开阔。综上所述,在地铁站内悬挂出口导向标志的水平感知角度约为 $[0, 80^\circ]$ ,垂直感知角度约为 $[0, 30^\circ]$ 。

## 5 结论

“数字孪生”、“元宇宙”等概念的提出为人群行为模拟领域提供了新的数据获取思路。本文基于数字孪生应用的思考,提出了数字孪生人群行

为实验理论框架,从基本理论、基本原则等方面总结了数字孪生人群行为实验特征,给出人群行为实验的数字孪生完整过程,并进一步提出数字孪生人群疏散实验研究内容及分类。基于该理论框架,借助虚拟现实设备开展地铁站内的孪生群组协同疏散实验,根据实验数据定性和定量地分析群组空间结构特征和疏散行为特征。

结果表明,群组成员在疏散过程中呈现出V型和“side by side”结构,在扶梯这类特殊区域中群组的空间结构有较大的变动,该结果与已发表的研究成果一致,证明了数字孪生人群疏散实验可获取反映现实疏散情况的有效疏散数据;疏散个体面向方向与其他群组成员间的夹角小于 $60^\circ$ ,表明群组成员在疏散个体的 $120^\circ$ 视角范围内;群组成员间的较小间距和信息扩散交互可以大大提高疏散效率。此外,分析孪生场景中的疏散轨迹和眼动轨迹得出疏散人群在柱子、出口、换乘通道等位置与环境交互较多,表明疏散人群在这些位置期望得到方向信息的需求较大。

本文的研究内容目前只涉及到孪生环境和人物构建、借助虚拟现实设备等开展孪生人群行为实验、以及实验数据的分析和挖掘。然而,完整的数字孪生人群行为实验还应包括人群行为模型构建,以及孪生环境模拟结果反作用于现实环境和人群行为,继而形成一个完整的闭环。这些研究内容将是下一个阶段的研究重点。

**志 谢** 此次数字孪生人群疏散实验得到了中国科学院空天信息创新研究院职工与学生的支持,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- Arias S, La Mendola S, Wahlqvist J, Rios O, Nilsson D and Ronchi E. 2019. Virtual reality evacuation experiments on way-finding systems for the future circular collider. *Fire Technology*, 55(6): 2319-2340 [DOI: 10.1007/s10694-019-00868-y]
- Bai H, Yang S, Feng X J, Song X M and Dong S F. 2021. Simulation research on passenger flow evacuation in rail transit station based on BIM-VR. *Urban Rapid Rail Transit*, 34(5): 60-65 (白寒, 杨帅, 冯旭杰, 宋晓敏, 董守放. 2021. 基于BIM-VR的轨道交通车站客流疏散仿真研究. *都市快轨交通*, 34(5): 60-65) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-6073.2021.05.010]
- Bernardes S M F, Rebelo F, Vilar E, Noriega P and Borges T. 2015. Methodological approaches for use virtual reality to develop emergency evacuation simulations for training, in emergency situations. *Procedia Manufacturing*, 3: 6313-6320 [DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.946]
- Cao L J, Lin J and Li N. 2019. A virtual reality based study of indoor fire evacuation after active or passive spatial exploration. *Computers in Human Behavior*, 90: 37-45 [DOI: 10.1016/j.chb.2018.08.041]
- Feng Z N, González V A, Amor R, Lovreglio R and Cabrera-Guerrero G. 2018. Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: a systematic literature review. *Computers and Education*, 127: 252-266 [DOI: 10.1016/j.compedu.2018.09.002]
- Guo Y K, Zhu J, Wang Y, Chai J C, Li W L, Fu L, Xu B L and Gong Y H. 2020. A virtual reality simulation method for crowd evacuation in a multiexit indoor fire environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12): 750 [DOI: 10.3390/ijgi9120750]
- Hu M and Liu B W. 2018. VR-based tunnel fire evacuation commander training system. *China Safety Science Journal*, 28(5): 185-190 (胡珉, 刘斌雯. 2018. 基于VR的隧道火灾疏散指挥训练系统. *中国安全科学学报*, 28(5): 185-190) [DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.05.031]
- Huang L, Gong J H, Li W H, Xu T, Shen S, Liang J M, Feng Q L, Zhang D and Sun J. 2018. Social force model-based group behavior simulation in virtual geographic environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2): 79 [DOI: 10.3390/ijgi7020079]
- Huang L, Gong J H and Li W H. 2021. A perception model for optimizing and evaluating evacuation guidance systems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2): 54 [DOI: 10.3390/ijgi10020054]
- Li R F, Dong S F, Wang Z J and Wang A L. 2021. Research and implementation of metro emergency evacuation simulation system based on VR. *Railway Computer Application*, 30(6): 68-73 (李润法, 董守放, 王子甲, 王爱丽. 2021. 基于VR的地铁应急疏散仿真系统研究与实现. *铁路计算机应用*, 30(6): 68-73) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-8451.2021.06.014]
- Li W H, Gong J H, Huang L and Ma H N. 2024. Digital twins of micro crowd: The concept, framework, and methods. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(5): 1295-1313 (李文航, 龚建华, 黄琳, 马浩男. 2024. 微观人群数字孪生的概念、框架与研究方法. *遥感学报*, 28(5): 1295-1313) [DOI: 10.11834/jrs.20232618]
- Lin J, Zhu R H, Li N and Becerik-Gerber B. 2020. Do people follow the crowd in building emergency evacuation? A cross-cultural immersive virtual reality-based study. *Advanced Engineering Informatics*, 43: 101040 [DOI: 10.1016/j.aei.2020.101040]
- Lovreglio R, Dillies E, Kuligowski E, Rahouti A and Haghani M. 2021. Investigating exit choice in built environment evacuation combining immersive virtual reality and discrete choice modelling. *arXiv: 2110.11577* [DOI: 10.48550/arXiv.2110.11577]
- Ma X H, Zhou J P, Gong J H, Huang L, Li W H and Zou Y L. 2019. VR eye-tracking perception experiment and layout evaluation for indoor emergency evacuation signs. *Journal of Geo-Information Science*, 21(8): 1170-1182 (马晓辉, 周洁萍, 龚建华, 黄琳, 李文航, 邹宇玲. 2019. 面向室内应急疏散标识的VR眼动感知实验与



- 布局评估. 地球信息科学学报, 21(8): 1170-1182) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180572]
- Moussaïd M, Perozo N, Garnier S, Helbing D and Theraulaz G. 2010. The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. PLoS ONE, 5(4): e10047 [DOI: 10.1371/journal.pone.0010047]
- Snopková D, Ugwitz P, Stachoň Z, Hladík J, Juřík V, Kvarda O and Kubiček P. 2022. Retracing evacuation strategy: a virtual reality game-based investigation into the influence of building's spatial configuration in an emergency. Spatial Cognition and Computation, 22(1/2): 30-50 [DOI: 10.1080/13875868.2021.1913497]
- Wang Y, Zhang J B, Zhu J and Zhang Y C. 2023. VR simulation method for emergency evacuation in subway station fire based on improved social force model. Journal of Safety Science and Technology, 19(5): 194-201 (王勇, 张锦彬, 朱军, 张玉春. 2023. 基于改进社会力模型的地铁站火灾应急疏散VR模拟方法. 中国安全生产科学技术, 19(5): 194-201) [DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.05.027]
- Wang Z W, Ma W B and Wang Z H. 2022a. Development and application of immersive evacuation drill system for underground high speed railway station based on BIM and VR technology. Railway Engineering, 62(9): 131-135, 140 (王志伟, 马伟斌, 王子洪. 2022a. 基于BIM和VR技术的地下高速铁路车站沉浸式疏散演练系统开发与应用. 铁道建筑, 62(9): 131-135, 140) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2022.09.27]
- Wang Z W, Ma W B, Yu J J and Guan G S. 2022b. Key technologies for evacuation drill scene construction of immersive underground high speed railway station based on BIM+VR. Railway Engineering, 62(12): 153-157 (王志伟, 马伟斌, 于进江, 关根锁. 2022b. 基于BIM+VR的沉浸式地下高速铁路车站疏散演练场景构建关键技术. 铁道建筑, 62(12): 153-157) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2022.12.30]
- Zhang D, Gong J H, Li W H, Yi Z H, Shen S and Huang L. 2019. A comparative analysis of virtual and real trajectories of social groups. Geography and Geo-Information Science, 35(3): 21-27 (张冬, 龚建华, 李文航, 易正晖, 申申, 黄琳. 2019. 人群群组虚实活动轨迹的对比分析. 地理与地理信息科学, 35(3): 21-27) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2019.03.004]
- Zhang F, Hu M Y, Che W T, Lin H and Fang C Y. 2018. Framework for virtual cognitive experiment in virtual geographic environments. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(1): 36 [DOI: 10.3390/ijgi7010036]
- Zhang L. 2021. Evacuation simulation method of large space cabin under 3D VR technology. Ship Science and Technology, 43(22): 10-12 (张莉. 2021. 三维VR技术下舰船大空间舱室疏散模拟方法. 舰船科学技术, 43(22): 10-12) [DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.11A.004]
- Zhang L, Zhu G Q and Guo D G. 2015. Study on fire escape training system base on VR. Fire Science and Technology, 34(4): 526-529 (张磊, 朱国庆, 郭大刚. 2015. 基于VR的公共建筑火灾逃生训练系统研究. 消防科学与技术, 34(4): 526-529) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2015.04.032]
- Zhang M, Ke J J, Tong L Y and Luo X W. 2021. Investigating the influence of route turning angle on compliance behaviors and evacuation performance in a virtual-reality-based experiment. Advanced Engineering Informatics, 48: 101259 [DOI: 10.1016/j.aei.2021.101259]

## Social groups' spatio-temporal behavior characteristics analysis in subway evacuation process based on VR digital twin experiments

HUANG Lin<sup>1</sup>, LI Wenhang<sup>1</sup>, GONG Jianhua<sup>1,2</sup>, MA Haonan<sup>1,2</sup>, HU Mengyu<sup>1,2</sup>

1. National Engineering Research Center for Geomatics, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

**Abstract:** The concepts of “digital twin” and “meta-universe” provide new ideas for the field of crowd behavior simulation. Using digital twin methods to conduct crowd behavior experiments to obtain data and then researching on human spatial and temporal behavior in specific scenarios have become important directions in the field of crowd simulation and indoor GIS research. Digital twin crowd behavior experiment is an innovative geographical experiment to explore crowd behavior, geographical phenomena and processes, and human-geography relationship in a real geographical environment. This paper proposes a theoretical framework for conducting digital twin experiments on crowd behavior from experimental purpose, object, process, evaluation, and results and analysis. The framework summarizes the basic theories, including geographic cognitive, similarity, scale, complexity problem, and geographic intelligence simulation theories. We also summarize the experimental principles of digital twin crowd behavior, such as experimental similarity, collaboration and heterogeneity, and standardization and normalization. Furthermore, we propose the content and classification of experiments on digital twin crowd evacuation. On the basis of this theoretical framework, a VR-based social group evacuation digital twin experiment is conducted in the Olympic Park Station. The spatial structure and evacuation behavior of social groups are qualitatively and quantitatively analyzed using experimental data. We evaluate the spatial structure characteristics of two- and three-member social groups, the characteristics of the angle

and distance between social group members, the information diffusion way within social group members, and the evacuation and eye-tracking point trajectories of social groups. Results show that during the evacuation process, social group members exhibit V and “side-by-side” structures. They maintain a compact spatial structure in an emergency, indicating that group members have the desire to find a safe exit together, and this willingness has a crucial effect on crowd evacuation behavior. In some special areas such as stairs and escalators, the spatial structures of social groups have significant changes. They show a tendency to improve the walking speed through these areas as soon as possible rather than to maintain the compact spatial structures. The angle between the facing direction of an evacuee and that of other social group members is less than  $60^\circ$ , and smaller distances and information diffusion interactions among social group members significantly improve the evacuation efficiency. The analysis of the evacuation and eye-tracking point trajectories in the digital twin scenario reveals that the evacuating crowd interacts considerably with pillars, exits, and transfer channels, indicating a great need for direction information in these areas. Optimizing an evacuation sign system in these key areas can greatly improve the evacuation efficiency. The above findings on crowd behavior are of great significance to crowd behavior modeling, and the digital twin experiment results can identify bottleneck areas in the subway station selected in this study, providing optimization suggestions for layout design and emergency plans. The ability of subway station managers to predict and respond to emergencies can be further strengthened. The results of this study have important practical application value to reduce personal and property losses in disaster events.

**Key words:** remote sensing, digital twin, crowd behavior experiment, subway evacuation, social groups, interactive behavior

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No.2020YFC0833103); National Natural Science Foundation of China (No. 41971361); Pilot Fund of Frontier Science and Disruptive Technology of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences (No. E0Z211010F)