

引文格式:龚建华,李文航,张国永,等.增强地理环境中过程可视化方法——以人群疏散模拟为例[J].测绘学报,2018,47(8):1089-1097. DOI:10.11947/j.AGCS.2018.20180111.  
GONG Jianhua, LI Wenhong, ZHANG Guoyong, et al. An Augmented Geographic Environment for Geo-process Visualization—A Case of Crowd Evacuation Simulation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(8): 1089-1097. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20180111.

## 增强地理环境中过程可视化方法——以人群疏散模拟为例

龚建华<sup>1,3</sup>, 李文航<sup>1</sup>, 张国永<sup>1,2</sup>, 申 申<sup>1,2</sup>, 黄 琳<sup>1,2</sup>, 孙 廪<sup>1,3</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100012; 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, 浙江 嘉兴 314199

## An Augmented Geographic Environment for Geo-process Visualization—A Case of Crowd Evacuation Simulation

GONG Jianhua<sup>1,3</sup>, LI Wenhong<sup>1</sup>, ZHANG Guoyong<sup>1,2</sup>, SHEN Shen<sup>1,2</sup>, HUANG Lin<sup>1,2</sup>, SUN Jun<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhejiang-CAS Application Center for Geoinformatics, Jiaxing 314199, China

**Abstract:** Combining with the development of augmented reality (AR) technology, this paper proposed a conceptual framework about augmented geographic environment (AGE) based on the development of virtual geographic environments (VGE). Key computing and visualization technologies of the fusion of virtual geographic process and 3D printing realistic model, including the coordinate matching technology of virtual geospatial space and real geographical space and the technology of occlusion processing, are investigated. In the case of crowd evacuation, we implemented a prototype system for crowd evacuation simulation based on the AGE. Then we proved the novelty of the AGE by systematic testing and document investigation. We believe that the AGE is one of the future development of VGE.

**Key words:** augmented geographic environments; virtual geographic environments; augmented reality; virtual reality; crowd evacuation simulation; visualization

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371387; 41571393); The Pre-research Project of Equipment Development Department (No. 315050501); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA19080101)

**摘 要:**结合增强现实技术的发展,在虚拟地理环境发展的基础上,提出了“增强地理环境”的概念和虚实融合框架;主要研究了虚拟地理过程与三维打印模型沙盘融合的关键计算与可视化技术,具体包括虚拟地理空间与现实地理空间的坐标匹配、遮挡处理等算法,并以学校火灾人群疏散为案例,实现了人群疏散模拟虚实融合的增强地理环境可视化原型系统。通过系统测试和人员体验调查统计分析,证明了增强地理环境可视化技术的可行性和人群疏散模拟应用交互展示的创新性。

**关键词:**增强地理环境;虚拟地理环境;增强现实;虚拟现实;人群疏散模拟;可视化

**中图分类号:**P208 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1595(2018)08-1089-09

**基金项目:**国家自然科学基金(41371387;41571393);装备发展部预研项目(315050501);中国科学院战略性先导科技专项(A类)地球大数据科学工程(XDA19080101)

虚拟地理环境(virtual geographic environments, VGE)从 1997—1998 年提出以后,经过近 20 年的发展,基本形成了比较系统的概念理论和方法

技术体系<sup>[1-4]</sup>。随着 2016 年以来新一波消费级虚拟现实(virtual reality, VR)技术的发展,尤其是增强现实(augmented reality, AR)技术设备如

HoloLens、智能手机 iPhone X 等的出现,为虚拟地理环境的未来发展提供了全新的发展机遇<sup>[5-9]</sup>。AR 技术能够同时可视化真实世界和虚拟世界中的信息,并将两种信息补充、叠加和融合,从而达到超越现实的感官体验<sup>[10-15]</sup>。相比 VR 技术而言,AR 可视化方法在适应现实、保留现实的基础上,能够实现选择性信息化增强<sup>[16-18]</sup>,在观察交互虚拟信息的同时又能看到现实世界,不容易产生晕眩,用户体验好,同时降低了技术应用的时间成本和制作成本<sup>[7,19-21]</sup>。早期的学者已经在 AR 结合 GIS 的可行性方面作了较为深入的探讨<sup>[22-23]</sup>,而对更高发展阶段的 VGE 而言,本文将结合 AR 技术,考虑虚拟地理环境与现实环境的相互虚实关系,提出并探索发展增强地理环境概念的可能性。

地理过程建模是虚拟地理环境建模中的一个重要内容<sup>[24]</sup>。人群模拟,既是研究微观地理环境下人-地相互动态关系、人群心理和行为等的重要虚拟地理试验方法<sup>[25]</sup>,又对现实应急演练和安全教育等具有重要的应用价值。人群疏散行为模拟,包括微观地理场景建模、事件建模、行为动力学过程建模及过程可视化等。本文则主要讨论人群模拟数据的过程可视化技术。目前,人群模拟领域中有多种对人群行为的可视化方式,例如,将人表示成实心圆<sup>[26]</sup>、椭圆<sup>[27]</sup>或三角形<sup>[28]</sup>,但是该方式可以简单模拟出人的行为轨迹,但往往不够生动,不能满足人们对可视化效果的需求。随着三维建模、可视化与 VR 技术的发展,利用三维人物模型在三维虚拟场景中进行模拟成为人群模拟的主流可视化方式<sup>[29-30]</sup>。同时,三维打印技术与上述所说的 AR 技术发展,则给虚实叠加融合的人群疏散可视化提供了一种新的可能方式。因此,本文首先提出增强地理环境的概念及理论框架,然后以人群疏散过程模拟为案例,探索增强地理环境中的虚实融合及时空可视化方法。

## 1 增强地理环境概念与虚实融合框架

增强地理环境(augmented geographic environments, AGE)是虚实地理空间、虚实地理对象和虚实地理过程等集成融合的人机交互环境(图 1)。现实地理环境和现实空间中的地理对象、地理过程经过相似性原理为基础的地理抽象,将现实世界数字化和地理原理、规律、准则等形式化,构建数值化、可感知交互的虚拟地理环境;并

且在虚拟地理环境中,虚拟地理对象在虚拟地理模型为主要驱动力的相互作用下,以虚拟地理环境为空间边界,通过数值模拟、地理计算、真人虚拟参与等,形成虚拟地理过程。由于虚拟地理环境和现实环境在坐标系统、时空尺度、地理规律等具有相似性、匹配性和映射转换性,因此具有虚实融合的内在数学基础。

这里需要指出,融合虚拟地理环境的现实地理环境目标载体可以有以下两种:一种载体是现实的“人”所生存的真实地理环境,虚实融合的过程就是将虚拟地理对象、虚拟地理过程映射到真实的建筑、地理环境中去,时空尺度上保持绝对一致,实现对现实地理环境、现实地理对象和现实地理过程的增强和补充;第二种载体可以是地理实体模型构成的地理空间与场景(即缩微的物理实体模型沙盘及其空间边界),虚拟地理对象、虚拟地理过程等在时空尺度上再次经过缩放,实现与沙盘空间的融合,构建增强地理环境。

增强地理环境中的虚拟地理环境和现实地理环境应该具有可协同交互性,首先应具有基础的视觉交互特性,即现实地理对象可以在视觉上遮挡虚拟地理对象,可以在现实空间感知、操控融合在现实地理环境中的虚拟地理对象和虚拟地理过程,虚拟和现实在视觉上达到交互统一;其次,在未来的发展阶段,还应该达到信息的交互,即虚拟地理过程及其发展应能影响甚至改变现实地理过程和现实地理环境,而现实的地理环境、地理边界和地理过程也会对虚拟地理过程有所反馈和约束,二者实现信息层次的互动或控制反馈。

这样,增强地理环境可以实现虚拟地理环境和现实地理环境的优势互补:一方面,现实地理环境可以展示更多的信息,对于不易呈现、出现概率较低、甚至存在危险的地理过程,可以使用虚拟地理过程代替;另一方面,对于虚拟地理过程,则增加了现实的属性,成为可视甚至可触摸、可控制操作的地理对象。

AGE 与 VGE 的区别主要是:VGE 是以虚拟空间为载体,将现实的地理对象、现实的地理过程和现实的地理环境映射为相应的虚拟地理对象、虚拟地理过程、虚拟地理环境,并在虚拟空间中进行表达、交互和演化;而 AGE 的目标载体则是现实空间,它是将虚拟的地理对象、虚拟的地理过程乃至虚拟的地理环境以现实空间为载体、与现实的地理对象、现实的地理环境、乃至现实的地理过

程进行融合和集成。虚拟和现实关系在目前 VGE 的研究比较薄弱,存在着虚实割离或平行的

问题;而 AGE 则将虚实重新联结和统一,是 VGE 大研究领域的一个重要发展方向。

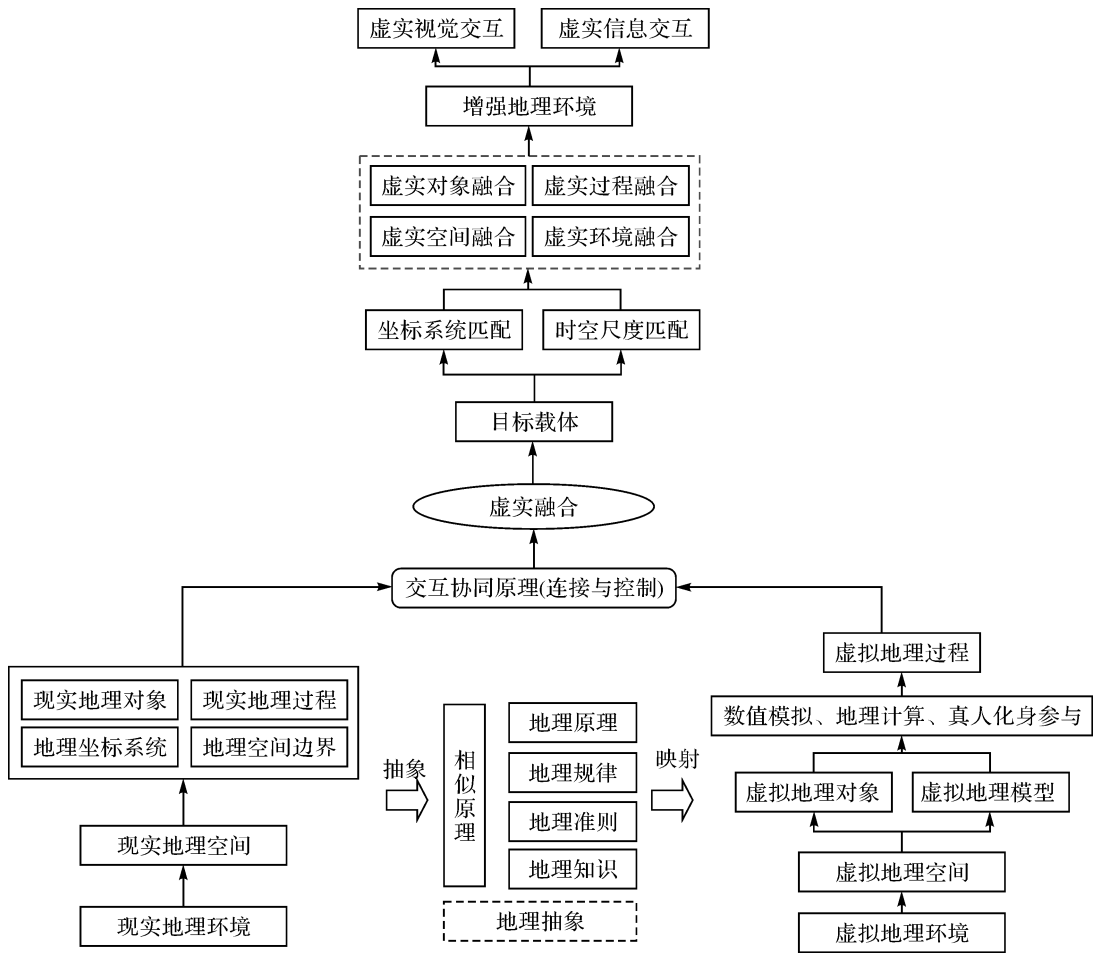


图 1 增强地理环境概念框架

Fig.1 The conceptual framework of AGE

AGE 与增强现实的关系是,AGE 在理念和技术上源于增强现实,是增强现实技术在地理学科中的应用和实践。AGE 侧重于地理问题的表达和研究,需要结合地理理论和地理模型,或发展新的时空表达算法,实现对“人地关系”这一地理核心问题的模拟分析研究。

### 2 虚实融合过程可视化技术

图 1 所示为增强地理环境的概念框架和方法整体思路,本文则在该框架思路的指导下,选择三维打印的物理模型为目标载体,以人群疏散模拟为案例,探讨增强地理环境中过程可视化的关键技术和实现路径。

如图 2,本文以 HoloLens 增强现实眼镜作为显示和交互设备,综合利用 AR 识别码技术、

HoloLens 空间追踪技术、三维渲染控制技术实现虚拟地理过程与现实空间位置匹配及空间遮挡关系表达。在技术流程上,首先利用设备摄像头扫描沙盘上的识别码,获取识别码在现实空间中位置坐标,并以该位置坐标作为空间锚点,将虚拟空间中对象及时空过程坐标转换为现实坐标,实现两个空间坐标系的坐标转换,完成虚拟场景和现实场景的位置初始化和空间关联;其次,虚实空间关联后,利用 HoloLens 设备的 SLAM(simultaneous localization and mapping)功能进行实时位置追踪,确保虚实空间实时融合。为保证虚实场景融合时空关系准确表达,空间关系计算采用空间掩膜技术和 Shader 渲染脚本技术,实现空间关系实时计算与可视化渲染表达。

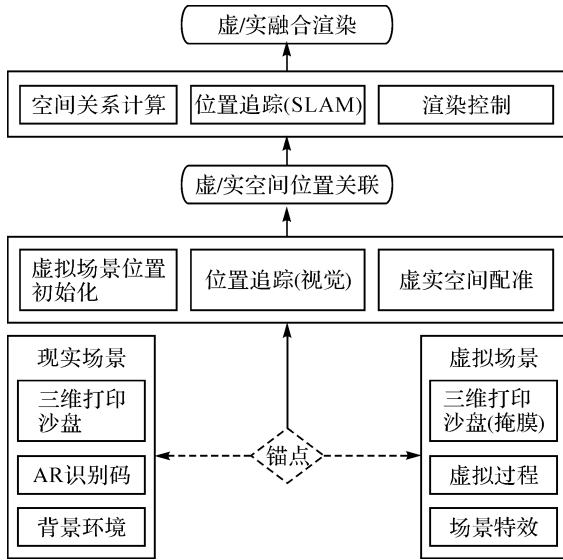


图2 系统技术路线

Fig.2 The technical framework of AGE system for crowd evacuation

2.1 虚实场景融合的坐标系统转换匹配

虚拟过程存在于虚拟空间,现实物体存在于现实空间。通过增强现实设备的实时定位和构图技术,在视觉上实现两个空间融合及显示。其本质是将虚拟空间坐标系转换为现实空间坐标系,实现两者位置精确匹配。虚拟空间坐标系是人为设定的笛卡儿世界坐标系,所有虚拟对象按照确定的坐标原点定位和布局。现实空间则根据空间表达的需求设计合适的坐标系。本文为实现对微观场景的准确数学表达,采用与虚拟空间类坐标系似的笛卡儿三维直角坐标系,坐标系的原点为系统运行时增强现实设备所处的位置,对现实空间中对象的位置描述均以此坐标系为基准。

为实现虚拟与现实空间的转换,需要为虚拟空间坐标系统和现实空间坐标系统设计一对关联对象起到锚点的作用,锚点以实体对象的形式存在于现实空间,以数字特征形式存在于虚拟空间,两者在空间尺寸上保持一致,结构如图3所示。系统采用特殊设计的二维码作为锚点,通过摄像头识别,摄像头拍摄到锚点后利用 Vuforia AR 引擎计算其与摄像头(HoloLens 眼镜)的位置关系,然后与摄像头位置相加,计算出锚点在现实世界中的位置(Ox, Oy, Oz)。为简化坐标转化计算量,在虚拟空间中,锚点中心位置位于坐标原点。虚拟空间中对象在现实空间中位置计算过程如式(1)所示。

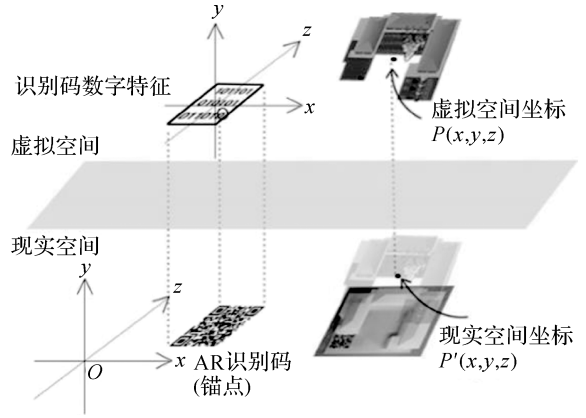


图3 虚拟-现实坐标系转换

Fig.3 The coordinate system transformation between virtual and real spaces

$$\begin{bmatrix} Ax \\ Ay \\ Az \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ox \\ Oy \\ Oz \end{bmatrix} + S * \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,Ax、Ay、Az 为虚拟对象在现实空间中的三维坐标;Ox、Oy、Oz 表示锚点在现实空间中的位置;S 为缩放系数,若现实锚点和虚拟锚点尺寸相同则为 1;Px、Py、Pz 为虚拟对象在虚拟空间坐标系中的位置。现实空间中模型水平放置,系统限制沙盘只能沿 y 轴在 XOZ 平面旋转,θ 为沿 y 轴的旋转角度。经过坐标变化后,虚拟空间中的对象可以准确地叠加到现实空间中。

2.2 虚实对象与场景融合的遮挡计算

虚拟空间和现实空间的融合显示,不仅是将虚拟空间对象放置于正确的现实空间位置,更要保证其和现实空间的空间关系的正确性。本系统虚拟场景中烟、火特效与建筑物之间的空间关系,室内人群与建筑的墙体、门窗之间的空间关系需要准确的可视化表达。保证空间关系正确的关键是处理虚拟空间对象和现实空间对象之间的遮挡关系。

实现正确的遮挡计算,需要对现实空间中对象精确识别与建模,对有镂空结构的实体对象,要精确刻画其镂空结构,考虑到增强现实硬件设备的计算和渲染能力,对空间遮挡进行二值化处理,分为遮挡和未遮挡两种状态。目前增强现实设备中以微软的 HoloLens 眼镜的综合性能最佳,通过 SLAM 技术,实现对环境的整体感知。

HoloLens 空间重建技术是利用两个深度相机对环境进行三维重建,目的是利用空间结构的

特征点实时计算眼镜在现实空间中的位置,而不是刻画现实对象精确的空间结构。对空间的框架性结构,比如桌面、书架等具有良好的重建能力,对建筑沙盘(14 cm×14 cm×6 cm)的小目标,整体结构和内部细节结构均无法重建。如图 4(c)显示的是三维打印沙盘及所处背景环境,图 4(d)反映的是由 HoloLens 三维重建的沙盘及其背景环境,图 4(c)和图 4(d)中相同颜色线框划定区域表示真实环境和三维重建模型的大致对应区域: A、A'分别表示三维打印建筑沙盘和三维重建的建筑沙盘结构;B、B'分别表示书架和三维重建的书架结构;C、C'分别表示电脑屏幕和三维重建的电脑屏幕结构;D、D'分别表示工位隔间框架和三维重建的工位隔间框架结构;E、E'分别表示衣柜和三维重建的衣柜结构。如 A、A'所示建筑沙盘三维重建后只能显示为一个凸起的几何结构,无法满足准确空间关系计算的需求。

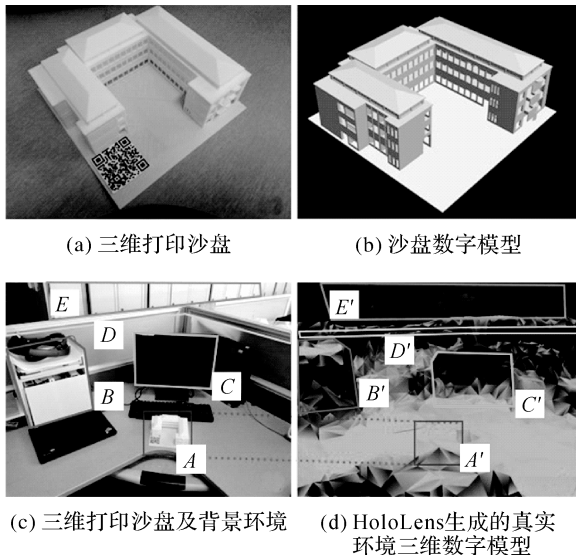


图 4 三维打印沙盘及数字模型

Fig.4 The 3D printing building model and its source digital model

为实现虚实空间的精确遮挡关系计算,利用虚拟场景中静态对象的三维模型替代增强现实设备实时三维重建生成的环境模型,作为动态模型渲染的遮挡掩膜,比如建筑物墙体、围栏、树等环境模型,均可作为掩膜。掩膜作为虚拟场景渲染的辅助对象,在可视化过程中不进行网格渲染,仅保留其网格结构进行遮挡计算。遮挡计算的流程如图 5 所示。掩膜的实现原理是通过 Shader 脚本控制场景对象的渲染顺序和混合模式实现,被

遮挡对象渲染序列为 2002,掩膜渲染序列为 2001,掩膜的混合模式设置为“Blend Zero One”。

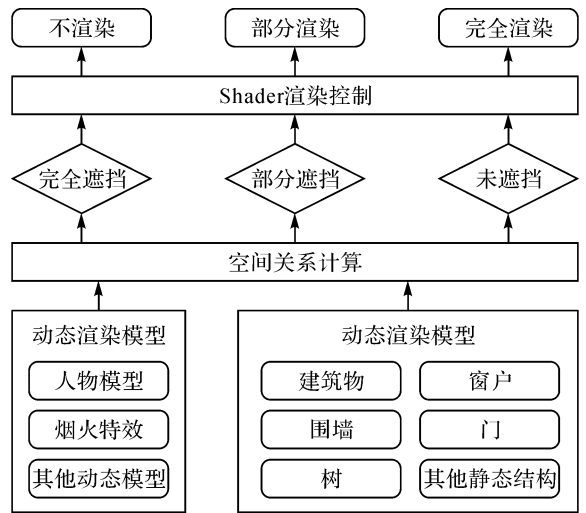


图 5 空间遮挡渲染流程

Fig.5 The rendering process of space occlusion

### 2.3 虚拟过程与现实空间的稳定融合技术

虚拟空间与现实空间通过识别码作为锚点建立坐标转换关系,经过坐标转换后,实现两个空间的初步融合。由于摄像头识别距离和角度限制,完成初步融合后,设备位置追踪由 HoloLens 空间重建模块处理,其位置追踪主要是利用空间几何结构进行位置解算,在小范围场景内由于几何结构相对简单,位置精度会随着设备移动产生较大累计误差。

为实现虚实空间的稳定融合,及时消除因位置追踪导致的融合抖动,本文设计了融合误差消减算法,主要流程如图 6 所示,通过实时监测融合误差,当误差超越设定的阈值时,系统提示误差超限,设备重新识别标识码,虚实空间位置重初始化。

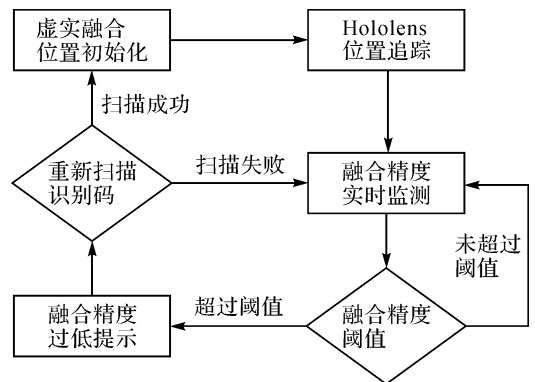


图 6 融合误差削减流程

Fig.6 Error reduction process of mixing

### 3 增强地理环境原型系统及性能评测

#### 3.1 人群疏散增强地理环境原型系统

前期的研究中,实现了多层建筑中人群应急疏散过程的数值模拟与验证(篇幅所限,且人群模拟过程非本文重点,具体实现过程请参考文献[30]),这是一种典型的虚拟地理过程。在本文提出的增强地理环境概念框架和关键技术的支持下,以三维打印的三层教学楼模型为目标载体,本文实现了虚拟的人群应急疏散过程与现实地理空间的融合,即面向人群疏散过程可视化的增强地理环境。具体实现时,首先依据三维虚拟的三层教学楼,通过三维打印构建出完全相同的实体模型沙盘,并作为虚实融合的目标载体,然后将文献[30]中人群疏散模拟算法模拟出的时空轨迹,运用第3节中的关键技术将虚拟人群疏散人群、烟火特效等虚拟对象与真实的三维打印教学楼沙盘进行融合显示。

系统采用 Unity 引擎作为开发环境,跨平台编译为 Windows 通用应用平台(Universal Windows Platform)应用,最终部署于 HoloLens 增强现实眼镜中。如图7所示,系统启动后首先扫描模型上的识别码(图7(a)),扫描成功后(图7(b)),虚拟场景加载并与真实环境相融合,系统运行过程中,可以表达正确的空间遮挡关系,虚拟对象之间的空间关系正确表达。包含三维打印沙盘以及化身人的虚拟疏散过程的增强地理环境。整体效果如图7(c)所示,其中楼道处的区域的放大图,展示了建筑物和人之间的空间遮挡关系,人被墙体遮挡,但是透过窗户观察到未被遮挡的部分。

#### 3.2 增强地理环境中虚实空间融合的稳定性的分析

虚拟空间与现实空间的融合分为两个过程:

①通过摄像头扫描识别码,完成虚拟空间坐标系原点初始化,将该坐标原点记为 Porigin;②完成坐标初始化后,需要对 HoloLens 眼镜的位置进行实时追踪,追踪过程利用其内置的位置追踪模块完成。由于追踪过程的不稳定性,会造成 Porigin 位置偏移抖动,引起融合误差,继而影响可视化效果,因此,需要评测其稳定性。

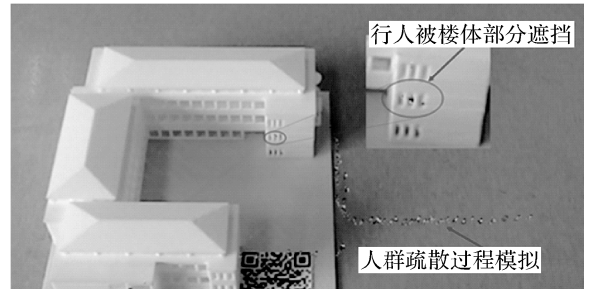
Porigin 的融合误差跟 HoloLens 眼镜与沙盘的距离,眼镜移动速度相关。图8(a)测试条件为识别识别码后,移动眼镜至识别范围外后保持相对静止,第1到150帧表示在识别范围内随着设备远离沙盘,Porigin 融合误差升高,直至超出

摄像头识别范围后保持眼镜相对稳定,Porigin 维持在 6 mm 左右波动,该阶段虚实空间位置匹配由 HoloLens 内置位置追踪模块提供。图8(b)测试条件为以大约  $4.5^\circ/s$  的角速度绕沙盘旋转,统计曲线显示 HoloLens 移动位置突变会引起 Porigin 较大幅度的波动,体验者可以感觉到明显的虚拟场景抖动。而且随着位移积累,Porigin 融合误差升高。导致该现象的主要原因是沙盘背景几何结构简单,HoloLens 的 SLAM 不足以提供精确的位置参考。可以通过重新扫描识别码进行虚拟空间与现实空间坐标系重新匹配,降低由此产生的高误差值,使误差回到图8(a)所显示的水平。



(a) 扫描识别码

(b) 系统使用演示



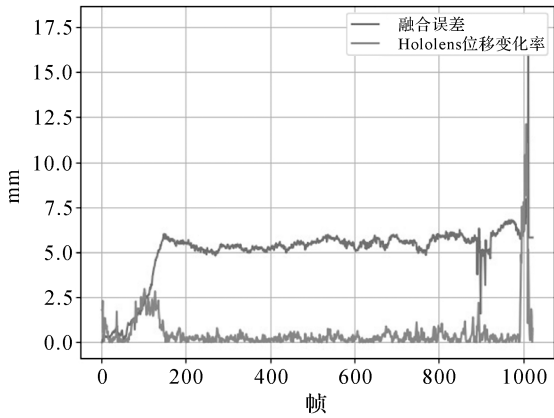
(c) 虚拟人群疏散过程的AGE展示效果

图7 系统运行截图

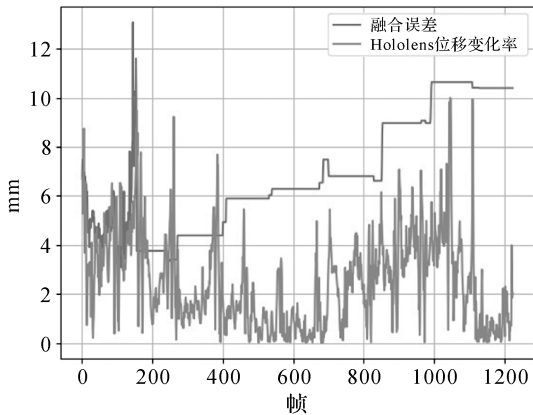
Fig.7 Screenshot of the AGE prototype

在虚拟场景渲染性能上,原型系统的目标运行设备 HoloLens 的 CPU、RAM、GPU 性能远低于普通的台式计算机性能,因此直接统计这类设备的性能不具备横向对比的参考意义。故选取每秒帧率(frame per second, FPS)作为性能评价指标。通过获取系统运行期间的帧率数据,进行可视化分析,形成如图9所示的帧率分布曲线。系统启动后扫描识别码时,由于虚拟场景尚未加载,帧率维持在 25 FPS 左右。从第5秒左右开始,虚拟场景载入,此时帧率维持在 15 FPS 左右。然而在实际使用过程中,通过问卷返回的结果反馈,

系统体验流畅。主要原因是 AR 场景是将虚拟对象叠加到真实空间中,视野主体是现实空间。虚拟场景相对低帧率不会造成显著的渲染卡顿。



(a) HoloLens眼镜扫描后识别码后保持不动融合精度



(b) 以平均4.5°/s角速度绕沙盘旋转融合精度

图 8 虚实空间融合精度分析

Fig.8 Test of the accuracy of the AGE

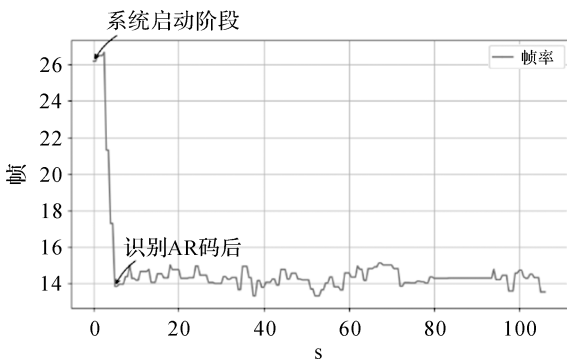


图 9 系统运行帧率变化曲线

Fig.9 The FPS curve when application is running

造成系统帧率偏低的原因有两个:①系统需要通过摄像头实时扫描周边环境,进行虚实场景匹配融合,需要耗费大量的计算资源;②系统中有 100 个虚拟人化身,每个人都有动作绑定,场景需

要进行的渲染量巨大。

### 3.3 可视化原型系统用户体验与问卷统计分析

基于上述研发的增强地理环境原型系统,本文共邀请了 29 名用户(其中男性 16 名,女性 13 名)进行系统体验,并填写调查问卷。参与者年龄区间为 20~39 岁,均为地理信息相关专业的学生和教师,对 GIS、虚拟地理环境都有所了解,可以避免认知能力、知识结构等方面带来的偏差。样本数量能够满足  $t$  检验、方差分析的要求,样本分布能够代表该年龄区间专业人员的平均水平。调查问卷从可视化形式、真实感、沉浸感、系统运行效果、运行性能、交互方式、学习成本这些方面设置 10 道打分题,题项的步距是 5,其中 1 分、5 分分别表示对该命题的极端否定和肯定,3 分为没有明确态度的用户提供了一个中性点,同时也作为统计检验的基准点。

本文对收集到的调查问卷进行统计分析,建立检验假设  $H_0$ :各题项得分与基准分数相同,以  $\alpha=0.05$  的显著性水平,使用单样本  $t$  检验和基准值进行比较,得到检验统计量。结果表明,参与者对 10 道题的打分均显著超过基准点,说明各题项所反映的原型系统效果和用户体验与基准点相比提升显著。为了检验年龄、性别因素对增强地理环境原型系统的使用体验是否存在显著区别,本文对收集到的问卷数据进行分组统计检验。年龄因素方面,为了使各年龄组样本量大致接近,本文把年龄分为 3 段,即 22 岁以下、23—29 岁、30 岁以上,然后对 3 组数据进行单因素方差分析。结果表明,各年龄段样本均值在显著性水平 0.05 上均没有显著差异,说明在本文所选的样本条件下,年龄因素对原型系统用户体验没有显著影响。性别因素方面,本文对性别分组问卷数据进行双样本同方差  $t$  检验,结果表明,不能拒绝性别分组均值相等的原假设  $H_0$ ,没有足够证据表明男女性别组样本均值在显著性水平 0.05 上有显著差异,说明在本文所选的样本条件下,性别因素在原型系统用户体验方面也没有显著差别。

结合调查问卷题意与数据分析,可以得出以下结论:从系统效果与性能方面来看,原型系统可以流畅地运行,增强现实场景沉浸感较强,观察与漫游等交互方便,并且容易学习使用;从用户体验角度来看,物理模型上叠加展示虚拟疏散过程,是一种新颖的可视化形式,用户能感觉到虚拟疏散的人群在现实物理模型空间中活动;由于虚拟物

体被现实物理模型的遮挡效果明显,用户可以感受到教学楼模型内的逼真的疏散过程。但另一方面,调查问卷结果也反映出了原型系统的问题,如变换视角会出现抖动或偏移等,这也为增强地理环境可视化的下一步工作提出了可以改进的方向。

## 4 结论与讨论

本文主要研究了虚实融合的增强地理环境的概念框架及其实现方法,并以学校火灾人群疏散为例,证明了虚实融合增强地理环境与过程可视化技术的可行性。本文的研究在理念上有以下创新:将虚拟地理对象和虚拟的地理过程从计算机空间中“移”出来,置于真实的地理空间中,使虚拟地理环境具有现实的属性;同时,现实的地理空间的信息容量也将被增强,不再是静止不变的对象,而是灵活多变的“活”的环境;危险性的地理过程、低概率的地理过程可按需重现,可以成为地理问题研究、研讨的载体。在增强地理环境中,虚拟与现实重新得以统一,而这也代表了虚拟地理环境未来新的发展趋势。

需要说明的是,本文的研究将三维打印的物理实体模型作为研究环境存在,虚拟地理过程是以可视化融合的方式接入物理实体模型,构成增强地理环境,而研究者也是以第三人称视角,即以观察者的身份体验增强现实地理环境和增强地理过程。未来,增强地理环境进一步的研究包括:

(1) 发展第一人称视角的体验式增强地理环境,即以参与者位于的现实地理环境为研究环境,虚拟的地理数据和虚拟地理过程将以此为载体在可视化的层次上集成进入现实地理环境,由此构建出增强现实的地理环境,参与者将以第一人称的身份介入,实现对增强现实地理环境的体验和研究。

(2) 发展虚实过程交互性的增强地理环境,即虚拟地理过程、现实地理环境、现实地理过程之间实现能量和信息的交互,虚拟的地理过程将会影响(乃至改变)现实的地理环境,现实的地理过程也将影响虚拟的地理过程,在此基础上,实现现实地理环境和虚拟地理环境的真正融合,虚拟与现实二者不再区分彼此,形成虚拟地理环境发展的高级阶段。

## 参考文献:

- [1] 龚建华, 林琿. 虚拟地理环境: 在线虚拟现实的地理学透视[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] LIN Hui, CHEN Min, LÜ Guonian. Virtual Geographic Environment: A Workspace for Computer-aided Geographic Experiments[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2013, 103(3): 465-482.
- [3] 龚建华, 林琿, 肖乐斌, 等. 地学可视化探讨[J]. 遥感学报, 1999, 3(3): 236-244.
- [4] LIN Hui, CHEN Min, LU Guonian, et al. Virtual Geographic Environments (VGEs): A New Generation of Geographic Analysis Tool [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126: 74-84.
- [5] CHEN A D, LIN S J. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room[J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2017, 140(5): 1071-1072.
- [6] CHEN A D, LIN S J. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room[J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2017, 140(5): 1071-1072.
- [7] GAFFARY Y, GOUIS B L, MARCHAL M, et al. AR Feels “Softer” than VR: Haptic Perception of Stiffness in Augmented Versus Virtual Reality[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(11): 2372-2377.
- [8] ZEPENIUK D. Intuitive Breakthrough Solution for AR and VR Worlds[C]//Proceedings of the Hot Chips 28 Symposium. Cupertino: IEEE, 2016.
- [9] 赵沁平, 周彬, 李甲, 等. 虚拟现实技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 71-75.
- [10] ZHAO Qinping, ZHOU Bin, LI Jia, et al. Brief Survey on Virtual Reality Technology[J]. Science and Technology Review, 2016, 34(14): 71-75.
- [11] MARCHAND E, UCHIYAMA H, SPINDLER F. Pose Estimation for Augmented Reality: A Hands-on Survey [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(12): 2633-2651.
- [12] SCHOLZ J, SMITH A N. Augmented Reality: Designing Immersive Experiences that Maximize Consumer Engagement [J]. Business Horizons, 2016, 59(2): 149-161.
- [13] WEIDLICH D, SCHERER S, WABNER M. Analyses Using VR/AR Visualization[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(5): 84-86.
- [14] 周忠, 周颀, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学(信息科学), 2015, 45(2): 157-180.
- [15] ZHOU Zhong, ZHOU Yi, XIAO Jiangjian. Survey on Augmented Virtual Environment and Augmented Reality



- [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(2): 157-180.
- [14] 张凤军, 戴国忠, 彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. *中国科学(信息科学)*, 2016, 46(12): 1711-1736.  
ZHANG Fengjun, DAI Guozhong, PENG Xiaolan. A Survey on Human-computer Interaction in Virtual Reality[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, 46(12): 1711-1736.
- [15] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. *中国科学 F 辑(信息科学)*, 2009, 39(1): 2-46.  
ZHAO Qinpingle. A Review of Virtual Reality[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2009, 39(1): 2-46.
- [16] MAHMOUDI M T, MOJTAHEDI S, SHAMS S. AR-based Value-added Visualization of Infographic for Enhancing Learning Performance[J]. *Computer Applications in Engineering Education*, 2017, 25(6): 1038-1052.
- [17] FILONIK D, BEDNARZ T, RITTENBRUCH M, et al. Glance: Generalized Geometric Primitives and Transformations for Information Visualization in AR/VR Environments[C]// *Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-reality Continuum and Its Applications in Industry*. Zhuhai, China: ACM, 2016.
- [18] 吕国梁. ARGIS 可视化关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
Lǚ Guoliang. Research of Key Technologies in ARGIS Visualization[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [19] 董璐茜. VR 与 AR 技术的发展与前景[J]. *科技创新与应用*, 2016(26): 34-35.  
DONG Luqian. Development and Prospect of VR and AR Technologies[J]. *Technology Innovation and Application*, 2016(26): 34-35.
- [20] JUNG T, DIECK M C T. *Augmented Reality and Virtual Reality*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- [21] ZOLLMANN S, SCHALL G, JUNGHANNS S, et al. *Comprehensible and Interactive Visualizations of GIS Data in Augmented Reality*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [22] 杜清运, 刘涛. 户外增强现实地理信息系统原型设计与实现[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(11): 1046-1049.  
DU Qingyun, LIU Tao. Design and Implementation of A Prototype Outdoor Augmented Reality GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 1046-1049.
- [23] 孙敏, 陈秀万, 张飞舟, 等. 增强现实地理信息系统[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(6): 906-913.  
SUN Ming, CHEN Xiuwan, ZHANG Feizhou, et al. Augment Reality Geographical Information System[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 906-913.
- [24] 郑援, 李思昆, 胡成军, 等. 虚拟实体对象的行为建模方法研究[J]. *国防科技大学学报*, 1998, 20(1): 78-82.  
ZHENG Yuan, LI Sikun, HU Chengjun. Research on Behavior Models of Virtual Artifacts [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, 20(1): 78-82.
- [25] 徐高. 基于智能体技术的人员疏散仿真模型[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(3): 301-303.  
XU Gao. Simulation Model for Crowd Evacuation Based on Agent Technology[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2003, 38(3): 301-303.
- [26] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490.
- [27] 王子甲, 陈峰, 施仲衡. 基于 Agent 的社会力模型实现及地铁通道行人仿真[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 90-95.  
WANG Zijia, CHEN Feng, SHI Zhongheng. Agent-based Realization of Social Force Model and Simulation of Pedestrians in Subway Passageway[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 90-95.
- [28] GODOY J E, KARAMOUZAS I, GUY S J, et al. Adaptive Learning for Multi-agent Navigation[C]// *Proceedings of the 2015 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Istanbul, Turkey: ACM, 2015: 1577-1585.
- [29] LI Wenhong, GONG Jianhua, YU Ping, et al. Simulation and Analysis of Congestion Risk During Escalator Transfers Using A Modified Social Force Model [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 420: 28-40.
- [30] LI Wenhong, LI Yi, YU Ping, et al. Modeling, Simulation and Analysis of the Evacuation Process on Stairs in A Multi-floor Classroom Building of A Primary School[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 469: 157-172.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2018-03-05

修回日期: 2018-05-21

第一作者简介: 龚建华(1965—),男,研究员,研究方向为地理可视化与虚拟地理环境。

First author: GONG Jianhua (1965—), male, research fellow, majors in virtual geographic environments.

E-mail: gongjh@radi.ac.cn

通信作者: 李文航

Corresponding author: LI Wenhong

E-mail: liwh@radi.ac.cn