

引用格式: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.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180082

虚拟地理环境中沉浸式多人协同交互技术研究及实现

袁 帅^{1,2}, 陈 斌^{1*}, 易 超¹, 徐丙立³

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 中国人民武装警察部队警种学院, 北京 102202;
3. 陆军装甲兵工程学院, 北京 100072

Research and Implementation of Immersive Multi-User Collaborative Interaction Technology in Virtual Geographic Environment

YUAN Shuai^{1,2}, CHEN Bin^{1*}, YI Chao¹, XU Bingli³

1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Specialized Forces College of Chinese People's Armed Police Force, Beijing 102202, China; 3. Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract: In the development of virtual geographic environment (VGE), natural and efficient human-computer interactions have always been one of the core contents of its research. However, users still communicate with VGE based on the traditional human-computer interaction interface in many current VGE application cases. This leads to two problems: (1) the immersive feeling of the users is poor; (2) the requirements for multi-users to interact in VGE cannot be effectively satisfied. It is crucial to take advantage of the latest achievements of human-computer interaction technology in order to solve these problems to meet the immersive multi-user collaborative interaction requirements in VGE. In this paper, the status of research and application of the human-computer interaction technology in VGE was reviewed. The development process and basic principle of motion capture technology and its advantages in improving the interactive immersion of VGE users were briefly described. Next, focusing on the design of immersive multi-user collaborative interaction system in VGE, the immersive multi-user collaborative interaction model based on motion capture technology and the corresponding interactive semantics of its interactive actions were analyzed. A multi-user collaborative conflict control mechanism was proposed. The structure and function of the immersive multi-user collaborative interaction system in VGE were introduced emphatically. Moreover, the Virtual Yanyuan Auxiliary Planning Prototype System (VYAPPS) adopting Peking University campus as a case study was developed by using Javascript and Python language. The experiments based on VYAPPS were carried out. Questionnaire statistical results show that the interactive effects of the immersive multi-user collaborative interaction technology in VGE are recognized by users. The results also showed that the advantages of the immersive multi-user collaborative interaction technology in improving multi-user immersion make it have a good application prospect. For example, it can be applied to geography education, urban planning, emergency rescue, military command fields and so on.

收稿日期 2018-01-31;修回日期:2018-04-18.

基金项目 装备发展部预研项目(315050501);国家自然科学基金项目(41771442、41271402)。[**Foundation items:** Pre-research Project of Equipment Development Department, No.315050501; National Natural Science Foundation of China, No.41771442, 41271402.]

作者简介 袁 帅(1987-),男,硕士生,主要从事虚拟地理环境研究。E-mail: gisyuanshuai@pku.edu.cn

*通讯作者 陈 斌(1973-),男,博士,副教授,主要从事虚拟地理环境研究。E-mail: gischen@pku.edu.cn

Key words: VGE; motion capture; human-computer interaction; multi-user collaboration; immersion

***Corresponding author:** CHEN Bin, E-mail: gischen@pku.edu.cn

摘要 在VGE的发展过程中,自然高效的人机交互一直是其研究的核心内容之一,但在当前众多VGE应用案例中,用户仍然是基于传统的人机交互界面与VGE进行交流,这导致了:①用户的沉浸感不高;②多人在VGE中协同交互的需求无法得到有效满足。因此,为了实现VGE中的沉浸式多人协同交互,本文首先综述了VGE中人机交互技术研究和应用现状,并简要阐述了动作捕捉技术发展历程、基本原理及其在提高VGE用户交互沉浸感上的优势。在此基础上,对VGE中沉浸式多人协同交互系统进行了重点设计,主要包括分析了基于动作捕捉技术的沉浸式多人协同交互模式及其对应的交互动作语义,提出了多人协同冲突控制机制,以及着重介绍了VGE中沉浸式多人协同交互系统的结构和功能。最后,以北京大学为例开发了虚拟燕园辅助规划设计原型系统,并进行了实验。研究结果表明,沉浸式多人协同交互技术的交互效果受到用户认可,它在提高化身之间及化身与VGE之间的协同交互方面具有明显的优势,可应用于地学教育、城市规划、应急救援和军事指挥等领域,具有良好的应用前景。

关键词 虚拟地理环境;动作捕捉;人机交互;多人协同;沉浸感

1 引言

虚拟地理环境(Virtual Geographic Environment, VGE)的思想起源于Michael Batty提出的虚拟地理学^[1]。2001年,林琨和龚建华在《虚拟地理环境:在线虚拟现实的地理学透视》一书正式提出了VGE的概念、理论和方法^[2]。VGE的概念提出以后,相关学者基于各自的研究,对其从不同的侧重点进行了完善,林琨等^[3]将VGE定义为包括作为主体的化身人类社会以及围绕该主体存在的一切客观环境;龚建华等^[4]将VGE定义为以化身为主体的一个虚拟共享空间,既可以是现实地理环境的表达与超越,也可指赛博空间中的一个虚拟社会;万钢等^[5]认为VGE是基于地理空间信息网格的多维空间数据组织模型,可支持多维信息的融合与分析;Voinov等^[6]认为VGE是通过融合地理知识而建立的一种基于网络和计算机的地理可视化。经过近20年的发展,VGE目前已形成了以中国学者为主、国际学者广泛参与的研究环境。

1.1 VGE中的人机交互技术

在VGE发展过程中,自然高效的人机交互一直是其研究的核心内容之一。在理论研究方面,林琨等^[7]从地理学语言演变的角度,指出面向用户的自然有效交流方式与表达形式是VGE区别于其他语言形式的最重要特征;Lin等^[8-9]以虚拟地理实验的视角,讨论了VGE互动环境构建的重要性;贾奋励等^[10]从系统论的角度,指出VGE的“感觉相似”是产生沉浸感的重要因素,也是VGE区别于其他空间认识工具的关键;其他学者分别从VGE地理设计的吸引力评价因子^[11],通过CryEngine构建沉浸式VGE

的技术途径^[12],面向军事指挥人员空间认知规律的VGE交互设计^[13]和城市VGE模型中的代理人与周围环境的交互^[14]等方向,探讨了如何更加有效率地提升VGE交互逼真度或用户沉浸感的理论和方法。总体来看,随着研究的深入,VGE同行关于VGE中人机交互技术的思考在逐渐深化与完善,对VGE“既强调身临其境之感,又追求超越现实的理解”这一重要特征的认识也越发明晰。

在实践应用方面,周洁萍等^[15]以陕西绥德韭园沟小流域淤地坝坝系规划为例建立原型系统,基于现实中人与人以及人与环境之间的互动方式,对协同VGE中多用户的交流交互方式进行了初步实验;郑炼功^[16]研究了协同虚拟战场研讨环境并开发出了原型系统,该系统支持多用户“浸入”到该环境中,很大程度上解决了真实作战训练中的许多实际问题;陈斌等^[17]以可进入三维香港中文大学虚拟校园的设计与实现为例,研究了基于OpenSimulator开发分布式VGE应用的主要技术;Xu等^[18]以珠江三角洲的空气污染模拟为例建立原型系统,支持处于不同地理位置的用户进入到VGE中开展大气污染扩散的协同仿真与操作;龚建华^[19]、江辉仙^[20]分别以洪水演进自然地理过程、人群活动人文地理过程和福建海坛岛半洋石帆海蚀地貌发育实验为案例,初步尝试了实验者如何用化身,以观测者或者参与者身份操纵虚拟场景与实验;易思蓉等^[21]以中老铁路某段为例研制基于VGE的铁路数字化选线设计系统,为选线工程师在室内立体环境下模拟现场实景分析,实现三维实体线路设计提供技术支持。

通过上述分析可以发现,众多学者对如何利用人机交互技术来提高VGE用户的沉浸感进行了有

益的研究和探索。但在这些应用案例中,用户通常仍是基于键盘、鼠标和触摸屏等人机交互设备来操作化身人,交互位置和交互动作固定,从而导致操作的真实感不强和交互的沉浸感不高。而现实中典型的VGE应用需求是多人同时沉浸于某一VGE中,可进行面对面的交流研讨,并能基于共同目标完成对该VGE的协同交互,且彼此的交互操作和结果实时可见。因此,如何利用人机交互技术的最新发展成果来设计满足这一需求,是亟需解决的问题。

1.2 动作捕捉技术

动作捕捉也称为运动捕捉,是指“在一定空间范围内通过对特殊标记点的跟踪来记录捕捉对象运动信息,然后将其换算为可使用数学方式进行表达的运动的运动过程”^[22]。其技术发展大致经历了20世纪初的萌芽期、70年代的实验研究期、80年代基于计算机技术的发展期、90年代的商业化拓展期和21世纪初的高速蓬勃期等阶段^[23-27]。动作捕捉系统通常包括传感器、信号捕捉设备、数据传输设备和数据处理设备,其工作原理是基于被捕捉对象关键部位标记或固定的传感器,由信号捕捉设备跟踪、记录、测量这些传感器的空间坐标与轨迹,经过数据传输与处理,最终驱动虚拟对象或角色运动^[28]。

伴随着当前计算机科学和传感器技术的快速进步,实时动作捕捉技术不仅可以获取真实环境中的人或物的运动状态和姿态,而且为虚拟环境与真实环境之间的通信提供了可靠的技术保障。它已成为人机交互技术的重要支撑技术,是实现自然式人机交互、提高人机交互效率的重要途径之一^[29-30]。因此,这为相关学者利用它来解决VGE的沉浸式交互问题提供了思路,如李小杰等^[31]探讨了将基于计算机视觉的手势识别技术引入到VGE中的必要性和途径,而龚建华等^[4]、Lin等^[32]则分析了基于视觉、触觉等多通道人机交互的VGE系统构建理论和方法,张晓丽^[33]将三维捕捉数据引入到了三维虚拟火场环境的消防模拟训练系统,陈楠楠等^[34]、陈帼鸾等^[35]分别基于摄像头识别技术和HTC vive设备开发了交互式虚拟校园系统,杨光辉等^[36]基于Kinect研制了虚拟展馆游览系统,以及霍宇平等^[37]用惯性运动捕捉技术研制了沉浸式变电站仿真系统。

通过开展实验,上述基于动作捕捉技术的VGE应用系统在提高用户交互沉浸感上取得了较大突破,实现了更加人性化的交互效果,但还存在一个共同的问题,即它们仍是基于单用户设计,每次使

用也仅限单人操作。因此,为满足上述典型应用对多人协同交互的需求,实现VGE中沉浸式交互由单人操作到多人协同,本文对VGE中沉浸式多人协同交互系统进行了设计。

2 VGE中沉浸式多人协同交互系统设计

2.1 VGE中沉浸式多人协同交互模式

本文“沉浸式”交互主要是指使用动作捕捉技术作为实现VGE中人机交互的重要手段,且以基于动作捕捉技术的用户化身作为VGE的主体,模拟现实中人类的交流交互。在此基础上,“沉浸式多人协同”交互是指多名用户不仅可远程登录到同一虚拟地理场景中,能以各自不同的视角进行观察,且每名用户可以看到其他用户的化身及其位置和姿态,任一用户自身状态的改变或对VGE的操作,将实时同步到其他用户所观察到的虚拟地理场景之中,所有的状态信息都具备对应的可视化效果。

现实世界中的多人协同交流交互实际上包括真实地理环境中的人与人之间以及人与地理空间之间的交流交互,因此本文将VGE中沉浸式多人协同交互模式分为用户与用户之间的交互以及用户与VGE之间的交互。由于VGE包括具有位置、大小和方向等属性的可新增、删除和移动的虚拟对象,以及占据空间范围、具备连续分布属性的作为应用背景的虚拟地理景观,因此将用户与VGE之间的交互又分为用户与虚拟对象的交互以及用户与虚拟地理景观的交互。

为了满足不同模式下用户的交互需求,设计了化身的骨骼模型,如图1所示。化身骨骼结构由24个节点组成,其基于人体关节的节点设计确保了化身对用户基本操作动作的表达,如头部节点表示头的中心位置,连接颈部节点确保用户化身头部能够转动以表现真实用户的头部转动,同时结合多人协同的需求,对化身的手部骨骼使用了3个节点,以满足用户手部抓握等操作的表现需求,而对化身脚部骨骼则进行了简化处理,仅使用1个节点表示,确保其能够反映用户脚部大致姿态。

基于上述化身骨骼模型,为各交互模式设计了一些基本的交互动作。用户与用户之间的交互动作包括化身的转向、蹲下、起立和化身之间的对话、传递和研讨等形式。其中,传递和研讨以化身面对

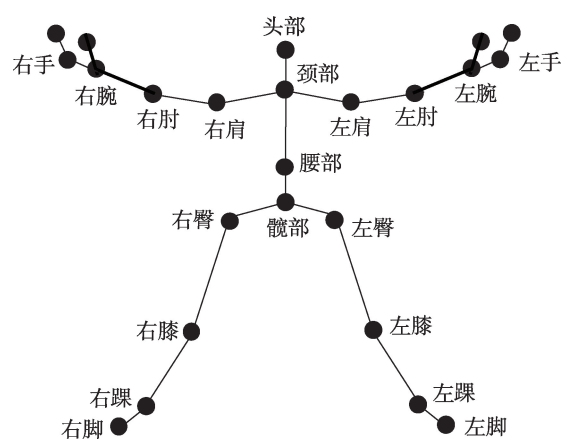


图1 化身骨骼结构
Fig. 1 Avatar bone structure

面的方式进行,属于多人协同交互模式特有的交互动作。用户与虚拟对象交互包括化身对虚拟对象的指点、拾取、移动、放置、增删等形式;用户与虚拟地理景观交互包括化身对VGE的放大、缩小和漫游等形式。

各交互动作模式包含的交互动作类型及其对应的语义见表1。

2.2 VGE 中沉浸式多人协同冲突控制机制

在沉浸式多人协同交互模式中,由于用户对VGE的操作必须实时共享,因此要求冲突解决机制的步骤不能过于繁琐,同时,多用户对虚拟对象的协同操作是共享可见的,为此只需通过服务器记录

不同用户对同一虚拟对象的协同交互时间顺序即可有效防范交互冲突。

实现方法采取服务器端对客户端的每个操作请求均返回成功或失败状态码,成功状态码代表允许操作申请,失败状态码代表驳回操作申请。当多个客户端对同一虚拟对象向服务器发送操作请求时,如果操作的物体未被占用,则服务器向最先发送操作请求的客户端发送操作申请成功状态码,允许该操作,同时给其他客户端返回操作申请失败状态码,驳回该操作。当前客户端完成对该虚拟对象的操作后,向服务器发送操作完成请求,服务器将该虚拟对象设置为未被占用状态,其他客户端可继续对该虚拟对象进行操作尝试。

2.3 VGE 中沉浸式多人协同交互系统结构

VGE 中沉浸式多人协同交互系统采用客户端/服务器(C/S)的中心分布式网络架构,包括服务器端、客户端和动作捕捉端。服务器端采用多台服务器集群模式,统一对外提供服务,服务器端对应多个客户端,每个客户端又连接一个动作捕捉端,其结构如图2所示。

服务器端包括Http服务器、虚拟世界服务器和数据库管理服务器,数据和服务位于不同的服务器上,可自由组合、任意扩展,以充分满足VGE分布式扩展和多人协同交互的需求。客户端包括动作捕捉插件、资源管理模块、渲染模块和通信模块,完成

表1 VGE 中沉浸式多人协同交互模式及交互动作语义
Tab. 1 Immersive multi-user collaborative interaction model and interactive actions' semantics in VGE

交互模式		动作类型	交互动作语义
用户与用户之间交互		转向	用户化身的朝向发生改变
		蹲下	用户化身下蹲,以便观察
		起立	用户化身起立,以便观察
		对话	用户通过自然语音进行沟通
		传递	虚拟对象从一个化身手中传递到另一个化身手中
		研讨	用户化身通过手势和语音进行讨论,相互交流
		指点	用户化身通过手势或工具来使感兴趣对象高亮,准备交互
用户与VGE之间交互	与虚拟对象交互	拾取	用户化身指点目标虚拟对象后,用手抓住该对象
		移动	用户化身拾取虚拟对象后,移动手部位置,该对象位置改变
		放置	用户化身移动虚拟对象后手部松开,该对象置于新位置
		增加	用户化身拾取虚拟对象后移动手部位置到虚拟地理场景内,该虚拟对象增添
		删除	用户化身拾取虚拟对象后移动手部位置到虚拟地理场景外或指点物体后点击菜单删除按钮,该虚拟对象删除
		放大	用户化身左右手从中间向两侧分开,局部场景放大
		缩小	用户化身左右手从两侧向中间合拢,局部场景缩小
	与虚拟地理景观交互	漫游	用户化身在虚拟地理景观中的位置发现变化

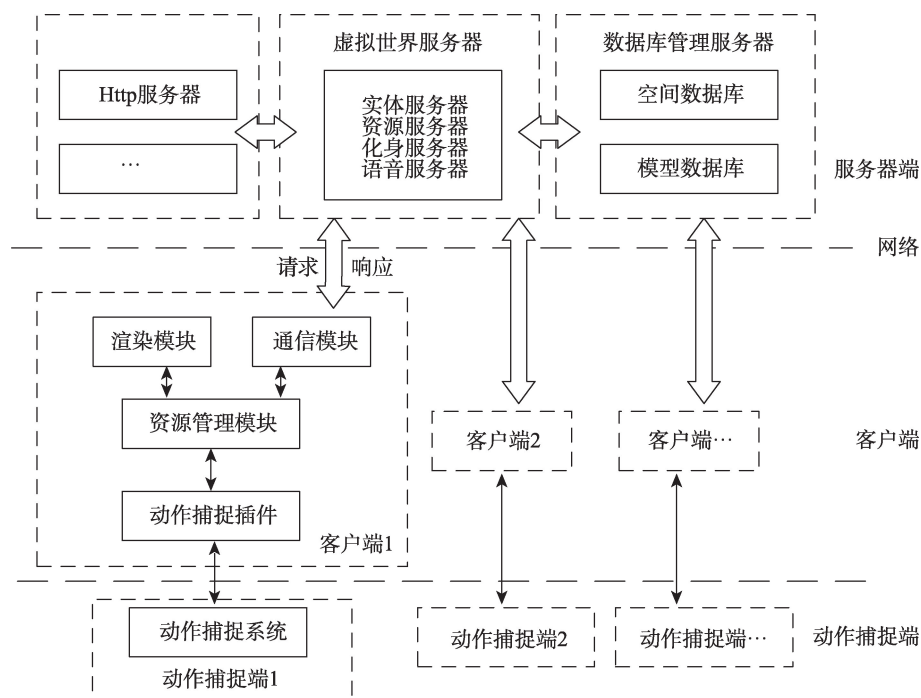


图2 VGE中沉浸式多人协同交互系统结构

Fig. 2 Structure of immersive multi-user collaborative interaction system in VGE

对各类动作捕捉设备的驱动、对本地资源的管理、与服务器端的通信(请求和响应)以及显示终端的渲染。动作捕捉端包括各类动作捕捉系统,负责用户位置、动作和姿态数据的获取。

2.4 VGE 中沉浸式多人协同交互系统功能

VGE 中沉浸式多人协同交互系统功能包括整体功能和模块功能。基于上述交互模式和系统结构,系统整体功能可概括为动作捕捉端获取用户各

类数据,通过客户端进行打包,发送到服务器端,在服务器端融合为化身动作和状态,分析并实现动作对应的语义,在由空间数据库和模型数据库构成的VGE 中进行彼此之间的交互或完成对虚拟对象和虚拟地理景观的协同交互,并把交互结果同步到各个客户端和动作捕捉端,完成实时渲染。系统中各功能模块的功能设计见表2。

目前,本文以北京大学为例,基于该系统设计完成了虚拟燕园辅助规划设计原型系统(Virtual

表2 VGE 中沉浸式多人协同交互系统模块功能设计

Tab. 2 Module function design of immersive multi-user collaborative interaction system in VGE

系统角色	功能模块		功能描述
服务器端	Http 服务器		完成通信协议解析等服务功能
	虚拟世界服务器	实体服务器	提供动态内容同步服务
		资源服务器	提供动态 LOD 资源服务,以优化渲染的资源分配和显示效果
		化身服务器	把捕捉到的用户位置、动作和姿态数据合成为化身动作,分析并实现动作语义,并将操作结果实时发送给其他用户
		语音服务器	打包并根据声场量级来传输实时语音数据
	数据管理服务器	空间数据库	对三维地形数据和遥感影像数据等地学数据进行管理,构成基础 VGE
模型数据库		对三维模型信息和化身模型信息进行管理,构成 VGE	
客户端	资源管理模块	对本地的各类数据资源进行管理	
	通信模块	负责对服务器端的请求与响应	
	渲染模块	对场景进行渲染,完成 PC 显示屏、头盔显示器等设备上的显示	
动作捕捉端	动作捕捉插件	完成对各种类型动作捕捉设备的驱动	
	动作捕捉设备	获取用户位置、动作和姿态数据	

Yanyuan Auxiliary Planning Prototype System, VY-APPS)的研制与开发。

3 VYAPPS与初步实验

3.1 VYAPPS简介

VYAPPS具备辅助规划设计功能,支持用户从建筑模型库当中提取所需的三维建筑模型,并可实时调整其大小、比例、朝向、位置等,以对建筑的规划和效果进行评估。

为便于多用户协同交互效率的提高,VYAPPS设计了代表建筑规划专业老师、建筑规划专业学生和普通非专业师生3类化身的形象。通过这一标识,多用户基于自身的建筑规划专业水平选择对应类型的化身形象并协同操作时,更有利于彼此之间的探讨交流。VYAPPS运行实景如图3所示。



图3 VYAPPS运行实景

Fig. 3 The operation scene of VYAPPS

3.2 VYAPPS结构

基于VGE中沉浸式多人协同交互系统结构,VYAPPS采用C/S结构,其动作捕捉端选用HTC vive动作捕捉系统,虚拟世界平台采用High Fidelity。VYAPPS具体结构如图4所示。

动作捕捉端包括3套HTC vive动作捕捉设备。HTC vive使用激光扫描定位技术,即通过对角分布的激光定位器发射激光,在激光扫描的同时,头盔开始计数,传感器接收到激光信号后,利用传感器位置和接收激光时间的关系,来计算用户头部和手部的方向和位置信息,其具备低延迟性能,能满足VYAPPS的实时性需求。

客户端包括安装High Fidelity、各类驱动和应用程序的3台计算机(酷睿i7CPU, NVIDIA GeForce GTX 1080显卡,32G内存)。其中,High Fidelity是由Linden Lab创始人Philip Rosedale在借

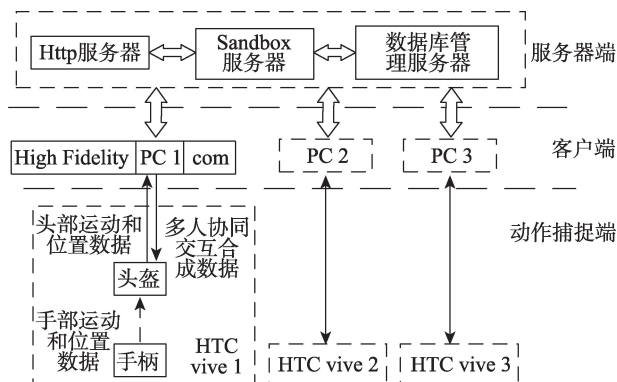


图4 VYAPPS结构

Fig. 4 The structure of VYAPPS

鉴创立Second Life的丰富经验基础上开发的专注于提供基础架构的开源VR平台,开发者可用其免费创建并分享属于自己的虚拟世界。com代表通信模块,负责将HTC vive头盔捕捉到的头部运动和位置数据以及HTC vive手柄捕捉到的手部运动和位置数据发送给服务器端,并负责将多人协同交互合成后的数据同步响应给PC显示器和HTC vive头盔,由High Fidelity完成实时渲染。

3.3 VYAPPS开发过程及实验

本文采用Javascript和Python语言实现VY-APPS,并开展了应用实验。VYAPPS中的VGE由地理数据和模型数据构成,如图5所示。

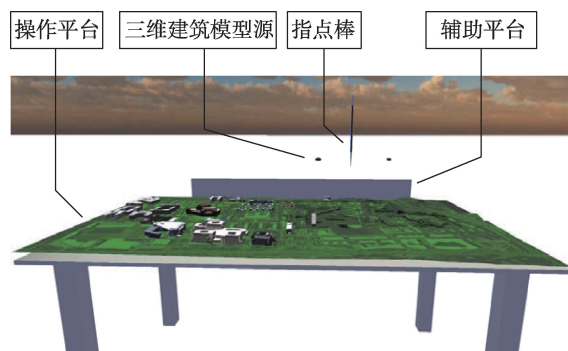
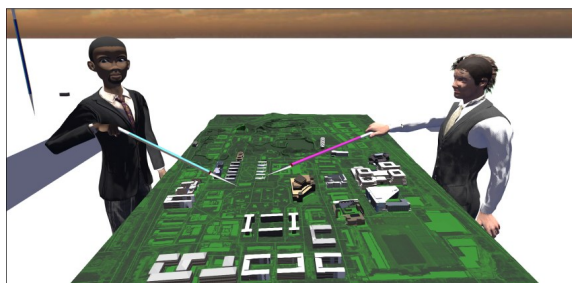


图5 VYAPPS中的VGE

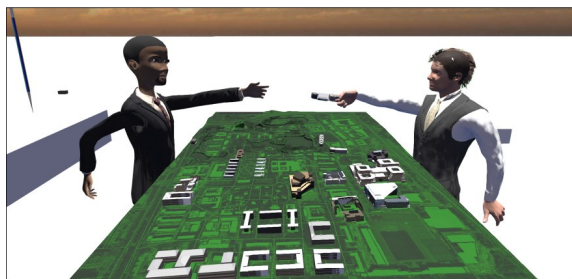
Fig. 5 VGE in VYAPPS

地理数据包括北京大学DEM、北京大学卫星影像数据和北京大学平面地图数据;模型数据包括北京大学三维建筑模型、操作平台和辅助平台。操作平台用于构建VGE的边界范围,辅助平台上放置指点棒和三维建筑模型源。指点棒用于实现用户对虚拟对象的指点操作,三维建筑模型源用于用户对建筑模型的手动生成。

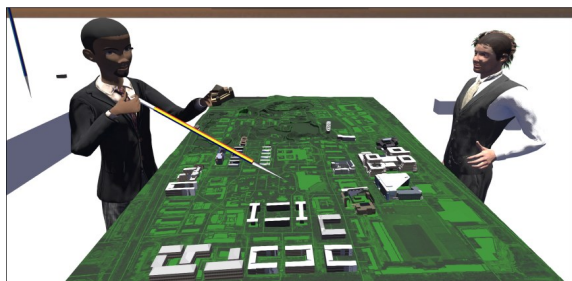
VYAPPS将地理数据融合成基础VGE,并且根据北京大学三维建筑模型信息自动生成建筑,支持3人同时进入,实现了VGE中沉浸式多人协同交互模式中的各类交互动作的交互语义,其中用户之间的研讨、用户之间的传递,用户对虚拟对象的拾取等结果如图6所示。



(a)用户之间的研讨



(b)用户之间的传递



(c)对虚拟对象的拾取

图6 VYAPPS实验结果

Fig. 6 Experimental results of VYAPPS

为了掌握用户对VYAPPS的性能评价和体验评价,设计了包括系统性能和用户体验2个项目在内的问卷调查表,采取很好、一般、很差三级评价。系统性能评价主要包括系统流畅性和捕捉准确率2类内容:系统流畅性指系统可支持用户连续操作一段时间而无眩晕感(≥ 30 min为很好, ≤ 10 min为很差,其他为一般);捕捉准确率是指用户在至少完成20次各类交互动作的条件下的正确识别率(识别率 $\geq 95\%$ 为很好, $\leq 80\%$ 为很差,其他为一般)。用户体验主要是基于与传统的VGE系统的使用体验的

对比,包括交互自由度,操作适应度和多人沉浸度3项。交互自由度指用户在一定的空间范围内交互而非仅局限于计算机前交互的自由程度;操作适应度指用户对系统的操作可否在较短时间内达到操作自如的程度(≤ 5 min为很好, ≥ 15 min为很差,其他为一般);而多人沉浸度则指系统对沉浸式多人面对面协同交互的支持程度。

共收集40名用户对VYAPPS的使用问卷,其中有效反馈35份(教授2人,研究生18人,本科生15人;男性22人,女性13人),其统计结果见表3。实验统计结果表明,VYAPPS在流畅性和捕捉准确率方面保持了较高的性能标准,且与传统VGE中的人机交互应用案例相比,其在支持多人的自然沉浸式交互体验方面有较大的优势,交互效果受到用户认可。

表3 VYAPPS问卷统计结果

Tab. 3 Questionnaire statistics of VYAPPS

项目	具体内容	很好		一般		很差	
		数目	比率/%	数目	比率/%	数目	比率/%
系统性能	系统流畅性	32	91	2	6	1	3
	捕捉准确率	31	88	2	6	2	6
用户体验	交互自由度	34	97	1	3	0	0
	操作适应度	33	94	1	3	1	3
	多人沉浸度	33	94	2	6	0	0

4 结论

本文以VGE中沉浸式多人协同交互研究为重点,在理论方面,介绍了VGE中人机交互技术的研究和应用现状,简要阐述了动作捕捉技术及其最新发展在提高VGE用户交互沉浸感上的优势;在技术方面,根据VGE典型应用需求,分析了基于动作捕捉技术的沉浸式多人协同交互模式,完成了VGE中沉浸式多人协同交互系统设计,并利用Javascript和Python语言开发了VYAPPS,实现了VGE中沉浸式交互由单人操作到多人协同。研究表明,VGE中沉浸式多人协同交互技术在化身之间及化身与虚拟环境之间的沉浸式协同交互方面具有明显的优势,其可为研发与实现城市建设规划、虚拟地质教学和战场态势感知等诸多领域中的沉浸式多人VGE应用提供新的有效方法。

基于惯性捕捉的数据手套(如Noitom Hi5 VR手套)或基于计算机视觉的动作捕捉设备(如Kinect)可获取用户的手部动作细节数据,HTC vive与两者或两者之一的融合可进一步提高VYAPPS动作捕捉端的捕捉准确率,使得多用户的协同交互更为自然。因此为进一步提高VGE用户的交互沉浸感,在动作捕捉端实现多种模式的动作捕捉技术融合将成为下一步的研究内容。

参考文献(References):

- [1] Batty M. Virtual geography[J]. Futures, 1997,29(45):337-352.
- [2] 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. [Gong J H, Lin H. VGE: Geographical perspective of online virtual reality [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.]
- [3] 林琿,龚建华,施晶晶.从地图到地理信息系统与虚拟地理环境——试论地理学语言的演变[J].地理与地理信息科学,2003,19(4):18-23. [Lin H, Gong J H, Shi J J. From maps to GIS and VGE: A discussion on the evolution of the geographic language[J]. Geography and Geo-information Science, 2003,19(4):18-23.]
- [4] 龚建华,周洁萍,张利辉.虚拟地理环境研究进展与理论框架[J].地球科学进展,2010,25(9):915-926. [Gong J H, Zhou J P, Zhang L H. Study progress and theoretical framework of virtual geographic environments[J]. Advances in Earth Science, 2010,25(9):915-926.]
- [5] 万刚,曹雪峰.地理空间信息网格的历史演变与思考[J].测绘学报,2016,45(s1):15-22. [Wan G, Cao X F. The historical evolution and reflection of geospatial information grid[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016,45(s1):15-22.]
- [6] Voinov A, Çöltekin A, Chen M, et al. Virtual geographic environments in socio-environmental modeling: A fancy distraction or a key to communication?[J]. International Journal of Digital Earth, 2018,11(4):408-419.
- [7] 林琿,朱庆.虚拟地理环境的地理学语言特征[J].遥感学报,2005,9(2):158-165. [Lin H, Zhu Q. The linguistic characteristics of virtual geographic environments[J]. Journal of Remote Sensing, 2005,9(2):158-165.]
- [8] Lin H, Chen M, Lu G N. Virtual geographic environment: A workspace for computer-aided geographic experiments [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2013,103(3):465-482.
- [9] 林琿,陈旻.利用虚拟地理环境的实验地理学方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(6):689-694. [Lin H, Chen M. Experimental geography based on virtual geographic environments[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(6):689-694.]
- [10] 贾奋励,张巍巍,游雄.虚拟地理环境的认知研究框架初探[J].遥感学报,2015,19(2):179-187. [Jia F L, Zhang W W, You X. Cognitive research framework of virtual geographic environment[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(2):179-187.]
- [11] 林天鹏,林琿,胡明远,等.基于虚拟地理环境平台的地理设计研究[J].中国园林,2014(10):18-21. [Lin T P, Lin H, Hu M Y, et al. Research on geodesign based on virtual geographic environment platform[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014(10):18-21.]
- [12] 徐丙立,荆涛,林琿,等.利用CryEngine构建虚拟地理环境[J].武汉大学学报·信息科学版,2017,42(1):28-34. [Xu B L, Jing T, Lin H, et al. CryEngine based virtual geographic environments construction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(1):28-34.]
- [13] 胡香,巩保胜,胡建磊,等.面向军事指挥人员空间认知规律的虚拟地理环境设计研究[J].测绘与空间地理信息, 2017,40(10):129-131. [Hu X, Gong B S, Hu J L, et al. Research on the design of virtual geographical environment for military commanders[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017,40(10):129-131.]
- [14] Mekni M. Spatial simulation using abstraction of virtual geographic environments[J]. International Journal of Digital Earth, 2018,11(4):334-355.
- [15] 周洁萍,龚建华,陈铮,等.协同虚拟地理环境中多用户交流交互模式及实现[J].地理与地理信息科学,2005,21(5): 33-37. [Zhou J P, Gong J H, Chen Z, et al. Study on collaborative virtual geographic environment system for multi-user interaction and communication[J]. Geography and Geo-information Science, 2005,21(5):33-37.]
- [16] 郑炼功.协同虚拟战场研讨环境构建理论及技术研究[D].郑州:信息工程大学,2007. [Zheng L G. Research on theory and technology of collaborative virtual battlefield research environment construction[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007.]
- [17] 陈斌,黄凤茹,方裕,等.基于OpenSimulator的分布式虚拟地理环境应用研究[J].高技术通讯,2011,21(12):1272-1278. [Chen B, Huang F R, Fang Y, et al. Distributed virtual geographic environments applications based on OpenSimulator[J]. Chinese High Technology Letters, 2011,21(12):1272-1278.]
- [18] Xu B L, Lin H, Chiu L S, et al. Collaborative virtual geographic environments: A case study of air pollution simulation[J]. Information Sciences, 2011,181(11):2231-2246.
- [19] 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. On thought and meth-

- odology of virtual geographic experiment[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013,30(4):399-408.]
- [20] 江辉仙.地理环境虚拟实验系统[J].实验室研究与探索, 2014,33(11):62-66. [Jiang H X. Virtual experiment system of geographical environment[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014,33(11):62-66.]
- [21] 易思蓉,聂良涛.基于虚拟地理环境的铁路数字化选线设计系统[J].西南交通大学学报,2016,51(2):373-380. [Yi S R, Nie L T. Digital railway location system based on virtual geographic environment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016,51(2):373-380.]
- [22] Menache A. Understanding motion capture for computer animation and video games[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Incorporated, 1999.
- [23] Sturner D J. A brief history of motion capture for computer character animation[C]. Proceeding of ACM Annual Conference on Computer Graphics. New York, USA, 1994.
- [24] 黄波士,陈福民.人体运动捕捉及运动控制的研究[J].计算机工程与应用,2005,41(7):60-63. [Huang B S, Chen F M. Research on human body motion capture and motion control[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(7):60-63.]
- [25] 李晓丹,肖明,曾莉.人体动作捕捉技术综述以及一种新的动作捕捉方案陈述[J].中国西部科技,2011,10(15):35-37. [Li X D, Xiao M, Zeng L. Review on the motion capture technologies[J]. Science and Technology of West China, 2011,10(15):35-37.]
- [26] 李明宇,赵亮,姜军.动作捕捉技术应用研究调查报告[J].科技信息,2011(36):471. [Li M Y, Zhao L, Jiang J. Investigation report on application research of motion capture technology[J]. Science & Technology Information, 2011 (36):471.]
- [27] 向泽锐,支锦亦,徐伯初,等.运动捕捉技术及其应用研究综述[J].计算机应用研究,2013,30(8):2241-2245. [Xiang Z R, Zhi J Y, Xu B C, et al. Survey on motion capture technique and its applications[J]. Application Research of Computers, 2013,30(8):2241-2245.]
- [28] 黄玉飞.动作捕捉技术在体育运动领域的发展现状[J].当代体育科技,2017,7(27):210-211. [Huang Y F. The development status of motion capture technology in sports field[J]. Contemporary Sports Technology, 2017,7(27): 210-211.]
- [29] 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 F J, Dai G Z, Peng X L. A survey on human-computer interaction in virtual reality[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2016,46(12):1711-1736.]
- [30] 赵永惠.人机交互研究综述[J].信息与电脑(理论版),2017 (23):24-28. [Zhao Y H. Survey of human-computer interaction research[J]. China Computer & Communication, 2017(23):24-28.]
- [31] 李小杰,李响.手势识别技术在虚拟地理环境中的应用初探[J].测绘与空间地理信息,2010,33(5):41-44. [Li X J, Li X. Preliminary application of gesture recognition to virtual geographical environment[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010,33(5):41-44.]
- [32] Lin H, Chen M, Lu G N, et al. Virtual geographic environments (VGEs): A new generation of geographic analysis tool[J]. Earth-science Reviews, 2013,126(11):74-84.
- [33] 张晓丽.三维运动捕捉技术在消防模拟训练中的应用[J].武警学院学报,2011,27(8):88-90. [Zhang X L. A research on the application of three-dimensional motion capturing technology in fire simulation training[J]. Journal of Chinese People's Armed Police Force Academy, 2011,27(8):88-90.]
- [34] 陈楠楠,朱东鸣.基于视觉交互的虚拟校园研究[J].中国医学教育技术,2011,25(5):510-513. [Chen N N, Zhu D M. Virtual campus research based on visual interaction[J]. China Medical Education Technology, 2011,25(5):510-513.]
- [35] 陈帼鸾,陆雷敏,何灵辉,等.基于HTC VIVE虚拟校园漫步系统——以中山职业技术学院为例[J].中国科技信息,2017(10):63-64. [Chen G L, Lu L M, He L H, et al. Virtual campus ramble system based on HTC VIVE-taking Zhongshan Polytechnic as an example[J]. China Science and Technology Information, 2017(10):63-64.]
- [36] 杨光辉,马纯永,韩勇,等.基于Kinect的虚拟展馆游览系统的设计与实现[J].计算机技术与发展,2014(6):174-178. [Yang G H, Ma C Y, Han Y, et al. Design and implementation of virtual pavilion tour system based on Kinect technology[J]. Computer Technology and Development, 2014(6):174-178.]
- [37] 霍宇平,张秀娥,李兵,等.运动捕捉技术在变电站虚拟环境中的应用研究[J].系统仿真学报,2016,28(10):2632-2637. [Huo Y P, Zhang X E, Li B, et al. Research on motion capture in substation virtual environment[J]. Journal of System Simulation, 2016,28(10):2632-2637.]