

# 分布式地学虚拟环境研究

龚建华 林 珩

(中国科学院/香港中文大学地球信息科学联合实验室, 香港)

**摘 要** 讨论了分布式地学虚拟环境的概念、特征以及与 GIS 的相互关系。从系统结构、数据模型、交互界面和开发工具方面,对分布式地学虚拟环境的系统框架进行了研讨。最后,从理论、技术和应用层面介绍了关于分布式地学虚拟环境的研究热点和难点,并讨论了进一步的研究方向。

**关键词** 虚拟现实 地学虚拟环境 虚拟地理信息系统 化身 虚拟现实 构模语言 Java 因特网

**中图法分类号:** TP391.9 P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)09-0879-07

## Study on Distributed Virtual Geo-Environments

GONG Jian-hua, LIN Hui

(Department of Geography & Joint Laboratory for Geo-information Science, Chinese Academy of Sciences/  
The Chinese University of Hong Kong, New Territories, Hong Kong)

**Abstract** Distributed virtual environments are the integration of virtual environments and network. Distributed virtual geo-environments (Geo-DVE) are virtual environments for studying geo-phenomena and geo-process. This paper discusses the concept and characteristics of Geo-DVE, and the relationship between GIS and Geo-DVE. The system design of Geo-DVE is addressed in terms of system architecture, data model, system interface, and programming tools. The paper eventually presents the hot research topics and frontiers regarding Geo-DVE from three aspects of theory, techniques, and applications. In terms of system architecture, data model, system interface, and programming tools. The paper eventually presents the hot research topics and frontiers regarding Geo-DVE from three aspects of theory, techniques, and applications. In terms of aspect of theory, the research challenge and frontiers include the relationship between virtual environments and physical geographic environments, geo-spatial and temporal cognition in virtual environments, 3-D data model of virtual environments. In terms of aspect of techniques, rapid dynamic 3-D modeling, real-time communication and interaction, shared space and operation for multi-users, geo-process models based virtual environments, distributed collaborative work and group decision making support, and wearable mixed reality are included. In terms of aspect of applications, the building and development of further practical functions of 3-D digital cities and 3-D digital communities, visual data mining and knowledge discovery, virtual tourism, virtual battlefield, and virtual decision support environments for regional sustainable development should be highlighted.

**Keywords** Virtual reality, Distributed virtual environments, Virtual geographic information systems, Virtual geo-environments, Avatar, VRML, Java, The internet

## 0 引 言

虚拟环境,又称虚拟现实,是由计算机、网络、传感器等技术组成的一个系统,该系统可让人在计算

机产生的一个虚拟三维空间环境中,自由地行走探索,并可多感知地与他人或其他虚拟物体进行交互<sup>[1]</sup>。虚拟环境,有 3 种类型:投入型虚拟环境,分布式非投入型虚拟环境和混合现实环境<sup>[1,2]</sup>。目前,投

入型和分布式非投入型虚拟环境,由于因特网数据传输容量和速率的限制、用户计算机图形计算和处理能力局限、以及立体双眼视觉设备在单机上的不普及性,使两者的发展基本上是分开的,并没有集成在一起。但是随着下一代高性能因特网(因特网Ⅱ)的发展以及计算机性能的提高,投入型虚拟环境会逐渐地与因特网融合,演化为分布式投入型虚拟环境(简称分布式虚拟环境)。本文的分布式地学虚拟环境探讨,主要侧重于虚拟环境的分布特性。虚拟环境,可有许多不同的应用领域,如医学、机械设计和制造、军事、建筑与城市规划、教育与培训、决策及大众娱乐等。应用虚拟环境技术处理和分析地学现象和环境,已有许多研究和试验<sup>[3~6]</sup>。Faust和Koller等在90年代初期比较成功地进行了地理信息系统和虚拟现实系统的集成试验,并提出虚拟地理信息系统概念<sup>[7,8]</sup>。Coor与Jung应用VRML设计了三维数据模型,并用Java建立了与VRML三维场景的交互界面<sup>[9]</sup>;Hibbard则应用Java2D和Java3D,设计开发了VisAD可视化环境系统,用于分析海洋、大气等多维地学数据<sup>[10]</sup>;Dykes等在虚拟野外实习课项目中,用网络插件(networked components)建构了用于地理教学和野外实习的虚拟环境<sup>[11]</sup>。另外,数字地球概念的提出与所引起的广泛讨论和实践,对虚拟环境技术的发展和用有着深远的影响<sup>[12,13]</sup>。

## 1 Geo-DVE 概念与特征

分布式地学虚拟环境(distributed virtual geo-environments, 简称 Geo-DVE)是基于因特网、万维网的多用户虚拟三维环境,可用于发布地学多维数据,模拟和分析复杂的地学现象过程,支持可视和不可视的地学数据解释、未来场景预见、设计规划、协同工作和群体决策等;同时它也可以用于地理教育、旅游和娱乐<sup>[1,14]</sup>。

Geo-DVE一般具有如下特征:(1)因特网和万维网作为 Geo-DVE 存在和发展的基础,是分布式的异构开放环境,它要求 Geo-DVE 可让一般用户使用标准的万维网浏览器,就可以连接和进入虚拟环境;(2)在 Geo-DVE 中,多用户之间的信息通信、传输,系统之间的共享三维对象传输,要求是(准)实时快速的;(3)用户与三维图形世界的交互是(准)实时的,这要求快速的三维世界图形计算和显示能力;(4)用户在 Geo-DVE 中,一般是以三维化身表

达,用户之间的交互则通过化身、文本、以及声音或实时传输的视像等进行;(5)三维图形世界和各种三维对象是分布式共享的;(6)三维图形世界既描述地球科学中的可视空间现象,如地形、地貌、地层、海洋、城市等,也可以描述不可视空间现象,如温度、风场、人口分布等;(7)用户在三维虚拟环境中,除了可作三维空间探索行走外,还可以进行地学数据查询、空间分析等。作为一个新的发展方向,Geo-DVE与在线社群(社区),网上三维图形、CAD和可视化,以及地理信息系统的发展密切相关<sup>[1]</sup>。

图1表示 Geo-DVE 与 GIS 的相互关系。

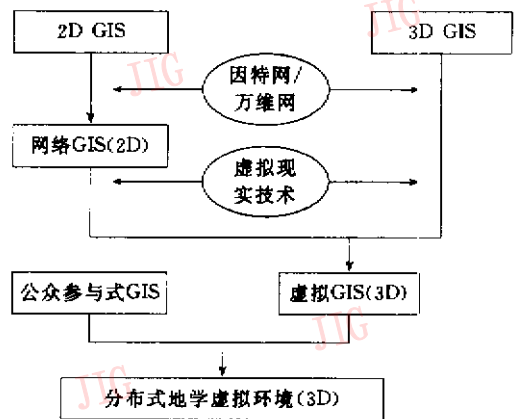


图1 分布式地学虚拟环境与GIS的相互关系

传统二维 GIS 通过与因特网/万维网技术的结合,形成二维的网络 GIS,通过扩展其二维数据模型,再与虚拟现实技术结合,形成分布式三维虚拟 GIS。另一方面,分布式三维虚拟 GIS,也可理解为三维 GIS 和网络及虚拟现实技术的直接集成(见图1)。分布式三维虚拟 GIS,还不是 Geo-DVE。由于 Geo-DVE 考虑人与人之间的社会交流互动,把用户置于系统的核心地位,考虑人在三维虚拟世界中的多感觉认知、亲身体验及其自然交互,Geo-DVE 的用户就不仅仅是面对专家和专业用户,更主要的是面对普通大众。所以,Geo-DVE 的形成与发展,从 GIS 角度看,需要考虑具有社会特性的大众参与式 GIS 的理论和方法与分布式三维虚拟 GIS 的集成和融合。Geo-DVE,是 GIS 的发展,它与传统的二维和三维 GIS 相比较,有如下特点:(1)传统 GIS,以现实地理世界为核心,其数据模型把表达世界的完备性,作为考虑的重点;Geo-DVE 以用户(人)为核心,其数据模型在考虑完备地表达地理环境外,还要考虑用户与地理环境在相互作用时的实时动态关系。(2)传统 GIS 是系统工具,用户的生理感知空间

与数据空间相分离;Geo-DVE 提供用户一个虚拟空间,该虚拟空间与现实空间相对应,用户在虚拟空间中可“走”,可“游”,可观察和分析,用户的生理感知空间与数据空间相合为一。(3)传统 GIS 的用户是一个观察者,以“旁观者”身份、“外观察”方式研究世界;Geo-DVE 的用户是一个参与者,以“内观察”方式体验并研究世界。(4)传统 GIS 较少考虑用户在虚拟数据空间中的动态行为以及(分布式)用户与用户之间的相互关系,较少考虑用户的心理和社会特性,用户一般是专家;Geo-DVE 把用户以化身表达,并连接多用户在共享空间中的关系,考虑用户的心理和社会特性,用户可以是普通大众。

## 2 Geo-DVE 系统设计与开发

根据 Geo-DVE 的特征,要建立一个可运行的虚拟环境,必须考虑因特网、万维网环境下的系统通信与运行结构,三维图形实时计算与显示的数据模型,适合地学数据显示、分析、合作研究的用户界面,以及基于因特网系统开发工具如 VRML 与 Java 的集成应用等等。

### 2.1 系统结构

基于因特网地学虚拟环境的数据通信结构,一般采用单服务器的客户端/服务器结构,而当用户数量增加时,可采用多服务器的客户端/服务器结构,或者目前因特网环境下最新发展的对等结构(peer-to-peer)<sup>[15]</sup>。因特网环境下的数据通信传输协议,可采用 TCP/IP 协议、UDP/IP 协议或 IP 多分发协议(IP Multicasting)。图 2 表示基于客户机/服务器结构的 Geo-DVE 的一般系统结构。在服务器端,包括应用程序服务器和数据库服务器,其中应用程序服务器包括诸如用户管理服务器,VRML 场景生成服务器和空间分析服务器等;在客户端,包括三维虚拟世界浏览器和应用程序,其中应用程序包括诸如用户对话管理模块、数据量测模块、二维图形显示管理模块等。

用户的任务处理,有的在客户端由应用程序

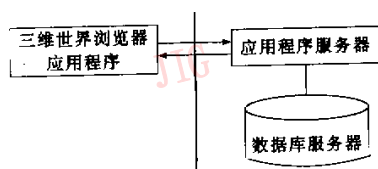


图2 Geo-DVE的一般系统结构

执行,有的在服务器端执行。如果在服务器端,那么服务器接受请求后,会运行服务器端应用程序,待处理完成后,就把结果传回到客户端。各个客户端上变化后的关于用户的三维化身空间位置、朝向信息、对话信息等,会传到服务器,并再由服务器把该信息传送到其他客户端。

### 2.2 数据模型

根据分布式地学虚拟环境的特征,地学数据是以三维或多维为主的,数据库应该是三维数据库。地学数据有许多种类,自然方面有地形、地貌、地质、海洋、大气等数据;人文方面则有建筑物、道路、各类设施、人口分布等,并各有其不同的特点,例如地质数据是表达三维空间的,以静态为主;海洋数据是表达四维时空的,以动态为主。所以,从表达现实地理环境的完备性看,设计统一的三维数据模型和数据结构,目前仍有很大的难度。另一方面,虚拟现实技术要求考虑地学对象在用户的视觉、听觉、触觉等方面的特征,所以,虚拟环境数据模型,除了考虑完备表达地理对象和关系外,还要考虑地理环境与人的交互关系。

在地理景观系统中,地形景观对象,是地学虚拟环境中最重要的一个地理对象,它是虚拟环境的三维空间基础。地形景观对象一般包括三维空间分布属性、地理专题属性、遥感影像数据等。考虑到网络数据的传输、三维图形实时处理和显示能力、地物目标与观察者/参与者的距离远近与速度大小、以及多用户在不同空间区域的分布与交互等,一般采用空间分区以及多层次空间分辨率的方法,对地形景观对象进行构模。地理景观系统中,同时还存在大量的边界清晰,功能完整,在空间上离散分布的独立地物个体,例如,森林生态系统中的草、灌、树等;人工生态系统中的房屋、道路、汽车、亭子、桥等。这些离散实体地理对象,一般可用 CAD 模型、分形模型、人工生命技术等进行三维处理与表达,同时也必须应用多层次表达法建立每一个对象的多层次空间与属性模型,以提高数据传输、图形绘制和交互速度。

### 2.3 交互界面

在虚拟环境中,用户与用户、用户与三维世界之间可进行(准)实时动态交流与交互。在分布式虚拟环境中,用户与用户的通信交互实现,一般采用基于三维化身和文本对话、声音实时对话、或实况视像传播相结合的综合方式。用户在以三维化身表达时,可以选择当事人或第三者交互方式。

地学虚拟环境是以三维虚拟空间为其存在的基础,所以用户与三维虚拟世界的三维交互视窗是最基本的.在三维视窗中,用户可用主观方式或客观方式观测三维虚拟世界.主观方式,表示用户在三维空间内行走、探索,有很强的融入感和参与感,这与人在城市中穿越街道的空间感知相类似;客观方式,也可称为鸟瞰方式,它表示用户在高处观测三维虚拟世界,这类似于人在飞机上观看地面景观.

但当三维虚拟世界的空间非常广大和复杂时,用户在三维虚拟空间的探索极容易迷失方向,这时需要有一个关于虚拟世界的二维导航图,它与虚拟世界的三维视窗相对应.另外,应该强调的是,虽然地学虚拟环境是以三维空间为主,但涉及小比例尺的地学问题、整体的客观观察要求以及大量常规的二维地学表达和分析模式时,二维空间表达同样不可缺少.

用户除了在虚拟世界中行走、探索外,还可以进行地学对象查询、对象修改、模型计算、数据分析等.所以在人机交互界面设计时,必须考虑人与人、人与三维空间、人与地学计算和分析的相互作用关系<sup>[16,17]</sup>.

#### 2.4 开发工具

Geo-DVE 系统的具体设计开发,有许多种模式<sup>[1,18]</sup>,例如应用 Java 和 Java3D, XML 和 CORBA<sup>[19]</sup>, VRML 和 Java 等从底层开发,或应用已有的分布式虚拟环境系统和开发库作二次开发,例如 Batty 等应用 Activeworlds 网络虚拟环境系统建立用于城市规划的地学虚拟环境<sup>[20]</sup>.不同的模式,具有不同的开发特点和工作量.如果应用 Java 和 Java3D,客户端的三维世界浏览器就要自行开发;应用 XML 和 CORBA 开发模式,由于 CORBA 是当前计算机界广泛采用的完全开放分布式网络平台,有很好的、很清晰的网络结构概念和技术框架,并与操作系

统和编程语言无关,同时 XML 可以表达高度结构化的数据,在计算机工业界被广泛接受,所以该开发模式是一种在更一般意义上的网络信息系统设计,而集成技术以及考虑以三维虚拟空间为核心的系统特征,是该开发模式需要考虑的关键因素;应用 VRML 与 Java 模式,由于三维图形的计算与生成、用户行走或飞行探索、交互等,都由 VRML 世界浏览器完成,而 VRML 世界浏览器如 Cosmo Player, Blaxxun Contact 等在因特网上均可免费下载和使用<sup>[21,22]</sup>,所以,开发者可把主要精力放在数据模型,三维地理对象库的构建,以及用户之间、用户与三维地理世界的交互程序的开发上. VRML 与 Java 开发模式的特点,其实是来自于不同领域专家的一种合作开发.计算机图形专家,负责三维图形的生成与显示;而地学应用系统开发者,负责地学数据的准备、构模、以及数据查询、分析的 Java 程序设计等.

应用客户端/服务器结构、VRML 和 Java 以及 HTTP 协议,设计开发了虚拟香港中文大学(图3).图3左图表示虚拟中文大学的系统界面,右图是虚拟中文大学崇基学院的三维全景图.左图左上角是三维世界浏览窗口,其中的两个化身表示在线用户;左图右上角是用于参数选择、数据库查询、地理坐标量测、三维对象增加或删除等操作的菜单;左图左下角是用户间互相交流的文本对话窗口;左图右下角是对应于三维世界的二维图,用于选择区域或作三维导航.应该指出,应用客户端/服务器结构以及传统的 HTTP 协议模式开发的 Geo-DVE,在处理大数据量、极大在线用户量、以及多媒体尤其是声音和视像信息资料时,在支持快速实时的网络通信以及交互能力上有局限性.所以,必须研究和采用新的网络通信结构和新的面向分布式虚拟环境的网络协



图3 虚拟香港中文大学

议,例如,Web3D 组织中有一工作小组专门研究如何应用客户端/服务器结构、对等结构、虚拟现实协议(virtual reality transfer protocol)、VRML 和 Java 设计大型的分布式虚拟环境<sup>[23]</sup>。

### 3 关于 Geo-DVE 的研究热点和难点

目前,Geo-DVE 的研究热点和难点,在理论层面上主要包括虚拟环境和现实地理环境的相互关系,虚拟环境的空间认知和虚拟环境数据模型;在技术层面上主要包括快速三维动态建模,实时交互技术,共享空间和共享操作,基于地学过程模型的虚拟环境,分布式协同工作和群体决策,及穿戴式混合现实;在应用层面上主要包括数字城市、数字社区(数字小区)的建设与应用深化扩展<sup>[24,25]</sup>,可视数据挖掘和知识发现<sup>[26]</sup>,虚拟旅游,虚拟战场环境,区域可持续发展虚拟决策支持环境等。

#### 3.1 在理论层面上

##### (1) 虚拟环境和现实地理环境的相互关系

地学虚拟环境主要用于对现实地理环境现象与过程的分析理解,用于解决地学问题。但地学虚拟环境本身也是一种空间,在这空间中,可表达人在现实地理环境中无法感知和体验的现象和事物。另外,地学虚拟环境还可以表达在逻辑上可能存在的而在现实中不存在的地学现象<sup>[27]</sup>,即可把地学专家的思想试验变成虚拟环境的具有时间和空间的地学、地理试验。所以,虚拟环境和现实地理环境的相互关系的地理哲学和认识论研究和分析,有助于加强对地学虚拟环境的深刻认识。

##### (2) 虚拟环境的空间、时间认知

在 Geo-DVE 中,虚拟空间和虚拟时间对应表达的是现实地理环境中的地理空间和地理时间。但对于虚拟空间和虚拟时间,人的感知、认知经验和知识,认识很少。虚拟空间和时间对于认识和理解现实地理环境中的时间、空间以及地学现象和过程;有何种特点和规律,以及如何有效和高效地设计虚拟环境、虚拟空间、虚拟时间、虚拟现象和过程<sup>[28]</sup>,是虚拟环境研究中的难题。它的解决需要大量的试验研究以及与其他学科如心理学专家的交叉合作。

##### (3) 虚拟环境数据模型

虚拟环境数据模型是真三维的。由于三维地理环境现象的复杂性和动态性,三维数据模型以及三维 GIS、时空四维 GIS 的研究方兴未艾。能够表达大气、海洋、地下实体(地质、煤矿、洞穴、油气)、城市

等各种地学现象和过程的统一三维数据模型目前还不存在,所以,专业三维数据模型和数据结构仍是目前研究的重点。另外,传统的三维数据模型和结构是以目标世界的表达完备性以及一定效率的查询和分析能力而设计的。虚拟环境数据模型,还须考虑实时的人与虚拟三维环境(三维数据)在视觉、听觉、触觉等上的交互关系,所以,虚拟现实技术在与传统二维和三维 GIS 数据模型的结合中,应研究新的可感知三维数据模型。

#### 3.2 在技术层面上

##### (1) 快速三维动态建模

如何综合地应用摄影测量、GPS、遥感、图象和计算机视觉等技术,快速地获取三维空间数据,并融合其他属性数据、多媒体数据,来建立地学虚拟环境是一个研究热点<sup>[25]</sup>。三维数据快速建模与地学虚拟环境数据模型密切相关<sup>[24]</sup>。

##### (2) 实时交互技术

虚拟环境的一个重要特征是,人与虚拟空间和虚拟对象的互动是快速实时的。针对大数据量,不同比例尺度的地理环境,如何应用网络分布式技术和 LOD(level of detail)技术,如何利用人的感知和视觉特性等,实现快速实时的三维图形计算和绘制、平滑的快速的快速的空间漫游、实时的交互能力,是目前研究的热点和难点。

##### (3) 共享空间和多用户操作

在 Geo-DVE 中,众多的在线用户是在同一个共享虚拟空间中活动,任何人的空间移动,或操作(如添加、移动、或删除某一物体),任何其他人都能立刻看到变化后的效果。所以,共享空间和多用户操作是虚拟环境服务器端应用程序和数据库必须仔细设计和考虑的。

##### (4) 基于地学过程模型的虚拟环境

目前的地学虚拟环境,大多是关于三维地理景观的虚拟表达。进一步的工作应该是建立基于地学过程模型的虚拟环境。这个虚拟环境,既可以用于模型的设计、构建、计算、可视模拟、检验和改进,又同时是一种可体验的环境,让用户实时控制和观察模型在不同条件下的行为,这对于模型的建立和进一步应用,具有重要的意义。

##### (5) 分布式协同工作和群体决策

解决一个复杂的地学问题,例如城市规划、区域可持续发展等,需要一个领域的许多专家,或者多个领域的多个专家,或者市民大众的参与合作,才能有

效地完成<sup>[29]</sup>. Geo-DVE 可以让不同地方的人,通过化身同时进入一个网上共享虚拟空间,进行协同工作和群体决策.如何设计有效的基于多用户合作研究的人机界面,如何组织、协调和管理来自不同领域的专家经验知识,如何形成和表达集聚群体知识;是 Geo-DVE 支持协同工作和群体决策的关键问题.

#### (6) 穿戴式混合现实

混合现实(mixed reality),同时考虑计算机图形构模的虚拟世界和丰富多彩的现实世界,以及它们两者之间的无缝合成,它包括扩展现实(augmented reality)和扩展虚拟(augmented virtuality)<sup>[1,30]</sup>.随着移动式计算机和穿戴式计算机的发展,通过综合应用全球定位系统(GPS)、移动穿戴式计算机、头戴型跟踪穿透式显示器(tracked see-through head-worn display),方向跟踪器等技术,建立混合现实环境,对地理学野外工作和实践,对旅游业发展等有着重要的应用价值.

### 3.3 在应用层面上

不同的应用目标,对于 Geo-DVE 的设计和构建,具有不同的要求,例如,对于数字城市、数字小区和虚拟旅游,虚拟环境必须尽可能模拟现实地理景观和环境,达到尽可能相似、相像;但是当虚拟环境用于可视数据挖掘和知识发现,用于区域可持续发展决策支持时,其系统设计则不是以“相似”、“相像”为主要目标,而是应有利于知识的发现或可持续发展问题的分析或模型的计算.

Geo-DVE 在不同专业领域的应用及其深化,将会展露深一层的问题,从而促进 Geo-DVE 在理论方法和技术上的发展.例如,虚拟战场环境的研究表明,在虚拟环境中,除了数据建模外,还必须要有行为建模和动态建模等<sup>[31]</sup>.

## 4 结 语

虚拟现实是人机交互界面的终级发展,Geo-DVE 是虚拟现实、网络、GIS 和传感器等技术的集成系统. Geo-DVE 目前还处于研究和试验阶段.

地学虚拟环境,为用户提供一个虚拟空间和世界,然后让多用户以化身虚拟地进入该空间和世界,并“身临其境”地分析现实地理环境中的现象和过程,对于地学的理论和方法发展、地学的实践与应用,具有重要的意义. Geo-DVE 可以认为是一个地学虚拟实验室或平台,也可以认为是一种新的地理学语言.

## 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 Durbin J, Swan J E, Colbert B *et al.* Visualization on the responsive workbench[A]. In: Proceedings IEEE Visualization '98[C], North Carolina: IEEE Computer Society Press, 1998, 463~466.
- 3 Doyle S, Dodge M. Toward virtual london: Developing a Virtual Internet GIS [A]. In: Proceedings of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with Geographical Information Systems [C], Hong Kong, 1998;624~629.
- 4 Fairbairn D, Parsley S. The use of VRML for cartographic presentation [EB/OL]. ICA Working Papers. [http://www.geog.psu.edu/ica/icavis/ICAVIS-working\(1\).html](http://www.geog.psu.edu/ica/icavis/ICAVIS-working(1).html), 1997.
- 5 Gong Jianhua, Lin Hui. Developing virtual environments for country parks[A]. In: Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry [C], Michigan, Ann Arbor: Published by ERIM International, Inc., 2000, II:184~191.
- 6 Rhyne T M. A commentary on Geo VRML: a tool for 3D representation of georeferenced data on the web [J]. Int. J. Geographical Information Science, 1999, 13 (4): 439~443.
- 7 Faust N L. The virtual reality of GIS [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1995, 22: 257~268.
- 8 Koller D, Lindstrom P, Ribarsky W *et al.* Virtual GIS: A real-time 3D geographic information system [EB/OL]. <http://www.gvu.gatech.edu/gvu/virtual/VGIS/>, 1995.
- 9 Jung V C. Using VRML as an interface to the 3D data warehouse [EB/OL]. <http://ece.uwaterloo.ca;80/vrml98/cdrom/papers/coors/>, 1997.
- 10 Hibbard B. VisAD: Connecting people to computations and people to people [J]. IEEE Computer Graphics, 1998, 32 (3): 10~12.
- 11 Dykes J, Moore K, Wood J. Virtual environments for student fieldwork using network components [J]. Int. J. Geographical Information Science, 1999, 13(4): 397~416.
- 12 承继成,林琿,周成虎等. 数字地球导论[M]. 北京:科学出版社, 1999, 65~73.
- 13 Gore A. The digital earth: Understanding our planet in the 21st Century [EB/OL] (given at the California Science Center, Los Angeles, California, on January 31, 1998). <http://www.digitalearth.gov/VP19980131.html>, 1998.
- 14 MacEachren A M, Edsall R, Haug D *et al.* Exploring the potential of virtual environments for geographic visualization [EB/OL]. <http://www.geovista.psu.edu/publications/aag99vr/fullpaper.htm>, 1999.
- 15 Singhal S, Zyda M. Networked virtual environments: Design and implementation [M]. New York: ACM Press. SIGGRAPH Series, 1999, 1~17.

- 16 Van Maren G, Germs R. K2VI: A virtual reality interface for the spatial database engine [EB/OL]. <http://www.infosystems.co.nz/k2vi/esri/p551.htm>, 2000.
- 17 Verbree E, Maren G V, Germs R *et al.* In-teraction in virtual worlds views-linking 3D GIS with VR[J]. *Int. J. Geographical Information Science*, 1999, 13(4): 385~396.
- 18 Lin Hui, Gong Jianhua, Wang Freeman. Web-Based Three-Dimensional Geo-Referenced visualization [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(10): 1173~1181.
- 19 谢传节, 周成虎. 基于 XML 和 CORBA 的网络虚拟 GIS 设计 [A]. 见: 第一届“虚拟现实与地理学”研讨会交流论文[C], 深圳: 2001 年 5 月 29 日~30 日.
- 20 Batty M, Didge M, Doyle S *et al.* Modeling virtual environments[A]. In: Longley P A *et al.*, eds. *GeoComputation: A Primer*[C]. New York: Jone Wiley & Sons, 1998, 139~161.
- 21 Blaxxun[EB/OL]. <http://www.blaxxun.com/>, 2001.
- 22 Cosmo[EBOL]. <http://www.cai.com/cosmo/>, 2000.
- 23 VRTP. Virtual reality transfer protocol[EB/OL], <http://www.web3d.org/WorkingGroups/vrtp/>, 2001.
- 24 朱庆. 数码城市 GIS 软件——CCGIS 的设计与实现[A]. 见: 第一届“虚拟现实与地理学”研讨会交流论文[C], 深圳: 2001 年 5 月 29~30 日.
- 25 陈爱军, 史元春, 徐光佑. 与 WebGIS 集成的自动虚拟城市建模 [A]. 见: 第一届“虚拟现实与地理学”研讨会交流论文[C], 深圳: 2001 年 5 月 29~30 日.
- 26 Rohrer R M, Swing E. Web-based Information Visualization [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, July/August 1997, 53~59.
- 27 马震乃. 地理科学与地理信息科学论[M]. 武汉: 武汉出版社, 2000.
- 28 MacEachren A M, Kraak M J, Verbree E. Cartographic issues in the design and application of geospatial virtual environments [EB/OL]. <http://www.geovista.psu.edu/publications/ica99>, 1999.
- 29 Brewer I, MacEachren A M, Abdo H *et al.* Collaborative geographic visualization: Enabling shared understanding of environmental processes[EB/OL]. <http://www.geovista.psu.edu>, 2001.
- 30 Milgram P. A taxonomy of real and virtual world display integration[A]. In: Ohta Y, Tamura H, eds. *Mixed Reality-Merging Real and Virtual Worlds*[C]. Chiyodaku, Tokyo & New York: Ohmsha, Ltd. & Springer-Verlag, 1999, 5~27.
- 31 游雄. 基于虚拟现实技术的战场环境仿真研究[A]. 见: 第一届“虚拟现实与地理学”研讨会交流论文[C], 深圳: 2001 年 5 月 29~30 日.

龚建华 1965 生, 1995 年获北京大学遥感与地理信息系统研究所理学博士学位, 现在中国科学院和香港中文大学地球信息科学联合实验室做合作研究. 研究方向包括地学可视化、虚拟地理环境及区域可持续发展等. 发表论文 30 余篇.

林 琿 1954 生, 1992 年获美国布法罗大学博士学位, 现任中国科学院和香港中文大学地球信息科学联合实验室主任. 目前研究方向包括虚拟地理环境、雷达和高光谱遥感、投资环境信息系统、滑坡和海岸带变化等. 发表学术 80 余篇、专著 3 部.