

# 面向数字地球的虚拟现实系统关键技术研究

刘占平 王宏武 汪国平 董士海

(中国科学院计算技术研究所智能信息处理开放实验室, 北京 100080)

(北京大学计算机科学技术系图形研究室, 北京 100871)

**摘要** 研究了面向数字地球的虚拟现实系统关键技术, 提出了多层次场景引擎(MLSE)、视点相关动态多分辨率地形模型(VDDMTM)和 ActiveX 构件网络模型。MLSE 采用层机制集成多元数据, 实现场景绘制和交互。VDDMTM 基于四叉树表示多分辨率地形, 并结合多分辨率纹理映射, 根据视点位置对大规模地形实时简化, 既提高了场景绘制速度, 又保留了视点相关细节。网络模型采用基于 Client/Server 结构的 ActiveX 构件方案, 既满足数字地球的建模特性, 又支持标准的 WWW 浏览器。在此基础上开发了一个面向数字地球的原型系统——虚拟地球系统 VES (Virtual Earth System), 并用于虚拟永定河和喜马拉雅山。

**关键词** 数字地球 虚拟现实 场景引擎 多分辨率 纹理映射 ActiveX 构件

中图法分类号: TP391.72 P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2001)12-0160-05

## Research on Key Issues for Digital Earth Oriented Virtual Reality System

LIU Zhan-ping, WANG Hong-wu, WANG Guo-ping, DONG Shi-hai

(The Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Institute of Computing Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Graphics Laboratory, Department of Computer Science & Technology, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** This paper addresses several key issues for digital earth oriented virtual reality system, with multi-layer scene engine (MLSE), view-dependent dynamic multiresolution terrain model (VDDMTM), ActiveX component based network model discussed. By means of scene layer, MLSE enables multi-varieties integration, scene rendering and user interaction. Quad-tree structure is used for multi-resolution terrain representation. View-dependent terrain simplification and multi-resolution texture mapping are applied to keep ROI (Region of interest) details and accelerate rendering. Client/Server based ActiveX network model not only meets specific needs for geo-data modeling, but also well supports WWW browsers. Based on above research, a prototype system, virtual earth system (VES), was developed to visualize YongDing River and Mountain Himalayan.

**Keywords** Digital earth, Virtual reality, Scene engine, Multi-resolution, Texture mapping, ActiveX component

## 0 引言

美国前副总统戈尔的数字地球(Digital Earth)构想<sup>[1]</sup>一经提出, 即引起了各方面的广泛关注, 许多国家都在积极开展关于数字地球的研究与探索工

作。数字地球试图在全球范围内建立一个基于地理位置, 并将各领域信息组织、融合起来的复杂虚拟现实系统, 使人们沉浸式、交互、灵活地浏览所需信息, 其中包括地形、河流、森林、建筑, 乃至经济、科学、文化、教育等信息。

数字地球涉及到大规模计算、海量存储、卫星遥

基金项目: 国家自然科学基金项目(60033020); 高校骨干教师基金项目

收稿日期: 1999-11-04; 改稿日期: 2001-04-13

感、宽带网络、互操作、元数据(Meta data)等支撑技术，并需要以虚拟现实(VR; Virtual Reality)、地理信息系统(GIS; Geographical Information System)和互联网(Internet)为基础。数字地球首先是一个虚拟现实系统，人们通过视、听等感官身临其境地浏览所需信息；其次通过GIS组织海量的地理相关信息；同时基于Internet构架一个全球信息网络，实现资源共享。

## 1 相关研究

数字地球是一个崭新概念，但基于卫星遥感、航测和GIS数据的虚拟现实系统的研究早已有之，如美国Brimson实验室和Minnesota大学自然资源研究所结合科学计算可视化和地理信息系统曾设计了一个浏览地形的虚拟现实系统<sup>[2]</sup>；瑞典联邦理工学院和Zuerich大学联合开发了ViRGIS(Virtual Reality based Geographics Information Systems)<sup>[3]</sup>，其基于GIS数据，实时、交互地绘制三维场景；英国Nottingham大学计算机系和地理系基于虚拟现实、GIS和计算机支持协同工作研究空间决策支持系统在环境规划方面的应用<sup>[4]</sup>；1998年6月Microsoft公司开发出TerraServer<sup>[5]</sup>，将全球卫星航测影像存储在Microsoft SQL Server数据库中，并通过Internet向全球发布，该系统存储着世界上最大的地图，包含USGS(United States Geological Survey)5TB影像数据，但TerraServer只提供二维交互，其并非是真正的虚拟现实系统；1998年11月SRI公司采用VRML技术实现了一个基于WWW的数字地球原型系统<sup>[6]</sup>，并对多分辨率地形和GIS作了深入研究；美国环保署在环境决策支持系统中，集成GIS、科学计算可视化以及WWW组件<sup>[7]</sup>，其可视化中心结合Arc/Info和AVS(Advanced Visual System)实现了空间数据实时可视化，而且完成了GIS的WWW用户界面和可视化文件服务器。宾西法尼亚大学的Apoala计划<sup>[8]</sup>集成时空地理信息、可视化和数据分析，开发了一个用于生态管理的环境风险预测与决策支持系统。此外，一些流行的GIS商业软件，如MapInfo、Arc/Info等都提出三维可视化方案，但这些软件和系统还不能处理数字地球这样大规模、大范围的三维乃至多维虚拟场景。

基于GIS的虚拟现实系统，从需求和技术角度

而言是初级的面向数字地球系统。真正的数字地球要求在虚拟建模理论和可视化理论，例如：面向多来源、多维海量信息建模，基于智能体建模，面向数字地球的虚拟建模语言规范，无级比例尺数字地面模型生成与绘制，数字地面模型智能化信息提取与重建理论等方面有新突破。

## 2 关键技术

面向数字地球的虚拟现实系统涉及许多关键技术，在此集中讨论多层次场景引擎、视点相关动态多分辨率地形模型和嵌入式构件网络模型。

### 2.1 多层场景引擎

多层次场景引擎(MLSE; Multiple Layer Scene Engine)负责场景的多元数据(Multi-variates)导入、管理、绘制和交互，是虚拟现实系统的核心。

(1) 数据集成 场景引擎通过数据连接器(Data Connector)访问不同来源、不同格式、不同维度的多元数据。

(2) 场景绘制 场景引擎负责存储和管理场景，将数据提交图形包(如DirectX、OpenGL)绘制。

(3) 场景交互 接收交互信息(如Zoom、旋转、Fly-through)，并即时更新场景。

场景的数据组织形式有很多。传统的顶点-边-多边形结构易于快速三维变换和绘制，但不支持结构化场景、复杂交互和多元数据集成；场景图(Scene Graph)采取面向对象的结构化场景数据管理，但不适合拓扑结构不同的多元数据集成；本文提出的多层次场景引擎(图1)以层(Layer)作为基本单位。层是具有相同拓扑结构、相同来源、相同主题的数据集，层内根据数据集的特性和拓扑结构采用场景图、顶点-边-多边形等结构；以数据连接器实现场景数据导入和转换；采用面向对象思想设计，便于数据封装和扩展；同时优化绘制流程，加快场景绘制与交互。

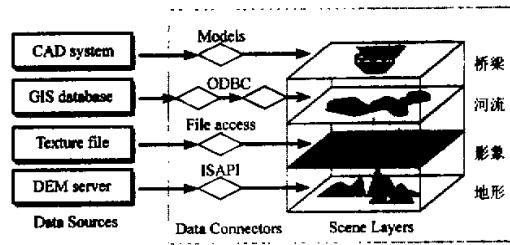


图1 一个多层次场景实例

## 2.2 视点相关动态多分辨率地形模型

大规模地形可视化是面向数字地球的虚拟现实系统的关键技术之一。场景的复杂程度与绘制速度相互制约,尽管图形硬件技术已有长足发展,但仍不能满足大规模三维场景实时可视化的需要,而且机器档次也存在差异,因此必须对大规模地形进行多分辨率表示。非规则三角网格(TIN: Triangulated Irregular Networks)采用层次结构的三角划分表示多分辨率地形<sup>[9]</sup>,但生成 TIN 结构需要大规模计算,一般不适合实时交互。Floriani 提出的 HTIN(Hierarchical TIN: 层次不规则三角网格)地形多分辨率模型<sup>[10]</sup>把不同细节的模型,按树型层次结构存储,每个结点都是父结点某三角形的细化。Taylor 基于四叉树的多分辨率模型同样存储 TIN 结构的三角面片<sup>[11]</sup>。

这里提出的视点相关动态多分辨率地形模型(VDDMTM: View-Dependent Dynamic Multi-resolution Terrain Model)主要用于表示数字高程模型(DEM: Digital Elevation Model)数据。其不再把模型作为整体进行简化,而是针对视点位置动态地简化局部细节。VDDMTM 采用基于四叉树的多分辨率地形结构,自顶向下构造 DEM 多分辨率表示;设计合理的结点评价函数反映每个地形片应该具有的分辨率与当前视点处地形片分辨率的关系;基于结点评价函数选取一组具有所需分辨率的地形片作为与当前视点相关的整个地形表示,既实现了实时绘制,又保留了视点相关细节。图 2 中点 P 为当前视点,箭头所示为观察方向。采用基于视点的动态简化算法后,虚线内地形被细密的三角片覆盖,虚线外区域基于距离视点的远近及其复杂度被不同程度地进行了简化。

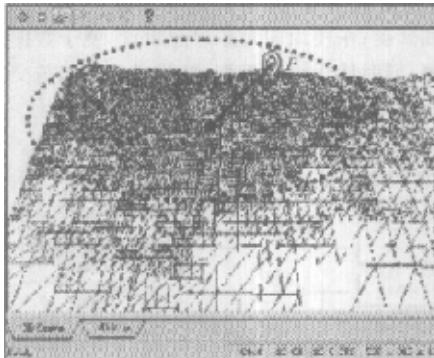


图 2 视点相关动态多分辨率地形简化实例

面向数字地球的虚拟现实系统所需纹理数据非常庞大,现有的高性能图形卡难以胜任大规模纹理数据的传输。将多分辨率纹理映射(Texture Mapping)与 VDDMTM 模型相结合,在视觉敏感区域采用高分辨率纹理,而其余地形采用低分辨率纹理,就可在保留视觉相关细节的前提下,大大减缩纹理数据,提高浏览速度。多分辨率纹理映射基于纹理的层次结构,一般包括 2~3 个纹理层,不同层次的纹理具有不同的分辨率,同层纹理划分为大小相近的纹理片。通过纹理重采样和纹理划分,预先构造纹理层次结构,然后根据简化后地形片的分辨率,为该地形片选取相应分辨率的纹理,完成纹理映射。图 3 采用了两层纹理结构,虚线内部采用了高分辨率纹理。

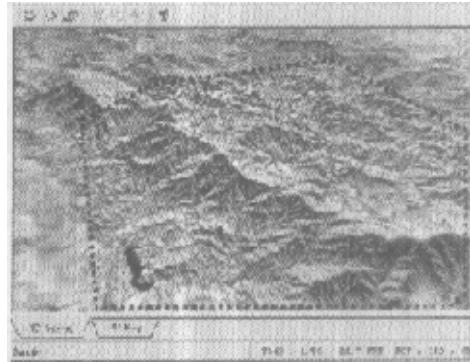


图 3 多分辨率纹理映射实例

## 2.3 网络模型

面向数字地球的虚拟现实系统最终要基于网络,跨越异质网络组织和发送大规模数据;支持普通机器浏览。因此,面向数字地球的虚拟现实系统网络模型应具备以下特点:

- (1) 大规模场景的实时绘制与交互。
- (2) 基于 WWW、符合 Client/Server 结构。
- (3) 场景 Cache, 提高响应速度。
- (4) 动态场景更新, 将 ROI (Region Of Interest) 数据累进传输 (Progressive Transmission)。

(5) 可扩展性, 支持新类型数据。

VRML 方案可直接利用已有的 VRML 浏览器,但存在以下缺点:

- (1) 对象类型不足。尽管 VRML 允许自定义结点,但尚需专门的浏览器支持。
- (2) 针对特定数据集难于实时处理。VRML 的接口功能有限,难于动态优化。

(3) 交互手段有限, 虽然支持 Walkthrough 和部分动画交互, 但难以支持面向地学的特定交互。

(4) VRML 浏览器的具体实现不统一, 给场景转换带来困难。

(5) 场景数据转换为 VRML 文本后, 数据量增加, 网络带宽要求甚高。

采用基于 ActiveX 的嵌入式构件网络模型(图 4), 为面向数字地球的虚拟现实系统专门设计一个客户端 WWW 构件, 允许标准的 WWW 浏览器交互浏览。ActiveX 构件与 WWW 浏览器相互通讯, 在 WWW 浏览器的子窗口中, 实现场景绘制和交互。具体流程如下:

(1) 用户请求被 WWW 服务器接收。

(2) 场景监控进程截获并分析用户请求, 如果是场景请求, 则将请求解释后递交场景服务器。

(3) 场景服务器接到请求后, 唤醒场景提取进程。

(4) 场景提取进程提取用户所需场景, 必要时(Cache 命不中)更新场景缓存。

(5) 场景缓存将场景数据发送至浏览器端的 ActiveX 构件。

(6) ActiveX 构件负责绘制场景。

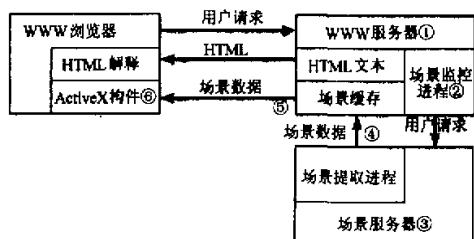


图 4 基于 ActiveX 的嵌入式构件网络模型

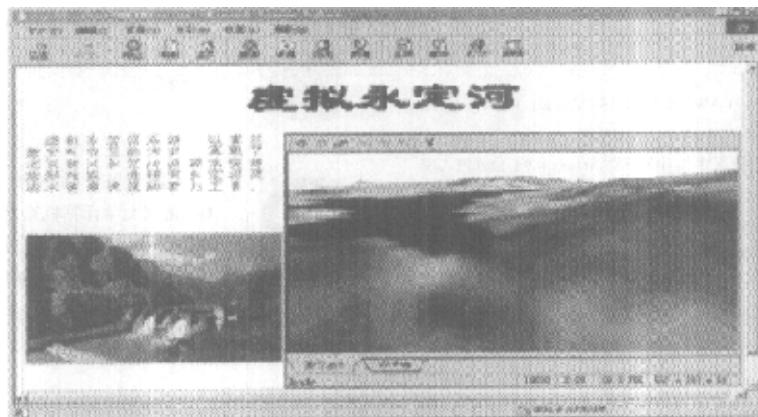


图 5 运行在客户端浏览器中的虚拟永定河

### 3 虚拟地球系统 VES

在研究面向数字地球的虚拟现实系统关键技术的基础上, 开发了一个原型系统——虚拟地球系统 VES (Virtual Earth System)。VES 包括 VES Author、VES Control 和 VES Server。

(1) VES Author 是一个基于 Windows NT/Windows 9X 的标准 Win32 应用程序, 负责创建绘制场景、增删场景层、调节层间关系、以及性能优化等。VES Author 场景引擎基于 OpenGL 1.1。

(2) VES Control 是遵循 ActiveX 标准的可重用构件, 它既可方便地嵌入到 WWW 浏览器中, 又可作为应用构件嵌入到应用程序中。VES Control 用于实现场景绘制、Zoom、Walk Through、Fly Through、碰撞检测等复杂交互。

(3) VES Server 是运行于 WWW 服务器端的 Daemon 程序。VES Server 捕获 VES 请求, 并根据请求将相应场景提交客户端, 它采用 Microsoft ISAPI 技术, 能很好地与 VES Control 通信。

应用 VES 原型系统实现了以下两个实例:

(1) 虚拟永定河 ( $89.4 \times 112.8 = 10084.32 \text{ km}^2$ , 图 5)。基于北京地区永定河流域地形数据和卫星影象, 在 Internet 上建立了一个虚拟永定河浏览系统, 用户可以通过 WWW 浏览器交互浏览永定河。

(2) 虚拟喜马拉雅山(东经  $86^\circ$ , 北纬  $28^\circ$ )。该数据遵循美国国防部地图绘制司制定的 30 弧秒 DEM 数据格式 DTED(Digital Terrain Elevation Data)。

## 4 结 论

面向数字地球的虚拟现实系统,不仅数据量大,数据表示多元性,而且要求实时的交互与显示,因此在目前计算机硬件仍有限制的条件下,对地形表示和显示技术都提出了很高的要求,本文实现的关键技术如下:

(1) 用多层场景引擎实现多元数据集成、场景绘制与交互,并以四叉树表示多分辨率地形;

(2) 与视点相关的动态多分辨率地形模型,结合多分辨率纹理映射技术,既保留了视点相关细节,又显著提高了绘制速度;

(3) 网络模型采用 ActiveX 嵌入式构件方案,更好地支持网上实时浏览;

针对海量多元数据存取、实时交互显示与计算机硬件和网络之间的矛盾,提出了一种解决方案,并在所开发的原型系统 VES 中,用虚拟永定河和虚拟喜马拉雅山两个实例作了尝试,试验结果证明所实现的技术是可行的,有效的.但是对于海量数据在异构存储条件下的地形实时交互显示方法,还没有尝试,这对于数字地球的海量数据特点更为重要.另外,提出更符合人视觉生理特征的、与视点相关的动态多分辨率地形表示模型也是很有意义的工作,这些将在以后的工作中作进一步的探讨.

## 参 考 文 献

- 1 Al Gore. The digital earth—understanding our planet in the 21<sup>st</sup> century [R]. 1998.
- 2 Peter Berger *et al.* Towards a virtual reality interface for landscape visualization [EB/OL]. [http://www.negia.uscb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/berger/paper.htm](http://www.negia.uscb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/berger/paper.htm). 1994.
- 3 Pajarola R B *et al.* OTAW'94-ViRGIS (Virtual Reality based Geographic Information Systems) [EB/OL]. [http://iamwww.unibe.ch/~www/WWW/CHOOSE/Articles/94-11/OTAW-94\\_Poster\\_5.html](http://iamwww.unibe.ch/~www/WWW/CHOOSE/Articles/94-11/OTAW-94_Poster_5.html). 1994.
- 4 Mather P M. An investigation into user requirements for advanced spatial decision support systems [EB/OL]. <http://www.geog.nottingham.ac.uk/~mather/vr.html>. 1996.
- 5 Microsoft Corporation. Microsoft TerraServer [EB/OL]. <http://www.microsoft.com>. 1998.

- 6 Reddy M, Leclerc Y G, Iverson L *et al.* Modeling the digital earth in VRML [R]. AIC Technical Report No. 559. SRI International, Menlo Park, CA, 9 November, 1998.
- 7 Theresa Marie Rhyne, Thomas Fowler. Examining dynamically linked geographic visualization [EB/OL]. <http://www.epa.gov/vislab/svc/publications/awma-gisvis.html>. 1996.
- 8 Robert M Edsall, Mark Harrower, Jeremy Mennis. Visualizing properties of temporal and spatial periodicity in geographic Data [EB/OL]. <http://www.geog.psu.edu/aposla/a-papers.htm>.
- 9 Cignoni P, Puppo E, Scopigno R. Representation and visualization of terrain surfaces at variable resolution [J]. *The Visual Computer*, 1997, 13(5): 199~217.
- 10 Floriani L De, Puppo E. Hierarchical triangulation for multiresolution surface description [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1995, 14(4): 363~411.
- 11 Taylor David C, Barrett William A. An algorithm for continuous resolution polygonalizations of a discrete surface [A]. In: *Proceedings of Graphics Interface'94* [C]. Canada, Banff, 1994: 33~42.



刘占平 1970 年生,2000 年获北京大学计算机科学技术系软件专业理学博士学位,现赴美作博士后研究.研究兴趣有计算机图形学、虚拟现实、科学计算可视化、图像处理与重建等.发表论文 10 余篇.



王宏武 1970 年生,1999 年获北京大学理学博士学位,曾任微软中国研究院副研究员,现在美国从事研究开发工作.主要研究方向为计算机图形学等.发表论文多篇.



董士海 1939 年生,教授,博士生导师,北京大学计算机系多媒体与人机交互研究室主任.现主要研究方向为多通道人机界面和虚拟现实等.发表论文百余篇,专著 4 部,获国家教委科技进步奖等奖项多项.