

网络环境下三维可视化信息系统的方法研究*

张立强^{①②**} 张 燕^③ 杨崇俊^② 刘素红^① 任应超^② 芮小平^② 刘冬林^②

(① 北京师范大学遥感科学国家重点实验室 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; ② 遥感科学国家重点实验室 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 网络环境下三维地形可视化信息系统的研究已经取得了一些进展,但在海量数据管理和传输、大规模场景建模和逼真显示等方面仍然缺少成熟而简单易行的方法.在综合国内外现状的基础上,论述了快速访问多尺度、多层次地理数据的椭球四叉树空间索引技术以及流传输与细节层次渲染技术相集成的原理;提出以视相关和地形坡度为准则,多进制小波和层次三角网技术为核心的大规模地形场景的简化算法.根据这些理论和技术,借助于 COM 技术设计了一个基于网络的三维可视化系统.通过把海量空间数据发布到 PCs 上,满足多用户并发浏览、查询和分析的需要.该系统在军事模拟训练和城市规划等方面有良好的应用前景.

关键词 结构体系 海量空间数据 流传输 多进制小波

目前,随着“数字地球”、“数字省市”、“数字小区”的提出和建设,以及信息和遥感数据获取技术的迅猛发展,很大程度上促使传统二维GIS的服务走向网络化,表现形式向三维立体方向发展,这就对软件传输和处理海量数据的能力提出了挑战.以三维地形景观模型为主要内容的数字虚拟系统引起了人们的极大关注,并日益成为三维GIS、虚拟现实发展的主流之一^[1].虽然许多研究者已经开发了三维GIS原型系统,使得三维GIS技术在矿产资源管理、数字城市等许多领域得到应用,但目前真正研究网络形式的GIS系统和地形可视化系统的文献和应用系统很少^[2].网络三维可视化系统关键要解决大容量空间

数据的快速实时传输、动态显示以及多源海量数据的管理和高效索引.

1 相关工作

1997年,Lindstrom等人提出了三维地球的初步设计模型VGIS^[3],对于虚拟三维地球的研究做出了很好的探索.美国Keyhole公司^[4]在2001年开发的EarthSystem是迄今为止较为完善的网络三维图形信息系统.但它对计算机的配置特别是显卡要求很高,一般运行在配有NVIDIA显卡的客户端上.Teler等人提出了服务器端只渲染最低层次的元素,并把处理结果以图像的形式返回客户端,而其他的LODs作为

2004-03-03 收稿,2005-02-02 收修改稿

* 国家“973”项目(批准号:G2000077906)、水灾分析与决策支持项目(Anfas)和国家“863”项目(批准号:2001AA130020)联合资助

** E-mail: zhanglq@bnu.edu.cn

三维模型传到客户端, 可视化工作在客户端进行^[5]. 这样做的好处是最低一层的LOD渲染时间加上图像传输时间比直接传输三维模型的时间要少; 但大量元素和客户机同时运行时, 即使最低层次数据的可视化过程也会非常复杂, 服务器的负载过重. 用Scene8 和SGI的OpenGL Vizserver开发的虚拟环境软件WorldToolKit提供了一个基于client/server虚拟场景的开发环境^[6]. WorldToolKit虽然能够提供高质量的图形, 但所有的渲染工作全部在SGI服务器上完成, 三维场景作为图片传到客户端上, 即使客户端的计算机配置很高, 也需要昂贵的服务器.

本文论述了 Internet/Intranet 环境下的三维可视化系统 GeoVirtual 的数据发布和三维显示的实现方法. GeoVirtual 提供了一种浏览地球的新途径, 用户使用鼠标(或查询操作)就可以对地球进行定位漫游, 它对客户端的要求不高. 由于采用自己的一套核心技术, 使得客户机对象和服务器对象之间能够直接对话, 合理分配系统负荷, 从而 Web 服务器不会负担过重.

2 系统框架

网络三维可视化系统的基本要求是三维场景能够快速传输到多个客户端, 最大限度的减少网络阻塞, 场景的复杂度要适应客户机的实际处理能力. 考虑到: (1) 如果将场景的渲染工作放在服务器端, 多用户访问时, 即使最低层次元素的绘制都会超出服务器的运行能力; (2) 基于服务器渲染的系统, 对服务器硬件配置要求很高, 并且传输到客户端的图片只能描述二维信息, 缺少交互和变换的功能. 图 1 是我们设计的网络 GIS GeoVirtual 的架构体系. 该结构有如下特点: (1) 由于采用了高效的空间索引技术、渐进传输技术和地形简化算法, 客户端场景的显示速度与数据量大小无关, 满足了多用户并发访问的需要, 并且最大限度的减少网络堵塞和传输时间; (2) 采用异步多线程技术, 客户机可视化场景的同时能在后台实时请求和处理地形数据.

2.1 服务器

Web 服务器主要包括若干数据库和一个离线数据预处理模块. 它主要负责海量数据的存储、索

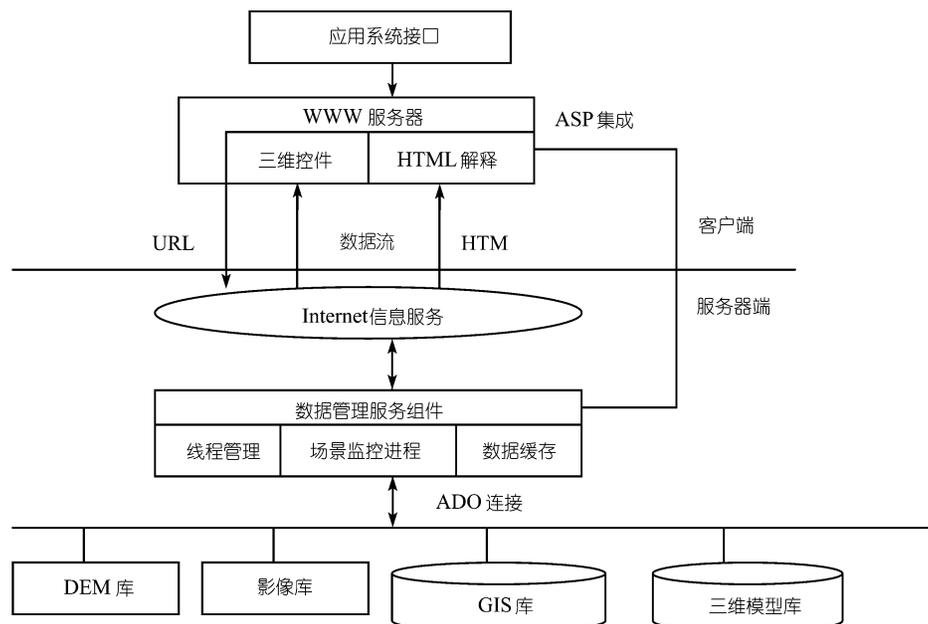


图 1 基于 COM/DCOM 的结构体系

引、压缩等, 并把被请求的数据提交给客户端.

DEM 数据库、纹理数据库和矢量数据库: 全球的 DEM、矢量数据和纹理数据按照分辨率、空间位置分层次存储在数据库中, 并通过内部关联实现无缝集成. 索引模块根据客户端的请求在全库内进行快速检索, 自动调用不同层次的数据.

三维模型数据库: 数据库内记录了模型的名称、坐标、纹理以及一些重要的描述信息, 用以城市或小区三维建筑的模拟.

属性数据库: 记录了地形的坐标、注记、特征点的信息等属性, 用以实现地物地貌的查询.

2.2 客户端组件

客户端是与远程用户交互的接口和界面, 通过 http 协议与服务器进行通讯. 它使用三层结构体系来实现, 即 VC++, JavaScript 和 HTML.

客户端应用程序的场景管理线程负责向 Web 服务器请求特定区域、一定分辨率和类型的数据. 当数据位于四叉树的一个结点上时, 客户端在共享高级缓存内为数据分配空间并通过共享内存优先队列向服务器发送请求, 相关请求的级别由场景渲染线程决定. 当前层四叉树结点中的静态、视相关数据放在一组哈希表中. 哈希表在系统启动时就进行了初始化, 管理器知道哪些结点在表的外面, 因此不会向服务器请求冗余的数据.

2.3 显示管理

本文利用层次传输方法的流能力扩充了基于细节层次的外存算法, 综合了视相关几何流渲染、预取、内外缓存等理论技术, 将其应用到大规模、高分辨率的地形数据传输和渲染中. 为了减少内存的消耗, 构建三维场景的结点采用算术编码压缩, 先传输可见子结点中较粗的模型, 并将其保留在客户机内存中, 渐进可视化更高层次的场景. 如果遍历停止, 就用较粗细节层次模型渲染. 在遍历四叉树结构搜索当前待渲染结点的过程中, 将流和预取过程分为两个异步线程进行(如图 2 所示). 在交互的过程中必需的数据放在缓存中, 每个细节层次中保留数据块的缓存, 如果块立即使用, 就存储在内存缓存中, 否

则, 放在磁盘缓存中(如图 3 所示). 客户端的应用程序根据本机硬件配置、数据尺度和基于视相关的原则, 确定合适的多进制小波、静态误差和动态误差, 利用三角网构建多分辨率三维场景. 从分辨率为几公里的大场景到分辨率只有几米的城市地区, 如果场景变化的太快, 地形管理器跨越四叉树而定位到合适位置的速度会落后于用户变换场景的速度, 这种管理机制让四叉树能快速定位到合适的空间位置以获得重要的属性信息和地理空间边界盒, 从而决定哪些数据和模型显示在当前视景体内.

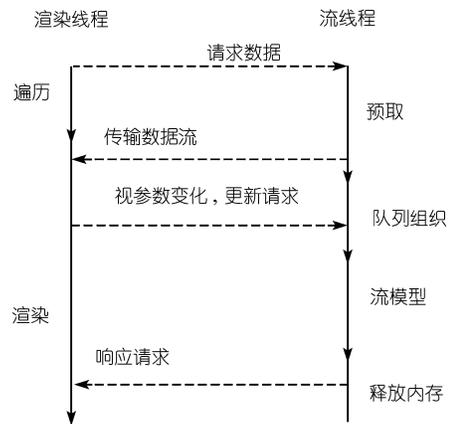


图 2 渲染和流线程的流程

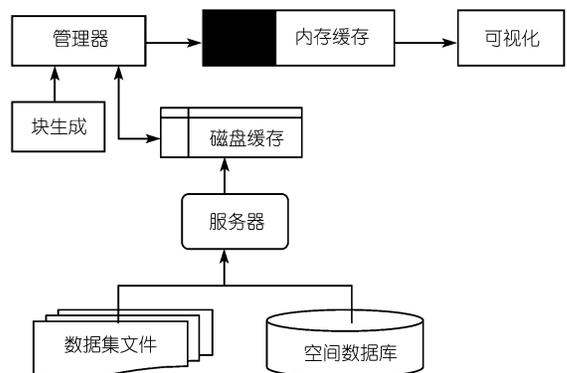


图 3 数据缓存

3 高效的索引模型

多分辨率地形模型数据量巨大, 因此必须有一个设计合理的数据库结构存储从粗到细的数据, 高

效查询该数据库必须借助空间索引来实现. Samet用四叉树描述全球的空间数据,并考虑了地球曲率误差的影响^[7]. Fekete用球面四叉树索引地球的空间数据^[8]. 还有人提出相似多层次空间数据结构来描述全球GIS^[9]. 这些索引方法虽然能实现大规模数据的空间索引,但计算复杂,占用内存较多,实现起来难度较大. Ottonson^[10]对椭球四叉树作了较为详细的论述. 本文提出优化椭球四叉树实现全球地理数据的索引. 这里,沿着经纬格网把地球表面划分成若干左右相邻全等的,上下相邻相似的四边形,四叉树的每个结点代表的是顾及地球曲率的、等面积的四边形. 假设待分割的DEM大地坐标的范围为 $(\lambda_{\min}, \varphi_{\min})$ 和 $(\lambda_{\max}, \varphi_{\max})$,行列数为 $M \times N$,每个瓦片有 $row \times col$ 格网点,那么瓦片在平行圈方向的数目为 $q_\lambda = \text{int}(N/col)$,在子午圈方向的数目为 $q_\varphi = \text{int}(M/row)$. 经差为 $\Delta\lambda = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/q_\lambda$,纬差为 $\Delta\varphi = (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})/q_\varphi$. 为了能够支持多层次细节模型,所有的结点均含有数据,所以椭球四叉树的索引值 k ,必须满足:

$$key = \text{int}(\lambda / (2^i \cdot \Delta\lambda)) + \text{int}((\varphi - \varphi_{\min}) / (2^i \cdot \Delta\varphi)) + \sum_{j=1}^i (q_\lambda \cdot q_\varphi \cdot 2^{-j}). \quad (1)$$

为了创建和搜索椭球四叉树,需要从已知索引值 k 中,知道当前层索引数据的最大坐标 (λ_2, φ_2) 和最小坐标 (λ_1, φ_1) ,利用方程(1)和已知参数 $q_\varphi, q_\lambda, \Delta\lambda, \Delta\varphi$ 获得 $\lambda_1, \varphi_1, \lambda_2, \varphi_2$ 的值:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_{\min} + \text{int}(t - q_\lambda) \cdot \Delta\varphi \\ \lambda_1 = \lambda_{\min} + ((t - \text{int}(t/q_\lambda)) \cdot q_\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi \\ \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda \end{cases}. \quad (2)$$

椭球四叉树每个结点描述了一定分辨率下确定的、等边长(以m为单位)的四边形面片. 为了方便四叉树的快速索引,数据集也被分成多层次的金字塔结构. 随着视点和视线不断移近城区,场景会出现三维建筑实体. 靠近视点或用户最感兴趣的实体应先传输,次要的目标后传输和渲染. 在此情况下,采用一种P-tree的空间索引结构^[11],它类似于R-tree,但增加了额外的元素 $g(e)$ 存储地理空间信息. 如果在第 L 层次上的结点 n 是一个内部结点, $g(e)$ 表示在该分支中

所有实体集合. 返回的集合在包围盒精度高于阈值时,若不含任何特征实体就合并P-tree的内部结点,否则就遍历P-tree的下一层. P-tree与椭球四叉树通过一定的阈值相连(如图4所示)来实现多分辨率地形和三维几何模型的索引.

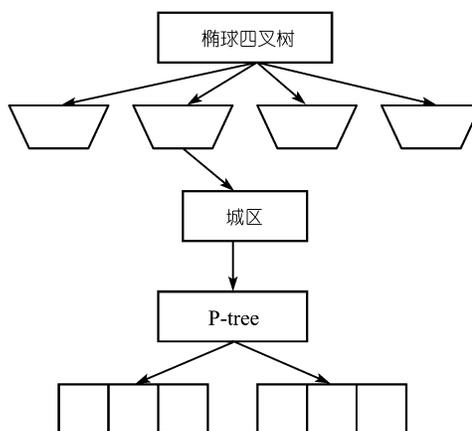


图4 空间索引结构

为了验证球面四叉树索引空间数据的效率,本文对椭球四叉树EQT^[10]和改进的椭球四叉树在检索效率上作了比较. 选用USGS编辑的GTOPO30的两个数据块E060N40和E100N40(如图5所示),以及与之相匹配的影像建立多分辨率金字塔数据结构后,共有1463个DEM和1463个影像数据. 通过SQL Server2000进行管理,实验结果如表1所示.

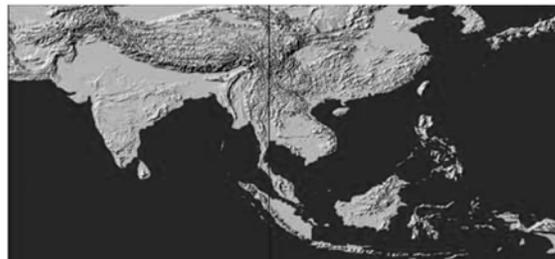


图5 实验用的数据

表1 EQT算法检索数据所消耗的时间

无细分索引 网格的数目	时间/s	索引网格的 数目(LOD)	时间/s	文件的 个数	点的个数
5	8~9	8	6~7	376	7452
5	<20	9	<15	1425	27075
5	<24	10	<17	1864	35435

从表 1 和 2 中可看出, 四叉树的索引单元无论是细分还是没有细分, 本文的检索算法在索引效率上是非常高效的.

表 2 优化椭球四叉树检索数据的性能指标

无细分索引 网格的数目	时间/s	索引网格的 数目(LOD)	时间/s	文件的 个数	点的个数
5	8~9	8	6~7	376	7452
5	<15	9	<13	1425	27075
5	<17	10	<15	1864	35435

4 基于多进制小波变换和层次三角形技术简化地形

在保持三维场景绘制质量的同时加快显示速度是可视化领域重点解决的问题. 很多参考文献提出了用二叉树或者四叉树简化地形场景^[12,13], 如果数据的分辨率很高, 仅靠二叉树(或四叉树)简化的计算量非常大, 消耗内存多, 难以实现大规模DEM的实时可视化. 为了迅速将数据模型简化到给定的误差范围之内, 本文提出用多进制小波变换和层次三角形技术实时简化DEM和纹理.

小波具有良好的视域和频域特性, 被省略的地形细节可以通过合适的小波基重构出来, 利用小波基序列, 只需要很少的点就可以逼近原始数据. 多进制小波理论^[14-16]在对称性、光滑性等方面与二进制小波相比, 有其独特的特点, 它能解决二进制小波不能解决的问题. 多进制小波将原数据分解成 1 个低频成分(地形的轮廓)和 $M^2 - 1$ 个高频成分(细部特征). 低频成分经小波变换又可以生成新的高频和低频成分. 根据影像和DEM的特性, 给出适合简化地形模型的多进制小波变换公式^[15]:

第 j 层的低频成分 $\{a_{j,k,l}\}$ 为

$$a_{j,k,l} = \sum_{n_1} \sum_{n_2} c_{n_1-M_k} c_{n_2-M_k} a_{j+1,n_1,n_2} c_{n_2}, \quad (3)$$

其高频成分 $\{b_{j,k,l}^{s_1,s_2}\}$ 为

$$b_{j,k,l}^{s_1,s_2} = \begin{cases} \sum_{n_1} \sum_{n_2} c_{n_1-M_k} d_{n_2}^{s_2-M_k} a_{j+1,n_1,n_2} & s_1 = 0, 0 < s_2 < M \\ \sum_{n_1} \sum_{n_2} d_{n_1-M_k}^{s_1} c_{n_2-M_k} a_{j+1,n_1,n_2} & 0 < s_1 < M, s_2 = 0 \\ \sum_{n_1} \sum_{n_2} d_{n_1-M_k}^{s_1} d_{n_2-M_k}^{s_2} a_{j+1,n_1,n_2} & 0 < s_1, s_2 < M \end{cases}, \quad (4)$$

在多进制小波分解过程中, 第 $j+1$ 层 $\{a_{j+1,k,l}\}$ 的低频成分能够很好的保留第 j 层 $\{a_{j,k,l}\}$ 的基本信息. 客户端的应用程序能够根据自己的硬件配置和数据尺度的大小采用合适的多进制小波构建地形, 接下去, 对多进制小波变换后的滤波数据, 采用多分辨率三角形构建地形表面模型. 作者以视相关和地形地貌起伏为准则, 提出用静态误差和动态误差实现模型的动态建立.

为了比较本文算法的优越性, 作者对本文算法与Hoppe提出的VDPM方法^[13]、原始数据不简化直接显示, 在帧速率和内存消耗上作了对比(如图 6, 7 所示). 可以看出, 随着DEM采样点数目的增长, 本文的方法在帧速率和内存消耗上要优于VDPM方法, 大约能保持 25 帧/秒的速率. 由于VDPM三角网建模, 三角形之间需要消耗内存保持拓扑关系, 寻找合适的顶点需要一定的时间. 而本文的方法先通过多进制小波变换剔除冗余点, 保留关键的顶点, 然后用滤波数据构建地球表面模型, 明显加快了建模速度, 降低了内存的消耗. 图 8 是在不同的静态误差 ϵ 和动态

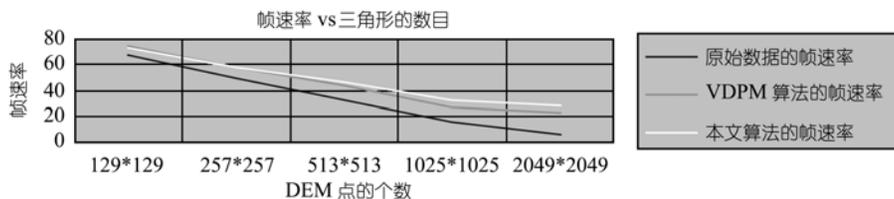


图 6 渲染三角形的数目与帧速率的关系图

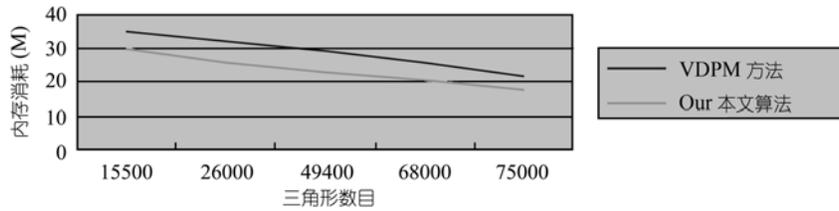


图 7 两种方法消耗内存比较

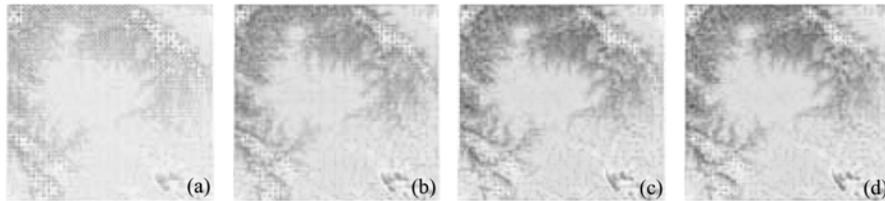


图 8 多分辨率地表模型

(a) $\varepsilon = 2.0$, $\gamma = 5.0$, 10,678 三角形, 42 fps; (b) $\varepsilon = 1.5$, $\gamma = 4.0$, 29,479 三角形, 35 fps; (c) $\varepsilon = 0.5$, $\gamma = 2.0$, 45,743 三角形, 29 fps; (d) $\varepsilon = 0.2$, $\gamma = 0.5$, 64,721 三角形, 25 fps

误差 γ 下, 几幅多分辨率地表模型, 同时定量说明了渲染三角形的数目、以及与之相应的帧速率。

5 实验分析

我们在微机平台上, 用 Visual C++6.0, ATL 和 OpenGL 开发了三维 GIS 系统 GeoVirtual. 在如下的环境进行了实验: 服务器的配置是万全服务器, 双 CPU, 2.4G 内存; 客户端的配置是兼容机 PIII800, 512 兆内存, TNT2M64 显示卡; 网络的传输速率为 128 kbps. 使用美国 The Defense Mapping Agency 的 JGP95E 5' 全球地形数据; USGS 的 GTOPO30 数据; 1:25 万全球地形数据; 1:1 万荆江 DEM 数据, 全球影像为 21600×21600 的 "blue marble"; 30 m 的全国 TM 影像; 以及建筑等三维模型库进行了实验研究。

经授权后, GeoVirtual 从服务器上下载注册到客户机. 在客户机的浏览器上, 地球表面可以叠加湖泊、道路、标注和建筑物模型等, 能够从多角度观察和漫游地形场景, 可以通过导航球进行全球的漫游, 并进行一些空间分析, 如可视域分析、路径分析. 图 9~14 是 GeoVirtual 的部分界面。

6 结论和未来的工作

本文讨论了网络环境下全球多分辨率矢量数据、

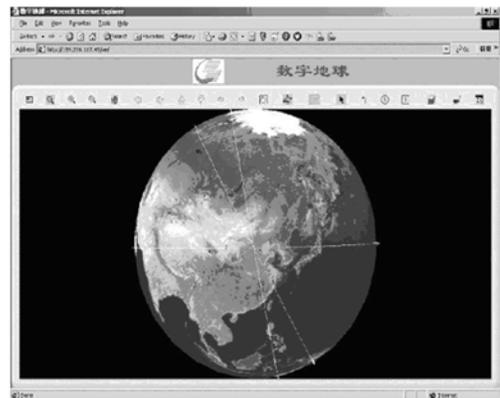


图 9 初始界面

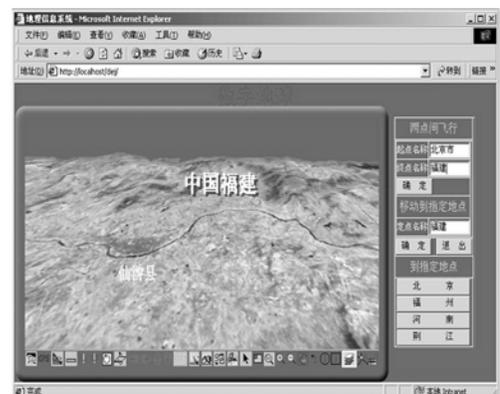


图 10 按照指定的路线漫游

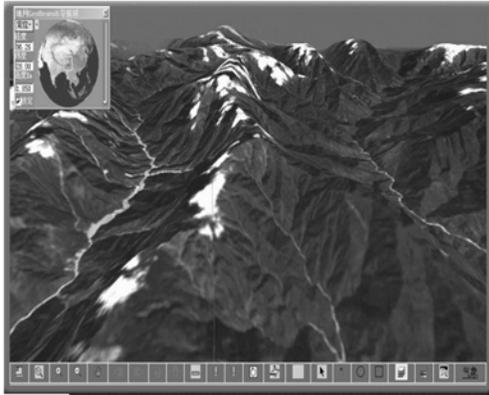


图 11 DEM(1:25 万)、影像(30 m, TM)及矢量数据(河流)的集成

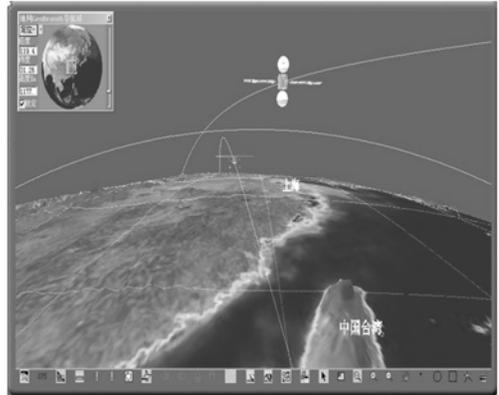


图 12 模拟卫星飞行



图 13 三维几何实体的查询



图 14 长安街附近的景观

DEM 和影像动态显示和实时浏览的一些关键技术,在此基础上设计并实现了一个网络三维可视化系统.该体系构架在海量空间数据的组织、管理、传输和显示上有了突破,实现了全 COM 组件体系架构.

在下一步的工作中,除了继续完善该系统海量空间数据管理能力和交互式显示功能外,还要将其与并行处理技术、分布式计算紧密结合起来,真正解决网络三维 GIS 的信息发布、网络安全、空间分析查询等问题.

致谢 李小文院士对本文的审阅和指导,评审专家对本文的改进意见起了很大作用,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 1 朱庆,李霞飞,张叶挺.基于 Web 的 CCGIS 浏览器插件的设计与实现.测绘学报.2001,2(1):22~27
- 2 Sahm J, Soetebier I, Birtelmer H. Efficient representation and streaming of 3D scenes. Computers & Graphics, 2004, 28: 15~24[DOI]
- 3 David Koller, Peter Lindstrom, William Ribarsky, et al. Virtual GIS: A Real-Time 3D Geographic Information System. Report GIT-GVU-96-02, Proceedings Visualization '95, USA, 1995. 94~100
- 4 Keyhole Inc, "EarthViewer". <http://www.earthviewer.com/2001>
- 5 Teler E, Lischinski D. Streaming of complex 3D scenes for remote walkthroughs. EUROGRAPHICS 2001, Manchester, UK, 2001, 20(3): 125~32
- 6 Sense8, "WorldToolKit". <http://www.sense8.com>, 1997
- 7 Samet H. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures.

- ACM Computing Surveys, 1984, 16(2): 187~260[DOI]
- 8 Fekete G. Rendering and Managing Spherical Data with Sphere Quadrees. In: Proceedings of Visualization'90, 1990. 378~385
- 9 Goodchild M F, Shiren Y. A Hierarchical Spatial Data Structure for Global Geographic Information Systems. CVGIP: Graphical Models and Image Processing 1992, 54(1): 31~44[DOI]
- 10 Ottonson P, Hauska H. Ellipsoidal quadrees for indexing of global geographical data. International Journal of Geographical Information Science, 2003, 16(3): 213~226[DOI]
- 11 Coors V. 3D GIS in Networking environments, Computer, Environment and Urban Systems 2003, 27(4): 345~357[DOI]
- 12 Mark Duchaineau, Murray Wolinsky, David E. Sigteti, et al. ROAMing Terrain: Real-time Optimally Adapting Meshes. In: IEEE Visualization '97 Proceedings, 1997. 81~88
- 13 Hoppe H. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering In: IEEE Visualization'98, 1998, 35~42
- 14 Chitre Y, Atam P, Dhawan. M-band wavelet discrimination of natural textures. Pattern Recognition, 1998, 32(4): 773~789[DOI]
- 15 Maggioni M. M-Band Burt-Adelson Biorthogonal Wavelets. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2000, 9(3): 286~311[DOI]
- 16 万刚, 朱长青. 多进制小波在 DEM 数据有损压缩中的应用. 测绘学报, 1999, 28(1): 36~40