

面向地学过程的计算可视化研究*

-以洪水演进模拟为例

龚建华¹ 林琿² 张健挺³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101;

2. 香港中文大学地球信息科学联合实验室, 香港;

3. School of Computer Science, The University of Oklahoma, USA)

摘要: 本文对包含过程事件的地理系统进行了分析, 区分并定义了地理系统动态变化中的两类对象: 基座对象和事件对象, 并对两类对象的特征, 进行了讨论。依据两类对象的划分, 探讨了基座对象数据模型和事件对象数据模型的特征, 并从人与模型计算、人与三维图形图象的实时互动要求, 提出建立视景数据模型的必要性, 并说明对象数据模型和视景数据模型的相互关系。在此基础上, 对计算可视化环境系统进行了框架设计, 并应用 Visual C++和 OpenGL, 自行开发了一个原型系统 GeoVision, 以洪水演进模型的计算与可视化为案例, 进行了初步试验。

关键词: 计算可视化; 地理信息系统; 地学过程; 洪水模拟; 引导计算; 实时互动

1 引言

传统地理信息系统(GIS)是以图层为核心设计、以数据为驱动的信息系统, 面向的是静态、二维的地学问题^[1], 在处理以地学过程为引导的时空四维地学问题时有很大的局限性^[2-5]。而在另一方面, 科学计算可视化, 可以处理三维以上的地学过程模型计算及其计算过程或结果的可视化^[6], 但弱于对多源空间数据库的综合管理和分析。所以, GIS和科学计算可视化总是与地学过程模型集成起来用于处理以多维、动态为特征的地学问题^[7,8]。在GIS、科学计算可视化和地学过程模型三者集成的方式上, 从系统设计和应用看, 一般可分为三类模式: 松散的, 紧密的和一体化的^[8,9]。松散集成模式, 表示GIS、计算可视化功能和过程模型计算功能(以下简称三者)是分开、独立的, 在形式上可表现为三个独立的运行系统, 系统之间通过数据文件作为中间连接的桥梁; 紧密集成模式, 是三者集成为一个运行环境, 它们之间的数据交换与联系是在计算机内存中自动完成的, 但三者的数据模型和功能系统分别保持相对的独立; 一体化集成模式, 表示三者数据模型和功能关系上在系统设计时是整体考虑的, 三者达到完全的融合。在实际中, 大量的研究采用松散的和紧密结合的集成模式, 并且常着眼于某一应用领域, 如滑坡、火灾、洪水、或水土侵蚀等。而对于一体化的集成模式, 在对象和数据结构上, 缺少面向一般地学过程问题的、系统性的理论和方法研究。本文试着从地学过程事件出发, 研究地学动态系统中的对象分类和相应的对象数据模型, 并在此基础上, 讨论计算可视化环境系统框架设计、原型系统开发与应用试验。

*基金项目: [Foundation Item: 中国科学院创新项目(KZCXZ-308) [Foundation Item: Innovative Project of Chinese Academy of Sciences No. KZCXZ-308]

作者简介: 龚建华(1965-), 男, 博士。从事地理信息系统、地学可视化和虚拟现实研究。E-mail: gongjh@lreis.ac.cn, jianhuagong@sina.com, Homepage: www.vgelab.org (注: 龚博士现在中科院遥感所工作)

2 对象与数据构模

2.1 基座对象和事件对象

传统 GIS 侧重于对地理环境中已存有的地理对象、现象的表达和分析,但对于过程事件中出现的外在对象和现象,却较少考虑,例如,GIS 对突发的洪水(体),火灾中的火(体),滑坡中滑坡体等的的数据构模、信息表达、图形表达等没有系统的研究。

在有过程事件发生的地理系统中,存在有二类不同性质的对象,我们分别称它们为基座对象和事件对象。基座对象是指地理环境中本来就存有的、整体在观察的空间和时间尺度上稳定的地理对象,它是某事件发生的空间支撑基础和物理、化学、生物等环境条件基础;事件对象,是指地理环境中本来不存有的、但在环境条件变化下出现(即事件发生时)的动态地理对象。例如,洪水事件中的地形体是基座对象,洪水的水体是事件对象;滑坡中的山体是基座对象,滑坡体是事件对象;森林野火中的山体是基座对象,火是事件对象等。在传统的 GIS 中,研究多着眼于基座对象,而事件对象考虑较少。

基座对象与事件对象的相互作用,会改变两者在物质、能量和空间上的相互关系。基座对象的接触面上的物质与形体也会随时变化,而事件对象会有一个产生、发展、消亡或停止的过程。例如,火灾或洪水发生后,火(体)或水(体)会在空间上移动,但一段时间后会消亡;而滑坡发生,滑坡体经滑动一段路程后,会停止。当然,在事件发生过程中,基座对象整体在空间上是固定、不移动的。所以,基座对象与事件对象是两类性质、生成与变化机理不一的对象,在数据构模上也有本质的区别。

2.2 对象数据模型和视景数据模型

根据上述两类性质不一的对象划分,在信息系统的数据模型设计时,相应地也有两类数据模型,即基座对象数据模型和事件对象数据模型。基座对象的几何特征一般用点、线、面和体表达,基座对象数据模型则有基于场的和基于对象两种基本模式,这方面已有许多的研究。但事件对象数据模型则研究甚少。事件对象是过程驱动的,其几何空间特征是三维、动态变化、不规则的,其三维边界和对象体的体积是随时变化的。目前,事件对象,还没有统一的数据构模模式,在目前的地理学研究中,一般是根据机理,建立过程模型,通过计算和模拟研究事件对象的某些运动参数(如速度、加速度)、物理参数(如火的温度、洪水的深度等)^[10],而事件对象的空间几何特征,因时空动态多变、再加上边界不规则难以表达,基本上不予考虑。在目前的 GIS 中,事件对象的几何体仍用传统的点、线、面、体作简单的、抽象的表达和描述^[11,12]。然而,在计算机图形学和计算可视化领域中,事件对象的计算机表达方法和技术,却有深入的研究,例如,粒子系统、流线和动画技术常用于表达火、泥沙运动、洪水演进等事件对象^{[12][a]}。随着计算机图形学、可视化和虚拟现实技术的发展以及与 GIS 理论和方法的结合,事件对象的数据建模和图形/图象表达,已逐渐得到重视,并将会得到深入的研究。

^[a] Shen Dayong. Research on Theories and Methods of Water Erosion Model on Hillslopes and Its Simulation in 3-D Space. Ph.D. Thesis at Peking University, 2002. (In Chinese) [沈大勇. 坡面水蚀模型及其三维模拟理论与方法研究. 北京大学博士学位论文. 2002.]

基座对象数据模型和事件对象数据模型,是为了客观、完备地表达地理现象和过程,而不是面向人(用户)的,所以在用户与数据、过程模型计算、三维图形显示等的交互效率上,基本没有考虑^[a]。这样,在计算可视化交互环境中,对象数据模型还必须转换到以“人”为核心的视景数据模型。视景数据模型,是为了让三维场景的图形计算和显示,在人的不同视觉参数和计算模型参数的选择下,以最快的速度计算和更新,达到人与数据、人与模型计算之间的实时互动^[13]。在可视化和虚拟现实领域,视景数据模型是信息系统最基础的部分,对象数据、图形/图象数据及交互数据均用视景数据模型组织和表达,如 SGI 公司的 OpenInventor 和虚拟现实构模语言(VRML)均是视景数据模型表达的常用格式^[14]。

传统的 GIS,没有视景数据模型的概念。但在当前的 GIS 与可视化、虚拟现实技术的集成研究中,视景数据模型逐渐被重视。视景数据模型与对象数据模型,也成为计算可视化环境或虚拟现实 GIS 中两个重要的基础,并且,随着 GIS 与可视化、虚拟现实技术的集成一体化,视景数据模型与对象数据模型也会融合成统一的、以人为核心的多感知数据模型^[15]。

3 计算可视化人机交互环境设计

现象与本质是地理对象(系统)的互相紧密关联的两个侧面。人类用数据、关系、知识、公式等非图形、非感觉的方式表达地理现实世界与用视觉或其它感觉如听觉、触觉、嗅觉等方式直接表现、接触地理图形(图象)世界是同等重要的。所以,从现象与本质相辅相乘的关系看,在信息系统设计中,既要考虑用户与数据、过程模型(内在本质)的交互,又要考虑用户与据数据和模型计算后重构的图形/图象世界(外在现象)的交互。

根据上述地理系统中基座对象和事件对象的分类,以及基座对象数据库、事件对象数据库和视景数据库的描述,结合人与数据、模型(本质)、人与图形图象(现象)之间的辩证关系,从用户的操作环境、信息流角度,我们设计了计算可视化人机交互环境的系统框架(图 1)。

图 1 的信息流程是:原始采样数据经插值等数据处理后,建立基座对象数据库,该数据库可支持模型计算,生成事件对象数据库。基座对象数据库和事件对象数据库,经一定的模式处理后,如加入纹理图象、DEM 分块分层、光源引入与布置等,建立视景数据库。然后经三维可视化后,生成图形图象世界。三维可视化包括三维到二维的投影变换、消隐处理、纹理映射等操作。用户在图形图象世界可以进行空间漫游探索、空间坐标量测、数据查询等,同时也可以加入、删除地物等,从而影响基座对象数据库。在整个过程中,用户均可以实施参数的调控,例如选择不同的插值方法,改变模型参数或可视化参数等。

由于本文重点研究基于过程模型的计算可视化,我们对模型计算与可视化的相互关系作进一步的讨论。

^[a] Gong Ji anhua. GeoVi s u a l i z a t i o n: T h e o r i e s, M e t h o d o l o g y, a n d A p p l i c a t i o n s. P o s t d o c t o r a l r e p o r t. T h e I n s t i t u t e o f G e o g r a p h i c S c i e n c e s a n d N a t u r a l R e s o u r c e s R e s e a r c h. 1997. (I n C h i n e s e). [龚建华. 地学可视化:理论、方法与应用. 博士后出站报告. 中国科学院地理科学与资源研究所. 1997]

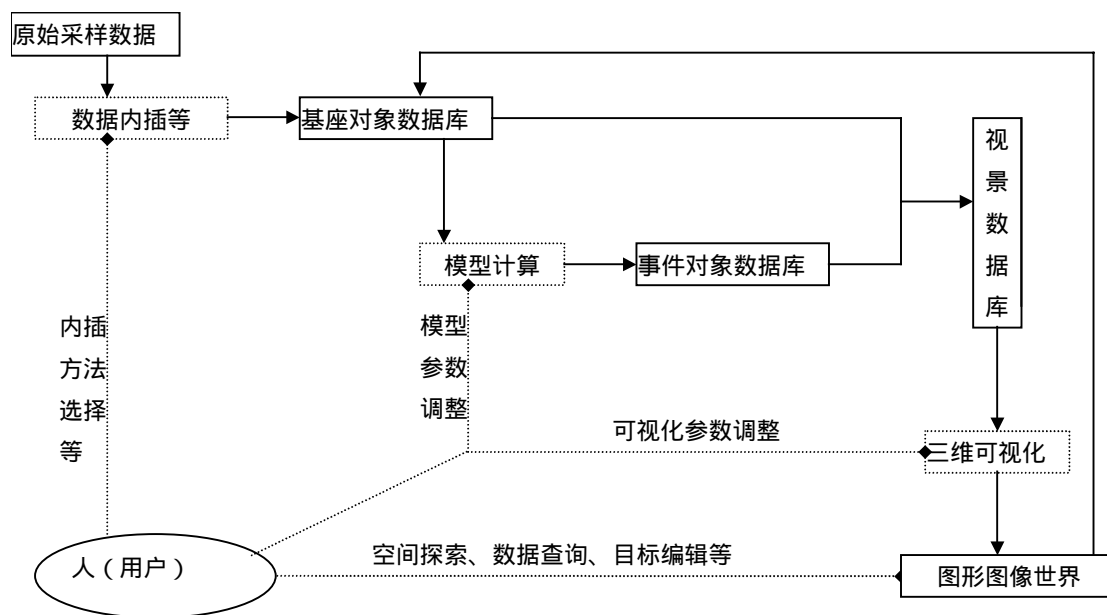


图 1 计算可视化人机交互环境的系统框架

Fig. 1 Framework of human-computer interactive environment for computation visualization

用户与模型计算、可视化的相互交互,可概括为三种模式:后处理,过程跟踪和过程引导^[11](图2)。后处理模式,是模型计算得到的数据先存放在外在介质(如硬盘)上,然后(一般经过一段时间)再用可视化技术把数据转换成图形图象用于浏览分析,所以该模式中模型计算与数据可视化是分开的;过程跟踪模式,是用户可以基于图形图象跟踪模型计算的过程,但在计算过程中无法控制模型参数;过程引导模式,是用户可以应用模型参数控制或引导模型的计算,是人与模型计算交互最主动的一种模式。本文的系统框架设计(图1)采用人/模型交互最高级的过程引导模式。过程引导模式,也可以称为算法可视化^[16],即计算的每一步(临时)结果均进行可视化,并可随时进行模型参数的调整,以控制或引导计算,观察模型在不同参数选择下的行为变化。所以,过程引导模式实际上是把模型计算算法的内 在的、不可见工作过程的外在化、可视化,以便地学专家应用计算方法进行地学试验。

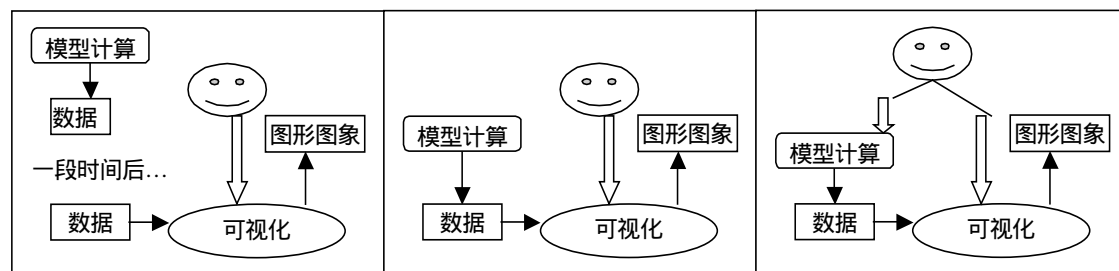


Fig. 2a. 后处理

Fig. 2b. 过程跟踪

Fig.2c. 过程引导

Fig. 2a. Postprocessing

Fig. 2b. Process Tracking

Fig.2c. Process Steering

图 2 模型计算与可视化之间的三种交互模式(据 Marshall et. al, 1990 修改^[11])

Fig. 2. Three interactive approaches for model simulation and visualization (Modification from Marshall et. al, 1990^[11])

4 洪水演进模拟原型系统与试验

根据上述计算可视化环境系统设计, 我们以洪水演进模拟为例, 进行系统开发和试验。

4.1 洪水模型计算

用简化的圣维南方程组, 可以对进入分洪区的洪水进行水力学计算。其基本公式是^[17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 & (4-1) \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} = v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) & (4-2) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v (u^2 + v^2)^{1/2}}{h^{4/3}} = u \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) & (4-3) \end{cases}$$

式中: μ 和 ν 分别为 x 和 y 方向的平均流速, t 为时间, h 为水深, z 为水位, n 为糙率, g 为重力加速度。

在实际应用中, 我们采用刘树坤等所使用的方法^[17], 其模型是将(4-1) — (4-3) 方程进行变换, 并将在泛洪计算中所占比重较少而又常常引起计算不稳定的非线性项省略掉。用简化的方程组, 将分洪各时段所应承担的分洪流量作为初始条件, 进行洪水演进模型的计算, 最终可模拟出洪水各时刻的淹没面积、水深。

4.2 原型系统

应用 Visual C++ 和 OpenGL, 我们设计并开发了计算可视化环境原型系统 GeoVision(图 3)。案例区域选择在位于浙江省浦阳江流域的高湖分洪区, 试验区的面积是 14.6667km²。应用 Arc/Info 输入和编辑分洪区的等高线图和土地利用图。数字高程模型, 据等高线图, 经 TIN 插值后获得的, 格网大小是 54(行) × 66(列), 空间分辨率是 100m。模型计算需要的地形高程和糙率可以分别根据数字高程模型和土地利用模型获取。糙率是根据地物阻挡洪水给定的, 例如, 水域(如水塘)的糙率可以是最小(30/1000), 水稻地的糙率是最大(70/1000)等等。洪水演进模型的管理和计算被融合在环境系统中。在本系统中, 数字高程模型, 即基座对象数据模型, 是用栅格表示; 洪水体数据模型, 也用简单的栅格表示, 但其数据库在计算过程中一直是变化的, 即每一步计算结果可视化后即被下一步的计算结果替换、更新。在系统中, 地形对象和洪水体对象的视景数据模型均用三角网和颜色、光照强度、纹理表达; 但洪水体视景数据模型形成的数据库是动态变化的。

在图 3 中, 左边的窗口显示动态的三维图, 其中左上角的对话框表示洪水演进模拟的时间进程, 演进动态的洪水以蓝色表示, 黄色表示地形地势的三维分布; 图 3 中右上角的窗口是用于参数设置和计算结果的显示。用户可以用鼠标在左边的三维窗口中量测任一点的水深和洪水的到达时间, 结果显示在图 3 右上角的窗口。

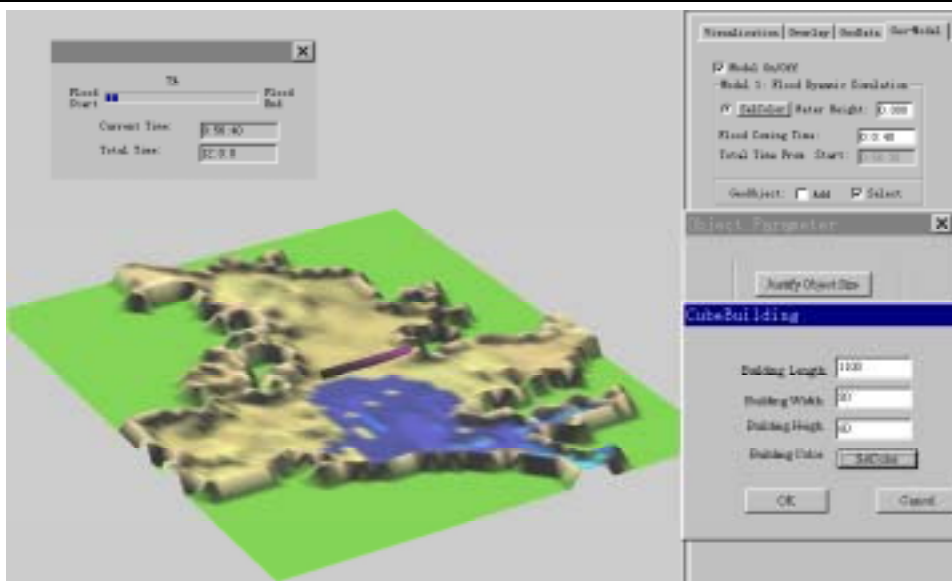


图3 模型计算可视化环境原型系统界面

Fig. 3 Interface of visualization environment prototype system for model computation

用户还可以在三维场景中加入地物,从而影响洪水的演进过程。例如,在图3中,一个1100m(长)×80m(宽)×60m(高)的大坝被加入到区域内,洪水在遇到该坝后,就改变了演进方向和路程。而且,在待到积聚在大坝的洪水达到一定的深度后,马上移去大坝,这相当于洪水导致的溃坝,由于本文的洪水模型没有考虑溃坝型洪水,所以,模型计算很快就发散,表现在图形界面上,就是出现无规则的乱线。这样,通过改变模型的参数,观察改变后模型的行为,就可以加深对模型的理解,寻找模型适用的边界条件,对于建模有很大的帮助。

4.3 试验与讨论

(1) 模型敏感度分析

在本系统中,我们试着改变模型计算中的时间步长参数的取值,并保持空间步长不变,那么在一定的调节范围内,计算不发散,但超出某一范围,则很快发散。这种模型敏感度分析表明,在洪水演进模型计算中,如果改变时间步长,那么空间步长也必须作相应地调整。所以,任何模型参数都有地学意义,不能如调节可视化参数一样随意改变,否则,就没有地学上的意义。

(2) 数值计算精度

在洪水演进的模拟过程中,在三维动态场景中,有些洪水刚到的微起伏地区,会出现有时被水覆盖,有时水不覆盖的现象。通过对动态的临时计算结果分析,我们认为这是由于数值计算的误差引起的。这种现象在平坦地区不会出现。由于洪水的解析模型必须变换到离散数值模型,才能计算,所以离散数值模型的选择以及具体计算策略会影响到模型计算结果的精度。但实时、引导型的计算可视化可帮助分析不同策略下的计算误差,从而有益于模型的改进。

(3) 土地利用优化

洪水的演进和水深历时分布,与地形和土地利用/覆盖有密切的相关关系。在图3的试验中,我们通过在三维场景中加入大坝,观察到洪水演进行为的变化。同样,我们可以通过在分洪区虚拟地设置避险台、改变居民点或工农业用地的空间分布,观察不同级别洪水发生

时,洪水的演进行为和水深历时分布状况,从而可以估算不同环境条件下的灾害损失,为分洪区开发利用的优化规划服务。

5 结语与进一步工作

GIS、过程模型与可视化的结合一直是学界关注的热点。本文从对象与数据构模出发,区分了基座对象和事件对象,并对基座对象数据模型、事件对象数据模型和视景数据模型的特征和关系进行了论述,在此基础上构建了计算可视化环境系统框架。最后,以洪水演进为例,开发了系统原型,进行了初步试验。未来进一步的工作包括:1)一体化数据模型的设计。本文的视景数据模型和基座对象数据模型、事件对象数据模型是分开处理的,视景数据库也是从基座对象数据库、事件对象数据库转换的,未来要将面向实体、面向过程和面向人(多感知)的数据模型集合起来综合考虑,以建立一个一体化的数据模型;2)分布协同式计算可视化环境系统的建立。把基于单机的工作扩展到网络环境下,研究分布式数据管理、分布式模型计算和协同可视化等关键技术^[15,16,18];3)模型计算效率的提高。要实现快速(准)实时的人与模型计算、人与三维图形图像的交互,模型的计算效率是个关键。进一步的工作要把并行计算、优化计算方法引入到模型计算中,以实现大规模计算的实时处理能力;4)可视化与虚拟现实技术的结合。虚拟现实是人机交互界面的终极发展,虚拟现实环境是计算可视化环境的未来发展。但在虚拟现实环境中实现模型计算可视化,需要加强对模型计算效率、事件对象的空间几何表达等的研究。

参考文献 (References):

- [1] Fang YU, Zhou Chenghu, Jing Gui fei et al. Research on 4th Generation GIS Software[J]. *Journal of Image and Graphics*. 2001, 6A(9):817-823. (In Chinese) [方裕, 周成虎, 景贵飞等. 第四代 GIS 软件研究[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6A(9):817-823.]
- [2] Kopp S M. Linking GIS and hydrological models: Where we have been, where we are going?[A]. In: Kovar K, Nachtnebel H P (eds.). Application of geographic information systems in hydrology and water resources management: proceedings of the HydroGIS' 96 conference held in Vienna, Austria, from 16 to 19 April 1996[C]. Wallingford, Oxfordshire: International Association of Hydrological Sciences Publication No 235, 1996. 133-139.
- [3] Maidment D R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F., Parks, B.O., and Steyaert, L.T. (eds). Environmental Modeling with GIS, New York, Oxford University Press, 1993. 147-167.
- [4] Mason D C, O'Conaill M A, Bell S B M. Handling four-dimensional geo-referenced data in environmental GIS[J]. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1994, 8(2):191-215.
- [5] Raper J, Livingstone D. Development of a geomorphological spatial model using object-oriented design [J]. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1995, 9(4):359-383.
- [6] McCormick B, DeFanti T, Brown M. Visualization in Scientific Computing[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(6):973-982.

- [7] Paniconi C, Kleinfeldt S, Deckmyn J, Giacomelli A. Integrating GIS and Data Visualization Tools for distributed Hydrologic Modeling [J]. *Transactions in GIS*, 1999, 3(2):97-118.
- [8] Streit U, Wiesman K. Problems of integrating GIS and hydrologic models. In: Fisher M, Scholten H J, Unwin D (eds). *Spatial analytical perspectives on GIS into Environmental and Socio-Economic Sciences*. London: Taylor & Francis, 1996.
- [9] Bernard L, Schmidt B, Streit U, Uhlenkuken C. Managing, Modeling, and Visualizing High-dimensional Spatio-temporal Data in an Integrated System [J]. *Geoinformatica*, 1998, 2(1): 59-77.
- [10] May Yuan. Use of Knowledge Acquisition to Build Wildfire Representation in Geographical Information Systems [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(8): 723-745.
- [11] Marshall R, Kempf J, Dyer S, Yen C C. Visualization methods and simulation steering for a 3D Turbulence Model of Lake Erie [J]. *Computer Graphics*, 1990, 24(2): 89-97.
- [12] Mitsova H, Mits L, Brown W M, Gerdes D P, Kosinovskiy I, Baker T. Modelling spatially and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS [J]. *Int. J. Geographical Information Science*, 1995, 9(4): 433-446.
- [13] Liggett, R, Friedman S, Jepson W. Interactive Design/Decision Making in a Virtual Urban World: Visual Simulation and GIS. 1995. <http://www.gsaup.ucla.edu/~robin/esri/paper/p308.html>.
- [14] Nadeau D R. Building Virtual Worlds with VRML [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, March/April, 18-29.
- [15] Gong Jianhua, Lin Hui. Virtual Geographic Environments-A Perspective on Online Virtual Reality [M]. Beijing: High Education Press. 2001. (In Chinese) [龚建华, 林珩. 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]
- [16] Hibbard B. VisAD: Connecting People to Computations and People to People [J]. *IEEE Computer Graphics*, 1998, 32(3): 10-12.
- [17] Liu Shukun, Li Xiaopei et al. Numeric Simulation of Flood Evolution in the Xiao-Qing-He Flood Diversion Area [J]. *Advance of Water Science*, 1993, 2(3). (In Chinese) [刘树坤, 李小佩等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟 [J]. 水科学进展, 1993, 2(3).]
- [18] Lin Hui, Gong Jianhua, Wang Freeman. Web-Based Three-Dimensional Geo-Referenced Visualization [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(10): 1173-1181.

Research on Geo-Process Based Computation Visualization - A Case Study of Flood Simulation

GONG Jian-hua¹, LIN Hui², ZHANG Jian-ting³

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Joint Lab. For Geo-Information Sciences, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong;

3. School of Computer Science, The University of Oklahoma, USA)

Abstract: This paper addresses two kinds of objects in geographical systems in which geo-process events occur. They are base objects and event objects respectively. Base objects, as fundamental framework and conditions for some events happening, are ones that exist in geographical environments, and will not change entirely within an observational period. Event objects are ones that do not exist until some events take place. Event objects change dynamically with space and time, and have a limit life span. Not like base objects, research on event objects are less highlighted by traditional geographical information systems, especially on aspects of data model of spatial pattern and dynamic 3-D graphical representation. The conceptual framework of base objects and event objects are beneficial to designing data model in simulation and visualization systems. However, base objects and event objects are put forward just from a perspective of complete representation of geographical systems, other than of human-computer relationship. With regard to rapid 3-D graphic rendering, proper visual effects, and human-computer interaction in real time, scene data model should be considered essentially besides data models of base objects and event objects. Including object data base and scene data base, a system framework of computation visualization environment is then presented. The visualization environment system allows users to justify model and visualization parameters, to implement model computation and visualization by means of process steering. As a case, flood simulation is employed to establish a computation visualization environment prototype system, GeoVision, developed with Visual C++ and OpenGL. A preliminary experiment is conducted via flood model computation and 4-D visualization in the the Gaohu flood diversion area in the Puyang River, Zhejiang Province, China.

Key words: computation visualization; geographical information systems; geo-process; flood simulation; computation steering; interaction in real time