

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 2 - 195 - 06

面向山地灾害动态过程仿真的 地形三维建模与可视化

叶 健 陶和平 陈锦雄* 陈晓清

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 ,四川 成都 610041)

摘 要: 基于山地灾害动态过程仿真需要的考虑 ,并针对该动态过程仿真时渲染数据量过大所造成的实时性较差的问题 ,提出了利用改进的三角形二叉树 LOD 算法实现地形三维建模与可视化的方法。算法对山地地形数据进行了分层和分块的预处理 ,用三角形二叉树表示地形网格 ,并结合视点和局部地形的粗糙程度 ,动态的载入所需的地形块和释放无用的地形块 ,使得内存中的地形数据维持在一定范围内。实验结果表明: 在对地形渲染不失真的前提下 ,本方法能够有效地提高地形绘制的效率 ,可应用到大规模山地地形的三维建模与可视化中去 ,为整个山地灾害的动态过程仿真奠定了良好的基础。

关键词: LOD; 三维地形可视化; ROAM; 分层; 分块

中图分类号: TP391

文献标识码: A

地形可视化的概念是在 20 世纪 60 年代以后随着地理信息系统(GIS) 的出现而逐渐形成的 ,是在计算机上对数字地形模型(DTM) 数据或数字高程模型(DEM) 数据进行三维逼真地显示、模拟仿真、简化、多分辨率表达和网络传输等内容的一项技术。地形可视化与人类的生产生活息息相关 ,在城市规划、路径选取、资源调查与分配、工程勘查与设计、项目选址、环境监测、灾害预测与预报、军事、游戏娱乐等众多领域有广泛的应用^[1-2] ,人们一直关心如何真实的表达自然界的地形 ,因此 ,对其深入研究十分必要。

我国山区面积占国土总面积的 2/3 以上 ,由于山区复杂的自然地质地貌环境和不断扩大的人类活动因素 ,使得山地灾害频繁发生^[3]。将三维可视化技术应用到山地灾害的动态仿真中 ,使工程设计人员可以依据现场勘测结果 ,再现山地灾害及其危害过程 ,可为防灾减灾的设计与施工提供直观的可视

化分析平台。另外 ,依据防治规划设计方案 ,虚拟防治工程的减灾效果 ,有助于选取最优的山地灾害防治方案。

在山地灾害动态过程仿真的建模过程中 ,山地地形的三维建模与可视化方法是山地灾害动态过程仿真的基础 ,因为地表是山地灾害发生的边界 ,而真实的反映地表地形需要利用 DEM 数据来获得地表的边界。然而 ,在利用相关的数学或物理模型实现山地灾害的动态过程仿真时 ,由于计算机不仅需要渲染地形 ,还需要计算灾害物质(如泥石流颗粒物) 的运动趋势 ,而计算机硬件很难实时性地同时满足地形的渲染及山地灾害仿真的三维可视化需求 ,因此必须从软件实现的角度出发 ,在不影响视觉效果的前提下 ,采用相关的地形渲染优化算法来实现山地地形的三维可视化 ,从而节省在地形渲染过程中的系统资源。

细节层次(level of Detail ,LOD) 法是一种有效

收稿日期(Received date) : 2011 - 12 - 21; 改回日期(Accepted) : 2012 - 03 - 01。

基金项目(Foundation item) : 中科院山地所青年百人团队计划项目(SDSQB - 2010 - 03) 。 [Supported by the Youth Talent Team Program of IMHE , CAS(SDSQB - 2010 - 03) .]

作者简介(Biography) : 叶健(1980 -) 男 ,安徽六安人 ,博士研究生 ,主要从事山地灾害三维仿真研究方面的工作。 [Ye Jian(1980 -) ,male , born in Luan of Anhui , doctor student , mainly engaged in research of 3D simulation of mountain disasters.] E - mail: alexye518@gmail. com

* 通讯作者(Corresponding author) : 陈锦雄 ,男 ,教授 ,博士生导师。 [Chen Jinxiang , male , professor , doctoral supervisor.] E - mail: jimxchen@gmail. com

控制场景复杂度的数据简化方法,该方法最早由 Clark 于 1976 年提出,是用若干不同复杂度的模型来表示同一对象的技术,就是采用不同分辨率的地形模型表示地形,在离视点近的地方采用细节程度较高的地形模型,在离视点远的地方采用比较粗糙的细节模型,这样既符合了人的视觉原理又达到了减少数据量的目的^[4-5]。LOD 模型的基本思想被 Clark 提出以后,国内外学者们已经提出了多种实现方法,其中具有代表性的为:1996 年, Lindstrom 提出一种基于规则格网的连续细节层次实时高度场绘制算法,该算法采用层次四叉树进行自底向上细分,同时也采用了屏幕误差判定条件,并提出了具体的误差计算公式^[6];1997 年,在 Lindstrom 的基础上, Mark Duchaineau 等提出了一个基于三角形二叉树结构的实时优化自适应网格算法 (Real-time Optimally Adapting Meshes, ROAM)^[7];此外,还有 1998 年 Hoppe 提出的 VDPM 算法和 Thatcher Ulrich 在^[8]中提出的 ChunkedLOD 算法。其中 ROAM 算法以其简单性和可扩展性成为解决大规模地形可视化的最常用方法。

本文在 Duchaineau 提出的 ROAM 算法的基础上,采用规则格网的 DEM 来表达山地地形,然后采用数据分层、分块和数据动态调度的策略,并根据视点的位置,动态地载入所需的地形块并释放无用的地形块,使得内存中的地形数据维持在一定的范围内,从而大大的提高山地地形的渲染速度。更重要的是,所节省的系统资源,为实时渲染山地灾害的运动过程奠定了良好的基础。

1 模型实现原理与方法

三维地形数据形成的 DEM 是地理空间定位的数字数据集,因此凡是涉及到研究过程中需要对地面特性进行空间描述的问题,都需要三维地形数据的支持,建立 DEM^[9]。地形的绘制过程就是地形表面自动建模的过程,它和构建其他普通模型一样,都是将模型的表面通过连续的三角形来趋近表达,针对同一个表面的连续三角形数量越多、密度越大,趋近效果越好,表面越光滑^[10]。采用读取精度较高的 DEM 数据的方法可以实现更为平滑的地形。

然而,如果不采用优化算法,直接读取 DEM 生成地形,由于其数据量巨大,即使在高性能的图形硬件平台上也很难进行实时地形渲染。另外,如果地

形数据量较大,由于受内存大小或操作系统地址管理能力的限制,往往无法一次性将全部地形载入内存,还需要动态地载入或移除数据,即动态内存调用。为此本文采用了改进的基于三角形二叉树 LOD 模型,在不影响视觉效果的前提下,模型通过降低三维地形的几何复杂度以减少图形系统实时处理的图形数量,从而提高图形的显示效率,并充分的节省系统资源。

模型以二叉树数据模型为基础,根据山地地形数据的地理范围和分辨率,将它们按照二叉树的方式分层、分块。在视点的移动过程中,计算出需要合并和分裂的二叉树节点并进行数据更新,且将参与当前显示的数据块传入内存,使得内存中的地形数据维持在一定范围内,这样,通过合理的数据划分和数据调度策略,使得内存中待渲染的数据只与视点位置和当前渲染细节层次有关,与整体数据量无关。依据以上模型实现原理的描述,实际流程如图 1 所示,主要分为以下步骤:

1. 将 DEM 数据保存成灰度图的形式,确定多层次细节的层次,并进行地形数据的分块预处理。
2. 构建三角形二叉树模型,然后根据预处理阶段设置的数据分层、分块模型,对山地地形数据进行分层和分块。
3. 建立地形简化综合评价因子,并根据该评价因子动态地改变常驻内存数据块的分裂或合并状态,以调整块内不同节点处地形的细节层次。
4. 运用多级纹理映射技术把纹理数据准确、快

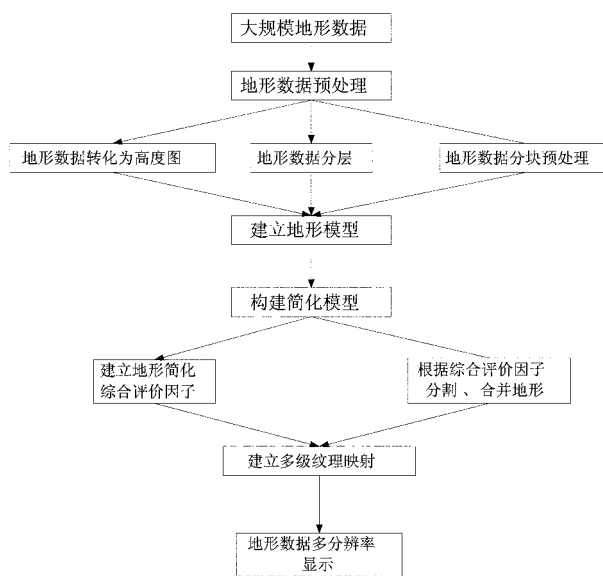


图 1 基于三角形二叉树算法处理流程图

Fig. 1 Processing flow chart based on ROAM algorithm

速地叠加到地形上。

2 算法的实现

2.1 地形数据的预处理

在进行三维山地地形绘制之前,我们首先需要对已有的原始 DEM 数据进行处理。因此首先将原始地形数据 (x, y, z) 分割成水平数据 (x, z) 和高度数据 (y) ,将高度数据 (y) 储存为使用一个字节表达的高度图。高度图中的每一个像素的灰度值,表示原始高度值经缩放后分布在 $[0, 255]$ 区间的值,然后读取高度图,并将采样后的灰度图按照相同的缩放比例还原原始的高度值。

为了实现与视点相关的 LOD 模型,本文采用了多分辨率层次模型,即根据视点与山地地形的位置来确定多分辨率的层次,当视点远离地形时,显示分辨率最低层次的地形轮廓,随着视点越来越靠近地形,分辨率逐级提高到最高分辨率层次。多分辨率层次模型通常采用基于树状数据结构构建。树状数据结构的地形表示方法能够减少地形可见性计算,易于对场景中的数据进行多分辨率层次细节表示,依据视点的变化选用具有不同细节的场景模型进行渲染,从而提高了图形的实时绘制能力^[11]。为此,在预处理阶段还需要确定分辨率的层次。分层的原则要根据地形数据的实际情况,本文将多分辨率层次模型设为7个(0~6),分辨率从低到高排列,其中0层分辨率最高,6层分辨率最低。

2.2 地形数据的组织(地形简化的综合评价因子)

在多分辨率层次模型的层次确立以后,必须采用相关的评价准则来判断何时地形块的节点需要进行分割。因此本模型引入了地形节点细分的判断方法^[12-13]。其评价方法是根据视点到节点中心的距离比上节点的边长,其比值与初始化的阈值进行比较,当小于阈值则节点需要进一步分割,大于则该阈值不再分割而直接绘制。其判断标准如下式

$$(L/d) < C_1 \quad (1)$$

式中 C_1 为可调节的阈值, L 为观察点到节点所对应的三角形数据块中心, d 为节点所对应的三角形块的边长。

在分割的过程中,地形本身的特性也必须考虑,在地形平坦的地方使用较低的分辨率,用过多的节点去描述是无意义也是没有必要的,而在起伏程度较大的区域使用较高的分辨率,使得山地地形没有

尖锐的棱角。为此,模型中采用地形粗糙程度评价公式^[14]

$$L/r < C_2 \quad (2)$$

式中 r 为节点的粗糙度, C_2 为粗糙度调节因子,公式中 C_2 越大, r 就可以越小,节点误差就越小,那么地形就越接近真实地形,其细节程度也就越高。由公式(1)和公式(2)我们可以得到节点细分的综合公式

$$f = \frac{1}{d \times r \times c_1 \times c_2} \quad (3)$$

当 $f < L$ 时,节点将继续分割,以达到随着视点的移动实时调节地形各处的细节层次的目的。

2.3 地形数据分块和调度策略

传统的数据调度方式是一次性调度整个地形区域,调入的方式是将坐标信息加载到一个二维数组中,这个数组记录了顶点所在地形格网的行号和列号,当需要绘制地形块的三角网时,只需要从数组中提取地形块区域的顶点数据。这种传统的数据调度方式,在地形数据量巨大的情况下,无法一次性将所有的数据调入计算机内存并进行三维显示,因此在对地形数据进行调度之前,需要对地形数据进行分块,这样,大部分的数据将存储在外存中,内存只保留当前浏览区域的数据,外存的地形数据只是在需要时才被载入。在分块时候,分块的大小对于绘制速度有很大的影响,分块越大,每块的数据就越多,调度速度就越慢;然而,如果分块太小,由于每块的数据太小,则不利于数据组织和管理,一般而言,分块需要满足两个原则:1.划分的子块数应小于子块内的网格数;2.子块网格的行数和列数应尽量相等。另外,每块数据格网大小是 $(2^n + 1)$ ^[15-16]。本文采用的是平均分块法,采用 129×129 的地形分块策略,相邻两块地形数据之间共用一条边,这样则可以保证数据绘制的连续性。

为了阐述本模型中调用地形块数据的方法,以平面地形块为例来说明视点与地形块数据之间的调用关系,如图2所示,我们以视点位置 P 为中心,以半径 R 的圆形区域调入地形块数据,此时离视点最近的地形块将显示分辨率最高的细节层次0,如果视点与数据块的距离超过指定的误差阈值,则两个子节点开始合并成一个根节点,显示细节层次1,类似地可以递归合并圆形区域 R 范围以内且误差小于限定误差阈值的细节层次2。

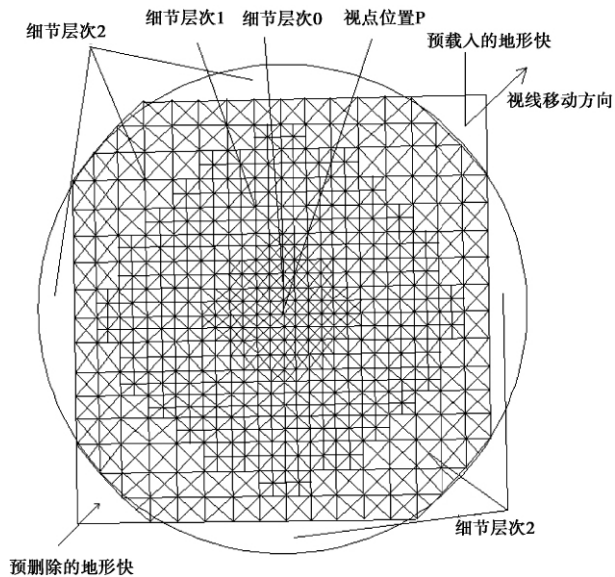


图2 视点与地形块数据调用关系示意图

Fig.2 Sketch map of calling relation between ViewPort and terrain-block data

若视点发生移动,则利用地形块自身的 I/O 线程读取地形分块数据,同时删除视域 R 以外的子地形块。此时节点的合并与分割过程与视点静态时类似,当视点逐渐靠近地形块且地形块的误差超过指定误差阈值时,则根节点被分割为两个子节点,同时调入两个子节点的数据,然后从内存中清除父节点的数据。当地形块远离视点时,地形块将显示较粗

的细节,如果视点在远离地形的过程中子节点的误差小于指定误差阈值时,子节点将合并为上一级父节点,即调入父节点的数据,同时删除内存中子节点的数据。

3 实验结果

基于以上的方法,本文选取的 DEM 数据为西南某山区典型的泥石流沟地形数据,数据的大小为 4097×4097 。测试平台如表 1 所示。

利用本文算法绘制的模型能够以网格着色模式和纹理映射模式绘制山地地形,图 3 为网格着色模式下的地形网格显示效果图,其中,图 3(a)为直接读取 DEM 数据生成的山地地形,虽然该算法实现起来较为简单,所渲染的高度图显示最多的细节,但该算法实现的效率却较为低下,平均帧速率只有 26;而当利用改进的三角形二叉树算法渲染高度图时。如图 3(b)所示,可以根据视点位置的变化,用多种不同的精度表示所渲染的高度图,该方法可以有效的提高渲染速度。通过地形可视化的实验对比,我们发现在距离所绘制山体视点位置相同且不失真的前提下,利用改进的三角形二叉树算法渲染的地形,被绘制场景的每秒平均帧速率从原来的 26 提高到 75,因此本文算法对于提高渲染速度效果是显著的。

表 1 测试平台

Table 1 Testing Platform

硬件环境		软件环境	
CPU	Intel(R) Core(TM) 2 Duo E8400 3.00GHZ	开发语言	C++
显卡	NVIDIA GeForce 8800GT	编译环境	VS2005
内存	2GB	图形 API	OpenGL
		操作系统	Windows XP3

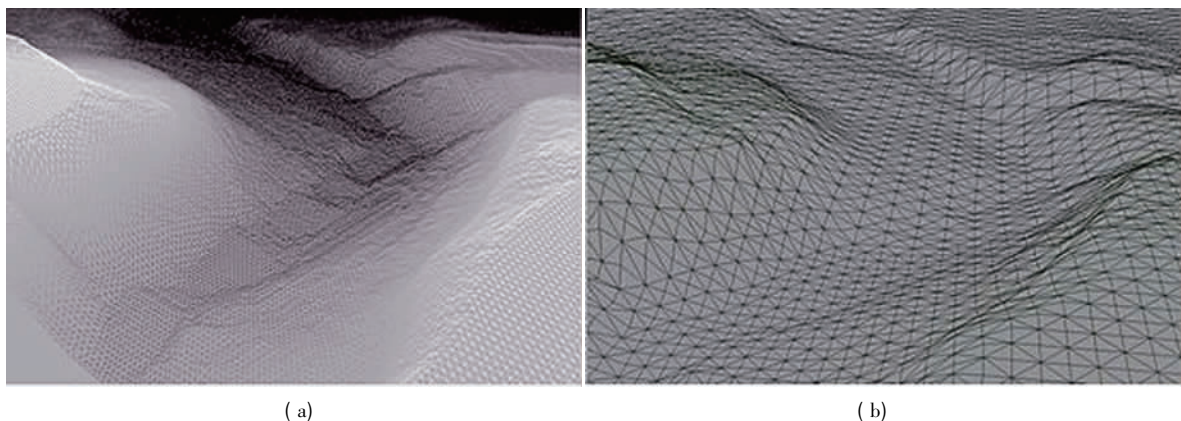


图3 地形网格显示效果对比(网格着色模式)

Fig.3 The display of the terrain using TIN(grid-colored pattern)

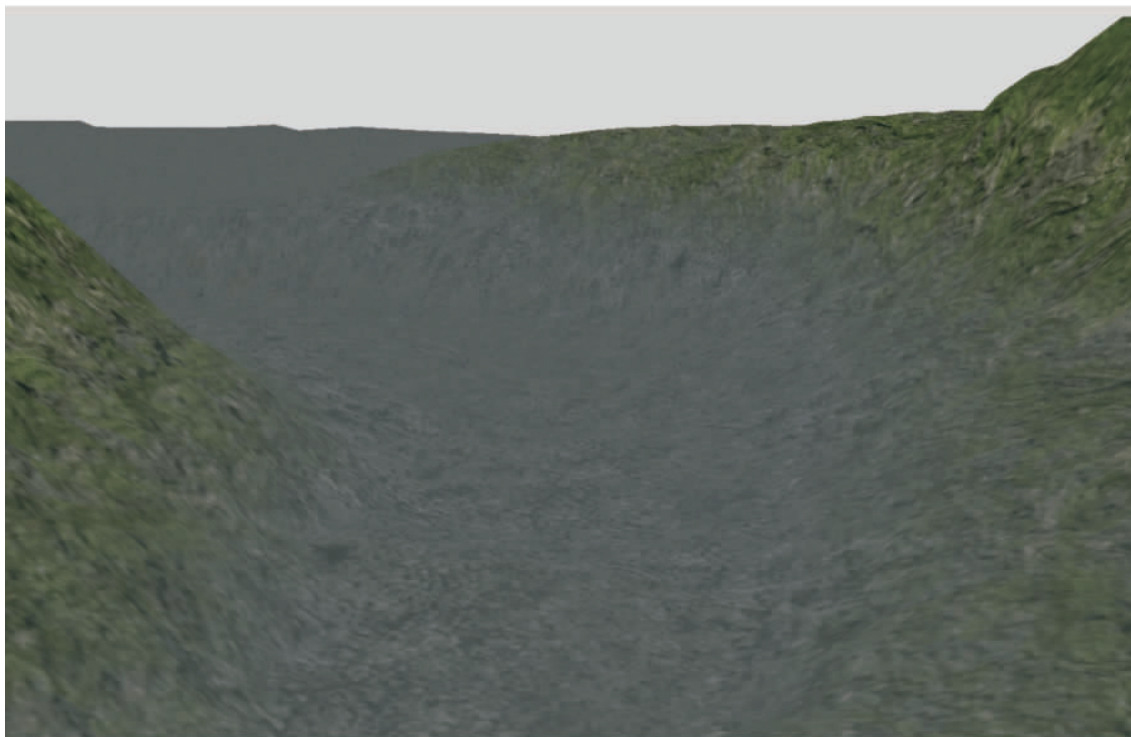


图4 地形显示效果(纹理映射模式)

Fig.4 The display of the terrain surface (texture-colored pattern)

图4是纹理映射模式下的地形显示效果图。从绘制的效果来看,由于对地形进行了分层和分块处理,改进后的三角形二叉树算法使得可视化场景中各地形块之间接边良好,画面渲染良好,由于平均帧速率为75,因此画面不会产生视觉的跳跃,且能有效地保留地形表面的轮廓和细节特征。因此,该算法在有效地保留了地形表面的轮廓和细节特征的同时,提高了地形绘制效率。

4 结语

考虑到在山地灾害动态过程仿真的建模与可视化过程中,需要采用相关的优化算法来渲染地形数据,本文采用了改进的基于三角形二叉树的LOD算法。算法中吸取了ROAM算法的一些优点,在预处理阶段确定了细节层数,然后使用地形平均分块策略对地形进行分块处理,实现了山地地形的三维可视化。实验结果表明,该算法易于实现,且实时性高,更重要的是,节约的系统资源为山地灾害的动态仿真奠定了良好的基础。今后,我们将利用相关的数学或物理模型建立相关的山地灾害模型,并结合上文提出的LOD算法,更真实的绘制出山地灾害动态仿真的可视化场景。

参考文献(References)

- [1] Wang Yongming. Over view of terrain visualization[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5A(6): 449-456 [王永明. 地形可视化[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5A(6): 449-456]
- [2] Gong Jianhua, Lin hui. Perspective on geo-visualization[J]. Journal of Remote Sensing, 1999, 3(3): 236-244 [龚建华, 林琨. 地学可视化探讨[J]. 遥感学报, 1999, 3(3): 236-244]
- [3] Tang Bangxing, et al. The flash flood debris flow and landslide and these mountain disasters control [M]. Beijing: Science Press, 1994: I-VII [唐邦兴, 等. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M] 北京: 科学出版社, 1994: I-VII]
- [4] Ma Zhaoting, Pan Mao, Hu Jinxing, et al. A fast walkthrough method for massive terrain based on data block partition [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4): 619-625 [马照亭, 潘懋, 胡金星, 等. 一种基于数据分块的海量地形快速漫游方法[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(4): 619-625]
- [5] Feng Liangbo, Luo Dayong. Research on 3D model LOD algorithm [J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(4): 97-100 [冯良波, 罗大庸. 3D多层次模型简化算法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(4): 97-100]
- [6] Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W et al. Real-time, continuous level of detail rendering of height fields [C] // Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 1996: 109-118

- [7] Duchaineau M, Wolinsky M, et al. ROAMing terrain: Real-time optimally adapting meshes [C]// Proceedings of IEEE Visualization, Phoenix, Arizona, 1997: 81–88
- [8] Huagues Hoppe. Smooth view dependant level of detail control and its application to Terrain Rendering [J]. IEEE Visualization 1998, October 1998: 5–42
- [9] Liu Yang. Research on the major technologies of 3D visualization of massive terrain under distributed environment [D]. Beijing: Beijing Normal University 2008 [刘杨. 分布环境下的海量三维地形可视化关键技术研究 [D]. 北京: 北京师范大学 2008]
- [10] Cao Wei. Research and improvement of the algorithms for real-time terrain rendering [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009 [曹巍. 三维地形场景实时渲染技术相关算法的研究与改进 [D]. 北京: 中国地质大学 2009]
- [11] Dai Chenguang, Zhang Yongsheng, Deng Xueqing. An organization and management approach of data for real-time visualization of massive terrain dataset [J]. Journal of System Simulation 2005, 17 (2): 406–409 #13 [戴晨光, 邓雪清, 张永生. 一种用于实时可视化的海量地形数据组织与管理方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(2): 406–409 #13]
- [12] Wang Zhen, Hu Min, Li Xiang. Quick simplification for LOD terrain with Dynamic Multi-resolution based on Quad Tree [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(7): 1641–1643 [王臻, 胡敏, 李响. 基于四叉树的动态多分辨率 LOD 地形快速简化 [J]. 计算机应用, 2007, 27(7): 1641–1643]
- [13] Yin Hong, Xu Jiheng, Zhou Liangwei, et al. Technology of Progressive Meshes for large scale Terrain based on Restricted Quad tree [J]. Application Research of Computers, 2006, 23(5): 151–153 [殷宏, 许继恒, 周良伟, 等. 基于限制四叉树的大规模地形可视化及其实现 [J]. 计算机应用研究, 2006, 23(5): 151–153]
- [14] Bryan Turner. Real-time dynamic level of Detail Terrain rendering with ROAM [OL]. http://www.gamasutra.com/features/20000403/turner_01.htm
- [15] Du Ying. A research on key technologies for global multi-resolution virtual terrain environment [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2005 [杜莹. 全球多分辨率虚拟地形环境关键技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学 2005]
- [16] Rui Xiaoping, Yang Chongjun, Zhang Yanmin. An improved LOD algorithm based on ROAM [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(11): 1008–1011 [芮小平, 杨崇俊, 张彦敏. 一种改进的 ROAM 算法 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版 2004, 29(11): 1008–1011]

3D Terrain Modelling and Visualization for Dynamical Process Simulation of Mountain Disasters

YE Jian, TAO Heping, CHEN Jinxiong, CHEN Xiaoqing

(Institution of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China)

Abstract: In correspondence with the requirement of dynamical process simulation of mountain disasters and the drawbacks of rendering the whole process of mountain disasters dynamic simulation in real time, the improved LOD algorithm based on the triangle bintree data structure, is proposed, to realize 3D modelling and visualization of mountainous terrain. It performs pretreatment of blocking and layering for mountainous terrain data, and uses triangle bintree to represent terrain meshes. It also dynamically split or merge data blocks with quadtree structures according to viewpoints as well as the roughness in local terrain, which limit the terrain data in the memory. The experimental result shows that the method presented in this paper is feasible and efficient, has a low memory expenses, it can be used to realize real time rendering of very large-scale terrain, which lays a good foundation for whole dynamical process simulation of mountain disasters.

Key words: level of detail; 3D terrain visualization; Real-time Optimally Adapting Meshes; multi-resolution; block