

文章编号:1001-1595(2007)03-0316-05

中图分类号:P208

文献标识码:A

基于 QTM 的全球地形自适应可视化模型

赵学胜^{1,2}, 白建军¹, 王志鹏¹

(1. 中国矿业大学(北京) 测绘系, 北京 100083; 2. 国家基础地理信息中心, 北京 100044)

An Adaptive Visualized Model of the Global Terrain Based on QTM

ZHAO Xue-sheng^{1,2}, BAI Jian-jun¹, WANG Zhi-peng¹

(1. Department of Surveying & Land Science China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. National Geomatics Center of China, Beijing 100044, China)

Abstract: Real-time and realistic visualization of the Earth terrain is one of the fundamental problems in Geography and Spatial Information Science. In this paper, an adaptive visualized model of the global terrain based on QTM (Quaternary Triangular Mesh) is approached. In order to store and index the global elevation data efficiently, a data structure of Diamonds quadtree and a dynamical operation method of the DEM data blocks are developed. Then, an adaptive simplification rule of hierarchical triangles in DEM data blocks is presented. In the end, the experiment and analysis are done with the global terrain data, GTOPO30. The results illustrate that the methods are smoothly and receivable.

Key words: Quaternary Triangular Mesh; quadtree of diamonds; visualization model; adaptive simplification

摘要: 实时逼真地可视化表达整个地球表面, 是地学及空间信息等学科研究的重点问题之一。作者以球面四元三角网(QTM)为基础, 构建了全球地形可视化模型, 提出一套基于菱形块二叉树的DEM分块组织结构及相应的动态调用方法, 并根据地形特征, 建立DEM数据块的层次三角网自适应简化准则。最后应用GTOPO30全球地形数据进行相关实验与分析。

关键词: 四元三角网; 菱形块二叉树; 可视化模型; 自适应简化

1 引言

如何实时逼真地可视化表达整个地球表面, 是地学及空间信息等学科研究的一个重点。对于地球局部区域而言, 基于地图投影的平面数字高程模型(DEM)及地形可视化表达的相关理论与算法已相对成熟。然而, 地球是一个近似椭球体, 属于流形空间, 在几何上与平面欧氏空间是不同胚的。所以, 应用传统DEM进行大区域乃至整个地球地形可视化表达, 将导致全球空间数据的重叠或断裂以及较大的几何变形^[10,12]。为了解决上述问题, 近年来国内外学者对此进行了深入的探索, 主要方法是基于经纬度格网的地形可视化建模, 例如: 美国乔治亚州技术学院研制的VGIS(Virtual GIS)^[8], 美国国家航空航天局

(NASA)开发的虚拟行星探索工程VPEP^[11], 美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)研发的NPSNET系统^[7], 美国SRI公司开发的TerraVision地形浏览器和基于经纬度表达的地形数据进行了数据压缩等^[9,15]; 在国内, 张立强、陈刚、孙洪君等也在基于经纬度格网的地形可视化表达方面做了深入的探讨^[2~4]。经纬度格网解决了整个地球表面的连续可视化表达问题, 但经纬度格网单元的面积变化较大, 没有顾及地形起伏特征, 产生了大量冗余数据, 极大地影响了全球地形可视化操作效率。另外Lukatela在其开发的Hipparchus系统中, 利用球面Voronoi多边形剖分, 建立了全球地形TIN模型^[14]。这种基于TIN的地形模型, 不但算法相当复杂, 而且层次之间关联困难, 难以实时地进行全球海量地形数

收稿日期: 2006-07-07; 修回日期: 2007-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471108)

作者简介: 赵学胜(1967-), 男, 山东曹县人, 博士, 副教授, 主要从事全球空间数据建模与GIS工程应用等方向的研究。

E-mail: zxs@cumt.edu.cn

据的多尺度可视化表达。

针对上述问题, 本文以球面QTM为基础构建全球地形可视化模型, 提出一套基于菱形块四叉树的DEM分块组织结构及相应的动态调用方法, 根据地形特征, 建立DEM数据块的层次三角网自适应简化准则。最后应用全球地形数据(GTOPO30)进行相关实验与分析。

2 全球QTM格网剖分的基本原理

QTM剖分[Dutton 1996]是选取球内接正八面体作为球面格网划分的基础, 其顶点占据球面主要点(包括两极), 而边的投影则与赤道、主子午线和 90° 、 180° 、 270° 子午线重合, 每一个面都是正球面三角形, 若对球面三角形进一步细化, 即根据顶点的经纬度坐标进行平均, 产生三条边的中点, 其中点连线的球面投影即把球面三角形分为4个小球面三角形, 依此类推, 这样就完成整个球面的近似均匀划分(如图1)。

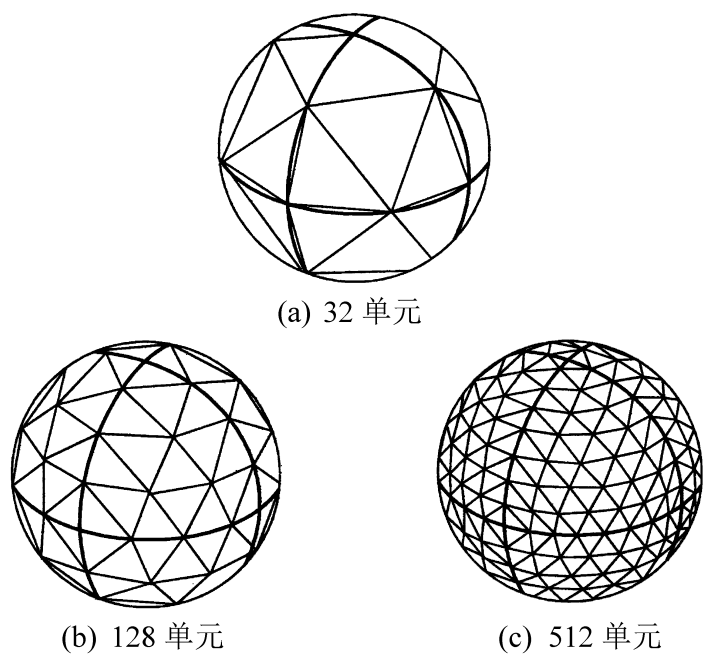


图1 正八面体的球面层次剖分^[6]

Fig.1 QTM partition of spherical facet based on octahedron^[6]

由于其剖分格网的规则性及近似均匀性, 格网点的坐标及它们之间的空间关系可以根据层数及其位置隐含求出^[5]。因此, 通过QTM规则格网点的高程值阵列, 就可以模拟表达整个地球表面。

3 全球QTM格网点的菱形块结构

但是三角形具有不确定方向性(有朝上和朝下之分)及不对称性等缺陷, 其地址码尽管是层次的, 但缺乏分块特征, 在实际操作中不能直接利用地址码对“格网块”进行邻近索引和层次关联。而

两个相邻三角形格网可以组成一个几何结构更简单的菱形块格网, 其几何结构类似于正方形格网, 具有一致的方向性(uniform orientation), 使得其在空间操作特别是邻域查找方面更容易进行。所以, 本文选择基于线性四叉树的“菱形”块(Diamonds)作为全球地形格网数据管理的基本单元。

3.1 全球地形数据的菱形分块组织

首先将QTM结构中的初始8个三角形面按南北向相邻两两合并, 形成4个基菱形。类似于规则格网四叉树剖分, 每个基菱形块递归剖分成4个子菱形块(如图2所示)。这样, 整个球面可以用一个四叉树来表达, 一个球面对应4个基菱形块, 每个基菱形块分割成下一级的4个较小的菱形块, 如此递归, 直到满足一定的需求为止。

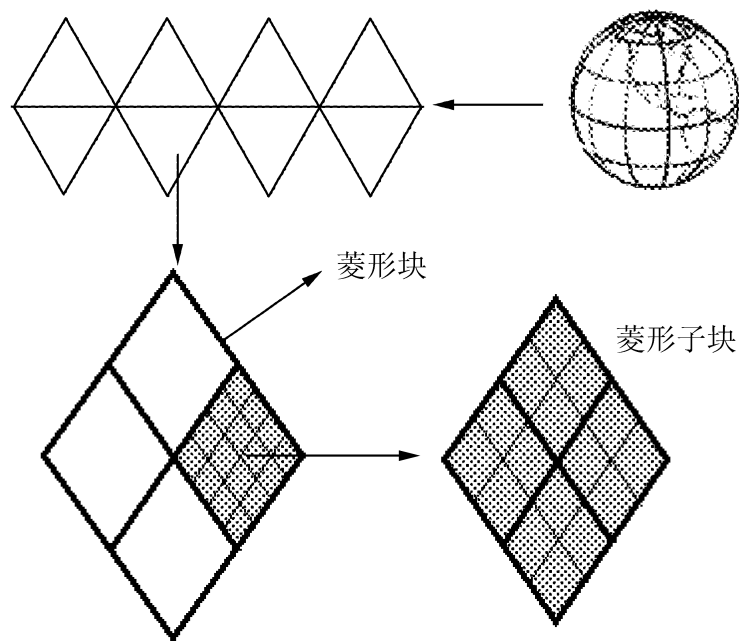


图2 基于菱形块的全局DEM数据组织

Fig.2 The global DEM data organizing based on the Diamonds

从本质上看: QTM格网剖分与菱形格网剖分得到的格网边界点完全相同, 惟一的差别只是将两个相邻的QTM三角形单元合并成一个菱形块单元, 因此QTM格网也可以看成是菱形格网。具体的邻近搜索方法请见参考文献1]。

3.2 菱形数据块的动态调度

由于全球地形数据是海量的, 不能一次调入内存。在可视化时, 根据屏幕对应的实际显示范围来自动调用不同层次的数据块。显示范围越大, 需要调用的数据分辨率越低; 反之, 调用的数据分辨率就越高。屏幕分辨率通常是一个常量, 随着视点和视角的变化, 投影面上相邻像素对应的地形格网的大小会发生变化, 其对应关系如图3所示。

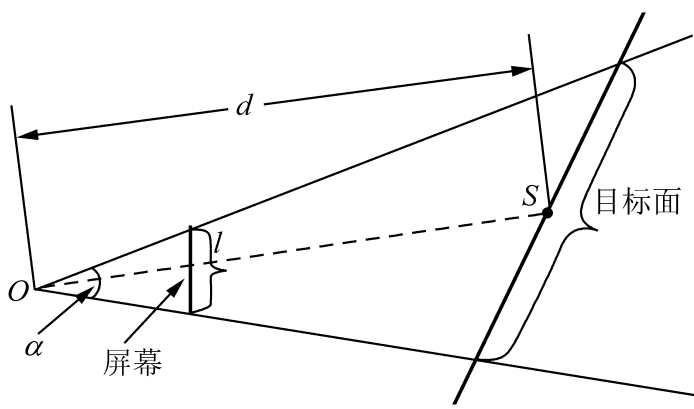


图3 地形显示时的投影关系

Fig.3 The projection relation in visualization

图3中,视点O到目标面中心S的距离为 d ,视角为 α ,屏幕面边长为 l ,屏幕单位长度像素数为 p ,则相邻像素对应的地面格网的间距 D 为

$$D = \frac{2d \tan \frac{\alpha}{2}}{l} \quad (1)$$

另外,在可视化操作过程中,为了提高操作效率,随着视点的移动,需要动态更新数据页中的数据块,其步骤如下:

1. 根据式(1)计算地面格网的平均间距,依此来确定需要调用的数据层;
2. 在索引文件中定位到当前层,比较显示范围与每一数据块边界范围值,查出需要的数据块;
3. 随着视点的移动,装入进入屏幕显示范围的数据块,删除远离显示范围的数据块(如图4)。

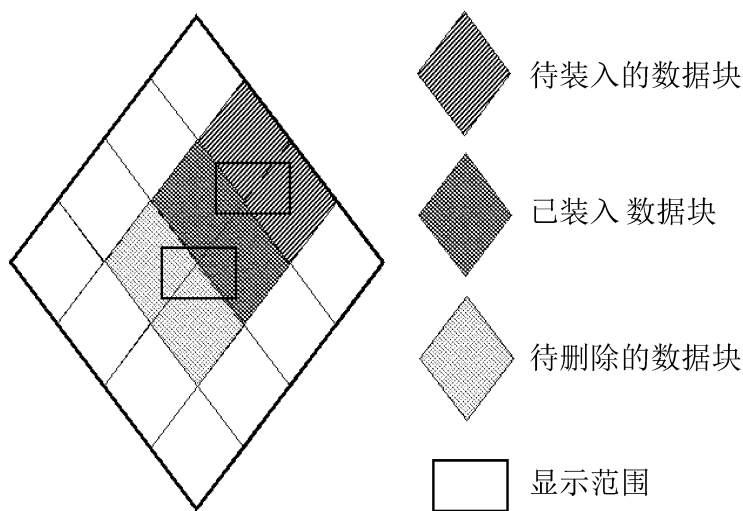


图4 菱形数据块的动态调用

Fig.4 The dynamic adding or removing of Diamond data blocks

4 DEM数据块的自适应简化

为了提高可视化效率,对进入内存的数据块,需要根据地形的起伏特征(设置一定的阈值 f)进行简化^[1],生成多分辨率LOD(Level of Details)模型。

4.1 不同层次三角形的裂缝

但是,此简化模型在剖分层数不一致的边界上可能出现裂缝(如图5)。传统方法一般是通过继续分裂位于高层的未剖分三角形,来保持不同剖分层数间的边界连续性(如图6)。

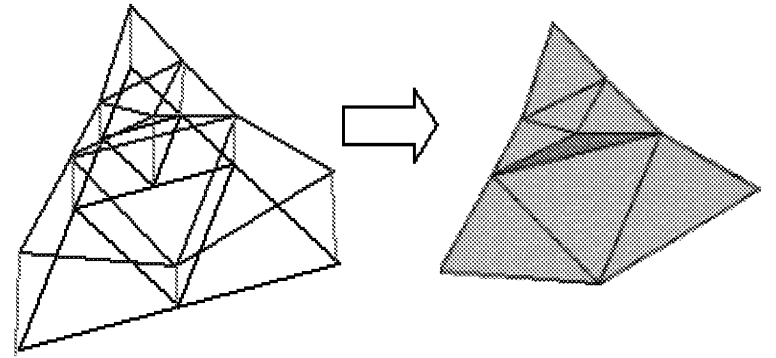


图5 QTM层次格网及引起的裂缝

Fig.5 Hierarchical QTM and the cracks caused by different subdivisions

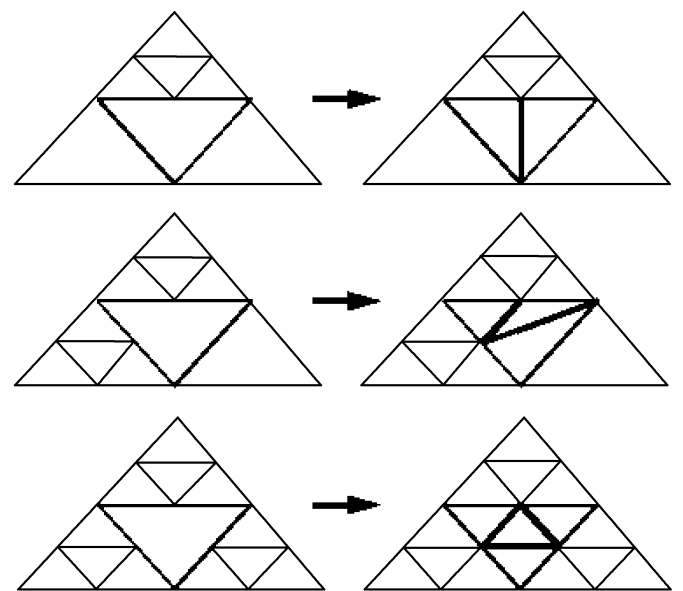


图6 通过分裂较高层的三角形裂缝消除

Fig.6 Eliminating cracks by splitting the triangle in a higher level

传统裂缝消除方法存在以下问题:一方面,必须对格网的分裂加以人为控制,使得相邻格网的剖分层数不大于1,否则难以消除裂缝;另一方面,该方法不能保证格网的规则性,一些区域采用QTM剖分,另一些区域则采用上述不规则分割,较难实现。

4.2 三角形二叉树的自适应层次格网

为了有效地解决上述问题,引入一种基于三角形二叉树分裂思想^[3],即每一个菱形块,对应着两个球面三角形。首先通过连接顶点和其对边中点来细化该三角形(即二等分位于纬线的一条边)。以后每次细化时,均是分裂其最新产生的顶点所对的边。在此,将此边称为欲细化三角形的基边,共用一条基边的两个三角形称为三角形对

(如图7a 中的三角形a 和b)。自适应三角网简化原理如下:

1. 当欲二分三角形基边时, 必须同时分裂共用该基边的三角形对。如图7(a) 三角形 a 和 b 构成三角形对, 分裂 a 时必须同时分裂 b。

2. 当欲分裂的基边不是其相邻三角形的基边时, 先分裂该相邻三角形, 然后执行步骤1。如图7(b), 要分裂三角形 c 时, 必须首先分裂通过其基边与其相邻的三角形 d, 然后同时分裂 c 和 d₁。

3. 重复上述步骤, 直到所有结点表示的三角形区域误差满足该阈值为止。

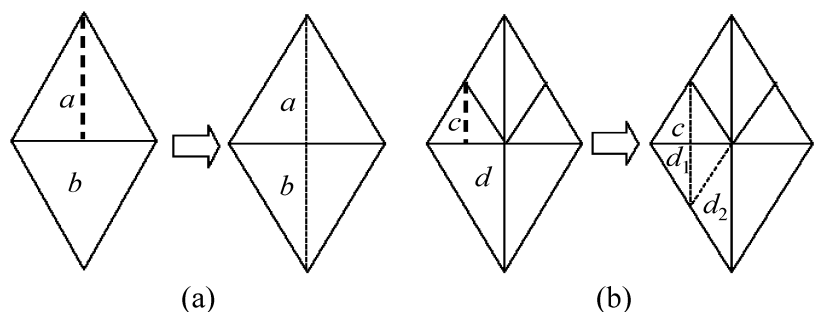


图7 三角形的二等分剖分

Fig.7 Bsecting partition of triangles

通过三角形二叉树的递归剖分, 形成了一个自适应的、无缝的 LOD 格网, 且顶点与 QTM 格网点完全重合(如图8)。既解决了剖分层数不一致的边界裂缝问题, 使三角形在可视化时的数量大大减少, 又不改变 QTM 高程点的存储格式。

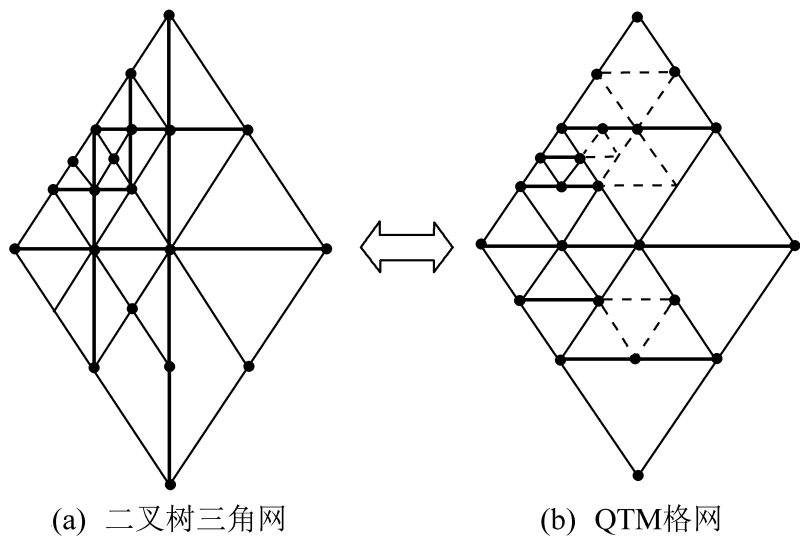


图8 二叉树剖分形成LOD 格网与 QTM 格网点的一致性
Fig.8 The LOD Vertices in Binary Triangle Tree coincide with that of QTM

5 实验与分析

本文在 VC++ 6.0 环境下, 以 OpenGL 作为 3 维图形绘制工具, 应用美国地质调查局(USGS) 提供的 GTOPO30 数据, 进行全球地形层次可视

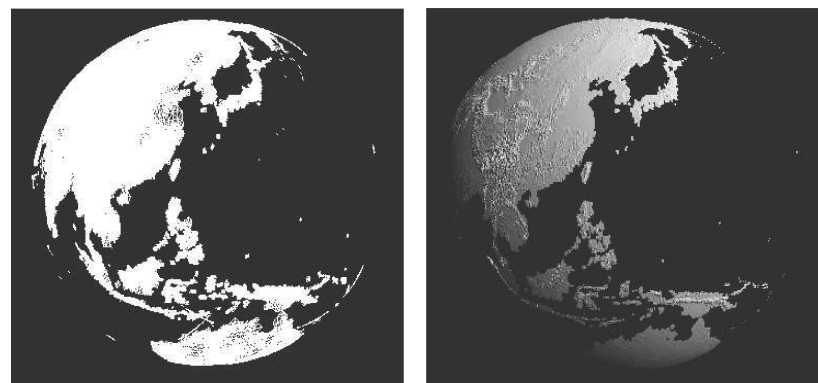
化的相关实验。首先将其转换成球面 QTM 格式(即每个 QTM 格网点对应一个高程值), 同等精度下数据量减少近一半^[11], 全球地形数据共分成 4 层, 从最高分辨率到最低分辨率的数据层分别包括 256 个, 64 个, 16 个和 4 个菱形块数据文件, 每个数据文件对应一个包含 2 049 × 2 049 个高程点的数据集, 其中的高程值以一个二字节整型数来存放。

在对全球范围地形可视化表达时, 首先使用最低分辨率的数据层, 包括 4 个数据文件。简化前, 需要绘制的三角面片数目 $N = (2\ 049 - 1) \times (2\ 049 - 1) \times 2 \times 4 = 33\ 554\ 432$ 个。为了提高可视化效率, 选择不同阈值 f 建立 LOD 简化模型, 其简化量如表 1 所示。图 9 为全球地形 LOD 三角网图及对应的可视化效果图 ($f = 1, f = 2$, 其中海洋地区没有显示)。且在可视化操作过程中, 随着视点的移动, 实现了从全球到局部不同分辨率层次数据的快速的动态替换, 而常住内存的数据保持不变(本实验中为 32 M)。

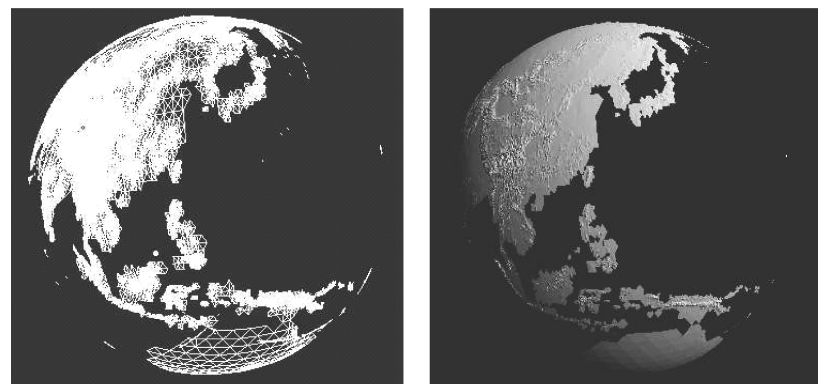
表1 不同阈值下三角形面片数

Tab.1 The number of triangles at different tderances f

阈值 f	0	0.5	1	2
三角形面片数 N	33 554 432	99 529	70 912	33 786
简化比率/ %		2.97	2.11	1.01



(a) $f = 1$ $N = 70\ 912$



(b) $f = 2$ $N = 33\ 786$

图9 不同阈值下的全球 DEM 可视化图(左为格网图, 右为阴影效果图)

Fig.9 The visualization of global DEM at different error tderances (left : triangulation grid map, right : shaded nap)

6 结 论

本文在椭球面 QTM 剖分的基础上,初步建立全球多分辨率地形的可视化模型,克服了平面 DEM 在表达全球地形出现的数据重叠或裂缝等缺陷,又避免了经纬度格网的单元变化较大和存在大量数据冗余等问题,实现了全球地形数据的无缝可视化表达。主要结论如下:

1. 提出一套基于菱形块四叉树的 DEM 分块组织结构及相应的动态调用方法。菱形块的几何结构类似于正方形网格,具有一致的方向性(uniform orientation)、径向对称(radial symmetry)和平移相和性(translation congruence),因而基于菱形的索引、编码和邻近搜索等操作简单易行,效率更高。

2. 引入三角形二叉树的思想,建立了全球 DEM 层次三角网的自适应简化准则。这种递归性自适应剖分是规则统一的,在减少了三角形的绘制数目提高可视化效率的同时,又避免了不同层次边界裂缝的出现,且所细化的每个顶点和 QTM 格网点保持一致。

参考文献:

- [1] Bai Jian-jun. Digital Elevation Modeling Based on the Ellipsoidal Triangular Meshes [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing). 2005. (白建军. 基于椭球面三角格网的数字高程建模[D]. 北京: 中国矿业大学(北京). 2005.)
- [2] CHEN Gang, WAN Gang, YOU Xiong. Design & Realization of Earth-based Terrain Visualization [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2001, S2: 282-285. (陈刚, 万刚, 游雄. 全球地形可视化方案的设计和实现[J]. 系统仿真学报, 2001, S2: 282-285.)
- [3] SUN Hong-jun, DU Dao-sheng, LI Zheng-hang, ZHOU Yong. Study of the 3D Visualization of Earth Figure [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying And Mapping (WTUSM), 2000, 25(2): 158-162. (孙洪君, 杜道生, 李征航, 周勇. 关于地球形状的三维可视化研究[J]. 武汉测绘科技大学报, 2000, 25(2): 158-162.)
- [4] ZHANG Li-qiang, YANG Chong-jun, LIU Dong-lin, YANG Hong-zhi. A Study of Architecture Designing and Interactive Techniques of Web 3D Virtual Terrain Based on Digital Earth [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 1: 59-64. (张立强, 杨崇俊, 刘冬林, 杨洪志. 面向数字地球的网络三维虚拟地形结构设计和交互技术研究[J]. 国土资源遥感, 2003, 1: 59-64.)
- [5] ZHAO Xue-sheng, CHEN Jun. Fast Translating Algorithm between QTM Code and Longitude/ Latitude Coordination [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 272-277. (赵学胜, 陈军. QTM 地址码与经纬度坐标的快速转换算法[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 272-277.)
- [6] DUTTON G. Encoding and Handling Geospatial Data with Hierarchical Triangular Meshes [A]. Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Data Handling [C]. [s.l.]: Taylor & Francis, 1996. 34-43.
- [7] FALBY J, ZYDA M, PRATT D, MACKEY R. NPSNET: Hierarchical Data Structures for Real-time Three-dimensional Visual Simulation [J]. Computer and Graphics, 1993, 17(1): 65-69.
- [8] FAUST N, RIBARSKY W, JIANG T Y. Real-Time Global Data Model for the Digital Earth [C/OL]. <http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids/papers/faust.pdf>, 2002-08-18.
- [9] GERSTNER T. Multiresolution Visualization and Compression of Global Topographic Data [EB/OL]. <http://www.issrech.ia.m.uni-bonn.de/research/gerster/global.pdf>, 2004-05-01.
- [10] GOLD C, MUSTAFAVI A. Towards the Global GIS [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2000, 55(3): 150-163.
- [11] HITCHNER L. A Virtual Planetary Exploration: Very Large Virtual Environment [A]. Proceedings of SIGGRAPH [C]. Danvers: Addison-Wesley Publishing Company, 1992. 1-15.
- [12] KOLAR J. Representation of The Geographic Terrain Surface Using Global Indexing [A]. Proceeding of 12th International Conference on Geoinformatics [C]. [s.l.]: [s.n.], 2004. 321-328.
- [13] LINDSTROM P, PASCUCCI V. Terrain Simplification Simplified: A General Framework for View-dependent Out-of-Core Visualization [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(3): 239-254.
- [14] LUKATELA H. A Seamless Global Terrain Model in the Hipparchus System [EB/OL]. <http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids/papers>, 2002-8-18.
- [15] REDDY M, LECLERC Y, IVERSON L, BLETTER N. Terrevision II: Visualizing Massive Terrain Databases in VRML [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1999, 19(2): 30-38.
- [16] ULRITH T. Rendering Massive Terrains Using Chunked Level of Detail Control [EB/OL]. <http://www.labri.fr/Person/~preuter/imageSynthesis/03-04/presentations/fannyguillaume>, 2004-8-10.
- [17] WHITE D. Global Grids from Recursive Diamond Subdivisions of the Surface of an Octahedron or Icosahedron [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 4(1): 93-103.

(责任编辑: 丛树平)