

# 基于地理特征的地形多分辨率模型技术研究

陈永康, 胡月明

(华南农业大学 信息学院, 广东 广州 510642)

**摘要:**探讨了基于地理特征的地形多分辨率模型生成过程中的模型简化评价指标,并且采用二叉树与二叉树结合的方法对模型三角化中形成的裂缝问题进行处理。

**关键词:**地形可视化;多分辨模型;地理特征;三角化

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2006)04-0102-04

## Studies on Technology of Multi-Resolution Land Model Based on Geographic Features in Visualization of 3D GIS

CHEN Yong-kang, HU Yue-ming

(College of Informatics, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

**Abstract:**The simplify criterions for construction of multi-resolution models was discussed based on geographic features. For the problem about carek brought out in model triangularization, a new technique combining quad-tree has been invented.

**Key words:**visualization of terrain; multi-resolution model; geographic feature; triangularization

三维 GIS 中涉及的地理事物和对象纷繁复杂,数据十分庞大。即便是计算速度快、存储量大、图形功能强的图形工作站也不能满足实时绘制的要求。因此多比例尺综合和多细节层次技术(Levels of Detail, LOD)是必不可少的<sup>[1]</sup>。LOD 技术最先由 Clark<sup>[2]</sup>提出,它的主要目的是通过对场景的多尺度表达,达到数据减少与真实感减损之间的平衡。它依据场景对象模型和视点的距离,选择合适尺度模型表示来进行绘制。如果模型离视点较远,且在屏幕空间的投影区域覆盖较少像素,则用尺度小(粗糙)的模型来进行表示;相反,模型离视点较近,则采用尺度大(精细)的模型来进行表达。地形是自然场景渲染中不可或缺的重要构成部分,它是众多空间地理事物的立地基础,地形数据的多少对场景的绘制具有极大的影响。在此,本文以地形的简化为例来讨论空间对象的多尺度模型生成问题。

## 1 基于地理特征的地形多分辨率模型

### 1.1 模型的简化算法

多分辨率模型是对真实对象在不同比例尺上的

近似。生成多分辨率模型的过程是一个简化和综合的过程。这种简化过程不是为了从初始模型中移去粗糙的部分,而是为了保留重要的视觉特征,其理想结果是一个初始模型的简化序列<sup>[3]</sup>。因此如何选择合适的简化算法是关键。目前在模型简化算法方面已有诸多研究,主要分为 3 种类型:(1)细分型:这种方法通过首先建立原始模型的最简化形式,然后根据一定的规则迭代细分原始模型,从而得到模型简化序列。如文献[4]中提出的基于小波生成 LOD 模型的方法。这种方法不太常用,因为在一般情况下构造最初网格的最简化模型相当困难,而且计算过程十分庞大,无法实时生成所需的多分辨率模型。(2)采样型:类似于滤波方法。它对原始模型的几何表示进行采样,选取 1 组点,再通过组建多边形来重建模型。如 Hoppe<sup>[5]</sup>提出的网格优化法, Rossignac<sup>[6]</sup>提出的多分辨率三维近似算法。这种方法的模型近似程度较高,但是计算量大,速度太慢。(3)删除型:通过重复移去模型单元来得到简化模型。分为 3 种情形:一是直接删除<sup>[3,7-8]</sup>;二是面合并方法<sup>[9-10]</sup>;三是边折叠方法<sup>[11-12]</sup>。

收稿日期:2006-02-27

作者简介:陈永康,(1970—),男,讲师,博士,E-mail:yk\_ch@sina.com

基金项目:广东省自然科学基金(05300340);华南农业大学校长基金(5600-k05040)

### 1.2 地形多分辨率模型的生成

在地形多分辨率模型生成方面,当前绝大部分应用主要基于3种方法:一是 Hoppe<sup>[13]</sup>提出的“Progressive Meshes”法则.它通过增删三角形到任意网格来获得相应细节程度的模型,它虽然有良好的调控性,但算法过于复杂且内存需求太大,不适合于大地形.其次是 Lindstrom 提出的四叉树方法,它使用了一种基于四叉树的数据结构,用四叉树递归把一个地形分割成一个一个小块(tessellates)并建立一个近似的高度图.最后是 Duchaineau<sup>[14]</sup>提出的 ROAM(实时优化自适应网格)法则.它是基于二元三角树结构的方法.这里每一个小片都是一个单独的正二等边三角形,从它的顶点到对面斜边的中点分割三角形为2个新的正等边三角形,分割是递归进行的可以被子三角形重复直达到达希望的细节等级.

通常地形模型的构造分为2类,即基于规则网格(GRID)的方法和基于不规则三角网(TIN-Triangulated Irregular Network)的方法.不规则三角网是通过不规则分布的数据点生成连续三角面来逼近物体表面.它的描述效率高,在某一特定分辨率下能用较少的空间和时间更精确地表示复杂的表面<sup>[15]</sup>.虽然不规则三角网格在优化显示方面具有优势,但是由于三角化过程本身的复杂性以及非规则网络拓扑关系的繁杂性,使得各种基于非规则三角网的算法不易实现,且不便查询<sup>[16]</sup>.更重要的是多分辨率模型生成难以达到实时.而规则网格结构简单,数据存储量小,各种分析与计算十分方便.因此本研究采用基于规则网格的方法.

### 1.3 基于规则网格的地形模型

基于规则网格的地形模型通常用数字高程模型(DEM)来表示.它是一个由平行于坐标轴的纵横平行线覆盖的高度场.对于这种数据组织,采用四叉树来描述多分辨率的地形.如图1所示,每个正方形为四叉树的1个节点,每个节点保存了一定区域的信息,包括中心点的高度.从整个完整的地形出发,可以把地形递归地不断分割成相等的4个区域,分割的深度越大,得到的分辨率越高.即分割深度每提高1层,采样密度提高1倍.

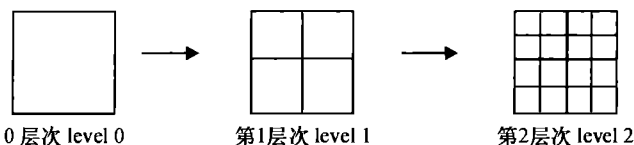


图1 多分辨率模型的四叉树分割

Fig.1 Quad-tree division of multi-resolution model

简化的过程实质是一个不断舍弃原始模型中的一些“不重要”元素的过程.但是如何来确定每个元

素的重要性呢?也就是要确定什么时候结点需要分割,什么时候不需要分割.这就需要建立一个评估、度量重要性的体系.

对重要性度量首先考虑以结点分割过程中的几何误差来衡量.在图2中,该结点由A、B、C、D4个顶点组成,如该结点进一步分割,由于边BC被新的

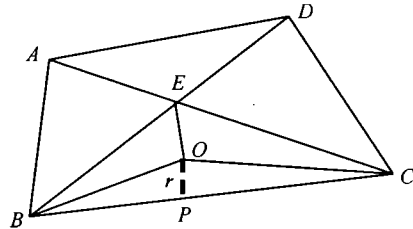


图2 结点分割几何误差示意图

Fig.2 Illustration of geometric error resulted in node-dividing

边OB和OC替代,则原来的三角形 $\triangle EBC$ 将会相应地被 $\triangle EOB$ 和 $\triangle EOC$ 代替.设P点为边BC的中点,则OP在Z轴方向上的投影则为结点分割在边BC上产生的误差,我们记为 $R(BC)$ ,同理分别还有 $R(AB), R(AD), R(CD)$ .取 $r = \max [R(AB), R(BC), R(CD), R(AD)]$ ,即取得各边误差的最大值.又设L为边长,则利用分割误差来评价结点的公式如下:

$$\frac{L}{r} < C_1, \tag{1}$$

式中, $C_1$ 为一可调节因子.如果 $L/r < C_1$ ,则网格可以进一步分割,反之则不再需要分割.事实上,不难推断,对于地形来说往往起伏较大的地方进行分割时误差会较大, $L/r$ 较小;而比较平坦的地方则误差会比较小, $L/r$ 较大.因此 $C_1$ 可看作对地形粗糙度的表达,一般 $C_1$ 越大,则地形越粗糙,网格分割的深度越深,反之则地形越平坦,网格分割深度越浅.

其次,如前所述,场景对象的分辨尺度还与对象与视点的距离有关.同样对于网格的分割要考虑视距这个因子.设d为视距,L为网格边长,则利用视距来评价结点的公式如下:

$$\frac{d}{L} < C_2, \tag{2}$$

式中, $C_2$ 称为视距调节因子,可以根据需要进行调节, $C_2$ 越大,结点分割深度越大,反之越小.在同等条件下,视距越小, $d/L < C_2$ 越可能满足,结点则越可能进一步分割;反之则情况相反.

综合考虑上述2种情形.可以得到:

$$f = \frac{d}{rC_1C_2} < 1, \tag{3}$$

显然,从公式(3)可知,在进行网格的分割时要同时考虑视距与分割产生的几何误差,并需根据实际要

求调节  $C_1$  和  $C_2$  2 个因子.

以上的评价构造实质上是在简化时选择地保留了具有突出特征的地貌部位,比如山脊和沟谷,因为这些部位正好是地形破碎、起伏较大的地方.因此可以说上述评价是基于自然地理特征的.这也是大多数基于四叉树的地形简化算法中考虑对象自身的唯一因子.然而,进一步考虑面向实际的应用,发现仅仅考虑地形的自然特征还不够,有时由于实际应用过程中的特殊需要,需要明确地保留用户自定义的集合内所有的特征.比如面向交通的应用,可能需要保持交通线路沿线的地形单元具有较高的分辨尺度.所以在上述评价基础上,可以根据专业需求赋予每个结点相应的该项属性值,以变量  $v$  记之.这样公式(3)可以改写为:

$$f = \frac{d}{rC_1C_2v} < 1, \quad (4)$$

设  $I$  为节点的集合,  $I_v$  为根据应用需求所规定的约束项的集合. 则有

$$v = \begin{cases} 1 & I \cap I_v = \emptyset \\ \text{const} & I \cap I_v \neq \emptyset \end{cases}, \quad (5)$$

在实际的计算过程中,可以将 DEM 与约束因子的空间分布进行叠置分析. 没有重叠的节点其  $v$  值赋为 1,表示没有约束作用. 否则,赋为一个不等于 1 的常量值,表示具有约束影响作用.

基于以上认识,采用公式(5)进行多分辨率尺度的模型简化工作. 其特点是在考虑了自然特征的同时兼顾了面向应用的用户需求约束,这样更加完善了模型简化评价体系的构造. 且简化条件可以调节,具有很好的适应性.

### 2 三角剖分中的“T形缝”处理

在将地形单元的几何数据输入 OpenGL 的渲染管道时,需要对单元进行三角化,即把整个地形单元剖分为一系列连续的三角形图元,因为三角形图元是绘制最快的图元. 然而由于在地形的四叉树多分辨率模型生成过程中,相邻的节点之间分辨率会有差异,这就会导致在三角化时产生“T形缝”(图 3). 图 3 中左上和左下的节点比右上和右下的节点分辨率高,经过三角化后,左上节点和右上结点之间出现

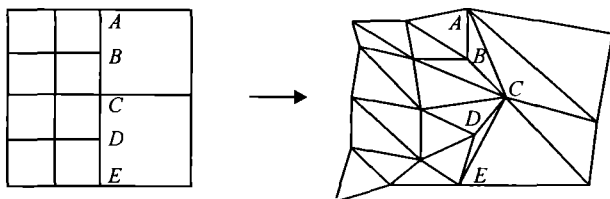


图 3 “T形缝”的形成

Fig. 3 Forming of “T crack”

了一个未被覆盖的区域  $\triangle ABC$ ; 同样左下节点与右下结点之间也出现了裂缝  $\triangle CDE$ .

对于“T形缝”的修补,常用的方法是构建限制四叉树,即相邻节点之间的分辨率不超过 1 层,如文献[17]根据格网点的依赖关系构建的限制四叉树. 文献[18]则采用递归方法进行“T形缝”消除. 本文借鉴 Duchaineau 的自适应二叉树分解法来进行“T形缝”的拼接. 首先将节点的三角化划分为 2 种类型:一是单对角剖分,二是双对角剖分(图 4).

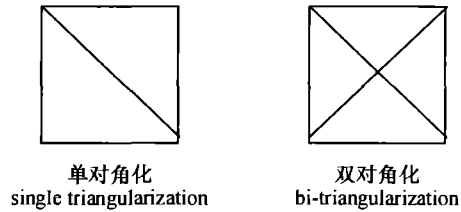


图 4 三角剖分类型

Fig. 4 Types of triangularization

双对角化把一个节点剖分为 4 个三角形,按照方位分别称为上三角、下三角、左三角和右三角. 规定如果与三角相邻的节点分辨率高于三角,则三角需要再剖分. 这种剖分是基于二叉树的结构进行的,每次剖分从三角形的直角顶点引直线到对边中点,则把原三角形分成 2 个子三角形. 以直角顶点为起点,面向对边,右边的为右子节点,左边的为左子节点. 以此逐步迭代,直至分辨率相同. 如图 5 所示.

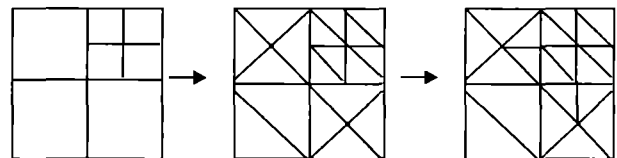


图 5 三角剖分过程

Fig. 5 Decomposition process of triangular meshes

整个节点的三角化步骤可以描述为:(1)对比当前节点与相邻节点的分辨率层次. 如果高于相邻节点,则直接进行单对角化,返回. 否则进入下一步.(2)对节点进行双对角化,依次取上、左、下、右三角形作为根节点建立二叉树. 比较根节点与相邻的节点,如果分辨率层次低,则剖分根节点,得到左右 2 个子节点. 对子节点重复三角化过程. 直至相邻节点分辨率相同.

对于每一个三角形二叉树来说,还须注意与相邻的二叉树的高度差. 如果高度差超过 1,则需要对相邻的子节点进行再分. 如图 6 所示,上三角形的二叉树高度为 1,而右三角形的二叉树高度为 4,高度差为 3. 这时需要对上三角形二叉树的右子节点进行深入分割,直至它与右三角形的左子节点的高度之差不超过 1.

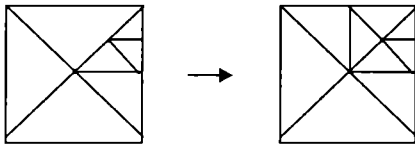


图6 基于二叉树的三角形再分割

Fig. 6 Re-triangularization based on binary tree

由此,利用二叉树三角化方法,可以很好地解决“T形缝”的问题。采用这种方法的优点是:一方面可以保持模型在裂缝生成区的拓扑结构,维护结点之间严密的层次关系;另一方面是结点之间的分辨率层次可以平滑地过渡,不致于产生大的跳跃。图7是一幅多分辨率的地形模型图。图中A、B、C3处的分辨率具有明显的差别,其中A处的分辨率最高,这是由于A处距离视点较近,且处于地形起伏较大的部位,故而公式(4)中的 $C_1$ 和 $C_2$ 这2个因子在此处都比较大,所以分割的深度也就最大了;B处距离视点距离较远,且起伏变化不大,因而此处 $C_1$ 和 $C_2$ 较小,分割深度也较小;而C处距离视点距离最远,地形平坦,所以此处 $C_1$ 和 $C_2$ 最小,分割深度也最小。

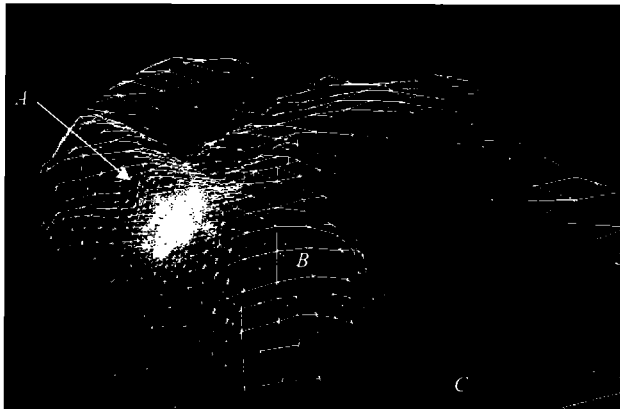


图7 多分辨率地形模型

Fig. 7 Multiresolution terrain model

### 3 结语

基于地理特征的地形多分辨率模型可以较好地地形模型进行不同程度地简化,从而达到减少绘制所需数据的目的。本文对于地形简化评价规则的制定兼顾了地形本身自然特征和面向特定应用的需要,同时在建立二叉树基础上的多分辨率模型时,将二叉树三角剖分与之结合,较好地解决了不同分辨率节点之间的“T形缝”问题。

#### 参考文献:

[1] 龚建雅,夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报,1997,22(1):7-15.

- [2] CLARK J. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms [J]. *Communications of the ACM*, 1976, 19(10):547-554.
- [3] COHEN J, WRIGHT W, Simplification envelopes [C] // STEPHEN S. *Proceedings of SIGGRAPH' 96*. Louisiana: SIGGRAPH, 1996:119-128.
- [4] 淮永建,郝重阳. 基于LOD实时图形绘制和加速技术[J], *中国图像图形学报*, 2002, 7(1):97-102.
- [5] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al. Mesh optimization [C/CD] // STEPHEN S. *Proceedings of SIGGRAPH '93*, California: SIGGRAPH, 1993:19-26.
- [6] ROSSIGNAC R, PAUL B. Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes [R]. Yorktown Heights: IBM Research Division, 1993.
- [7] SCHROEDER W J, JONATHAN A Z, WILLIAM E L. Decimation of triangle meshes [J]. *Computer Graphics*, 1992, 26(2):65-70.
- [8] 马小虎,潘志庚,石教英. 基于三角形移去准则的多面体简化模型[J]. *计算机学报*, 1998, 21(6):492-498.
- [9] KALVIN A D, RUSSELL H T. Superfaces: polygonal mesh simplification with bounded error [J]. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1996, 16(3):64-77.
- [10] 陈礼民,秦爱红. 三维图形简化现算法[J]. *中国图象图形学报*, 1997, 2(23):157-160.
- [11] ALGNRI M E. Mesh simplification, computer graphics forum [J]. *Proceedings of Eurographics*, 1996, 15:77-86.
- [12] RONFARD R, ROSSIGNAC J R. Full-range approximation of triangulated polyhedral [J]. *Computer Graphics Forum*, 1996, 15(3):67-76.
- [13] HOPPE H. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering [EB/OL], [2004-05-10]. <http://www.research.microsoft.com/~hoppe>.
- [14] MARK D, MURRAY W, DAVID E, et al. Roaming terrain: Real-time, optimally adapting meshes [C/CD] // ROBERT M. *Proceedings of the conference on visualization '97*, Arizona Phoenix, 1997:81-88.
- [15] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2001:34-59.
- [16] 吴亚东,刘玉树. 基于连续细节层次的地表模型实时绘制算法[J]. *北京理工大学学报*, 2000, 20(3):309-312.
- [17] Renato Pajarola. Large scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation [EB/OL], [2005-01-12] <http://www.vterrain.org>.
- [18] 谭兵. 大区域地形可视化技术的研究[J]. *中国图像图形学报*, 2003(5):578-585.

【责任编辑 周志红】