

自适应多层次细节信息地表模型生成算法设计

谢传节¹⁾ 万洪涛²⁾

¹⁾(中科院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

²⁾(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 以研究多层次细节信息地表模型快速生成算法为目的, 在分析当前多层次细节信息地表模型生成算法的基础上, 以四叉树结构作为算法的基本单元, 设计和实现了具有自适应能力的多层次细节信息地表模型生成算法; 详细描述了算法的设计, 给出了算法实现所需的关键公式; 最后给出了算法的应用实例和对算法时间效率的分析. 此算法的最大特点是具有很强的自适应能力, 能够自动根据原始地表数据、视距离、视方向、设备条件等的变化来自动调整输出的三角网模型, 并且可以快速地在不同的层次细节模型之间平滑过渡. 从算法的理论分析和应用实例可见, 该算法有很强的自适应能力, 可以满足大的地表模型快速生成和交互的需要.

关键词 地理信息系统 地表模型 层次细节模型

中图法分类号: P208 TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)06-0587-05

Algorithm to Generate Adaptive Level of Detail Digital Terrain Model

XIE Chuan-jie¹⁾, WAN Hong-tao²⁾

¹⁾(State Key Lab. of Resources and Environment Information Systems,
The Institute of Geography Science and Resources, CAS, Beijing 100101)

²⁾(The Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

Abstract In this paper, an algorithm to rapidly generate adaptive LOD digital terrain model is presented. In the beginning, different methods to generate LOD digital terrain model are investigated. The design of the algorithm is Based on the quad-tree. The most important advantage of the algorithm is its ability to generate terrain model adaptively and quickly. The algorithm can generate various terrain model according to change of the original terrain model, the view direction, the view distance, and the capability of the display device. The algorithm can quickly changes between different LOD terrain models smoothly. The detail description of its design is presented in the paper. Moreover, the key functions of the algorithm are also provided in the paper. At the last part of the paper, two digital terrain model of Xiamen area on different LOD terrain models generated by the algorithm are illustrated, moreover, the time complex analysis for the algorithm is also presented. The theoretical analysis and practical testing show that the algorithm has good adaptive characteristic, and the algorithm can meet the needs of browsing and interacting with huge DTM nearly real-time.

Keywords Geographical information system, Digital terrain model, Level of detail

表模型, 以提高 GIS 的交互性.

1 基于四叉树自适应多层次细节信息地表模型生成算法设计

多层次细节信息地表模型生成算法的核心有两

0 引言

结合数字高程模型数据和遥感影像数据生成具有真实感的地表模型, 是当前多维 GIS 系统一个很重要的应用. GIS 系统要求能快速生成和显示地

部分,一是具有不同层次细节信息的地表格网模型的生成,二是不同分辨率的系列遥感影像层次结构的生成.算法的关键是具有不同层次细节信息的地表格网模型的生成.当前不同层次细节信息的地表格网模型的生成具有多种方法,总结起来,可以归纳为两大类,即基于规则格网方法和基于不规则三角网方法,同时在这两大类中,又可以根据具体采用方法上的差别进一步细分.

(1) 基于规则格网结构的多层次细节信息地表格网模型生成算法

计算机图形学领域对基于规则格网结构的多层次细节信息地表格网模型生成算法进行了不懈探索^[1,2],并形成了具有不同特色的方法.按照具体数据结构和采用的简化方法的不同,可以进一步把这些方法分为采用二叉树结构的自适应格网生成算法^[3,4]和实时优化自适应格网(ROAM: Real-time Optimally Adapting Meshes)生成算法^[5].

① 二叉树结构自适应格网生成算法

在二叉树结构自适应格网生成算法中,原始高程数据被分为 3×3 的单元(blocks),并通过二叉树结构将这些单元组织起来,然后按照自上而下或按照自下而上的方法来简化二叉树结构,最后按照简化后的二叉树结构来生成地表三角网模型.

② 实时优化自适应格网(ROAM)生成算法

实时优化自适应格网(ROAM)生成算法是以等边直角三角形为地表模型的基本单元,如图1所示,等边直角三角形可以按照需要进一步分割,形成基于二叉树结构,以表达不同层次细节信息的地表三角网模型.该算法的特点是:其一,可以根据简化算法,动态地分割某个三角形,或是合并处于二叉树同一层次叶结点上的两个三角形,并按照给定的每帧三角形最大数来生成地表三角网;其二,可以维护

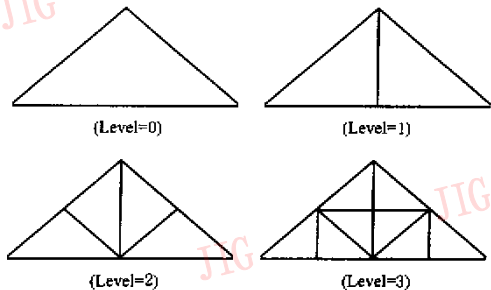


图1 基于二叉树结构,具有不同层次细节信息的三角网模型生成

不同帧之间的连续性,下一帧三角网的生成总是以上一帧三角网二叉树结构为基础.该算法同上述二叉树结构自适应格网生成算法比较起来,在维持地表模型实时生成方面具有优势,但是其在大的形数据的处理能力上不如二叉树结构自适应格网生成算法,而且不利于直接与多层次细节信息的系列遥感影像结构直接结合起来.

(2) 基于不规则三角网(TIN)的多层次细节信息地表格网模型生成算法

基于不规则三角网(TIN)的多层次细节信息地表格网模型生成算法,根据具体方法的不同,也可以分为两类,即表面简化方法和多层次细节信息的三角网方法.

① 表面简化方法

该方法首先通过算法识别数字高程模型中的重要特征点、特征线和特征多边形^[6,7],将规则格网转化为由特征点、特征线和特征多边形表达的面,然后通过不规则三角网生成算法来生成地表不规则三角网模型.该方法与具体的应用有很大的联系,通过预处理形成简化后的地表三角形,在运行时刻直接利用处理好的三角网,所以不具有运行时的自适应能力,难以用来直接生成多层次细节信息的地表模型.

② 多层次结构三角网方法

该算法一般是以表面简化方法为基础,首先通过表面简化方法获取初始地表的最简略表达,然后通过多重三角化方法(Multi-Triangulation)方法,逐步对初始地表三角网模型加密,并通过一定层次结构,将处于不同精度的加密三角网组织起来,在显示时,根据一定的视条件,从多层次结构三角网中选取三角形,生成不同精度的地表三角网模型^[8~11].这种方法的最大的特点是初始多层次结构三角网可通过预处理获得,而运行时刻通过该结构可直接获得地表三角网模型.

本文以二叉树结构自适应网格生成算法的基本思想为基础,设计了自适应、多层次细节信息地表模型算法,其可以根据地表高程数据自动简化地表模型,生成具有不同细节信息的地表格网,并结合具有不同分辨率的系列遥感影像,快速生成在不同条件下具有不同层次细节信息(Level of Detail)的地表模型.

2 本文自适应多层次细节信息地表模型生成算法的特点

本文算法不但继承了一般二叉树结构自适应格

网生成算法的优点,在针对大地形处理和与系列遥感影像层次结构结合上进行了特别设计,总结起来本算法具有下列特点:

- (1) 能够极大地降低绘制三角形的数量,提高多维 GIS 的交互性;
- (2) 能够快速动态生成具有不同层次细节信息的地表模型;
- (3) 在不同层次细节信息的地表模型之间可以平滑过渡;
- (4) 具有很强的自适应性,可以根据原始地表数据、视距离、视方向、设备条件等的变化自动调整输出的三角网模型;
- (5) 能很好地同不同分辨率的系列遥感影像结构结合起来。

本文提出的基于四叉树自适应多层次细节信息地表模型生成算法,是基于四叉树结构自适应网格生成算法设计的。算法的核心有两部分,一是具有不同层次细节信息的地表格网模型的生成,二是不同分辨率的系列遥感影像层次结构的生成,下面将分别介绍这两部分。

2.1 层次细节信息地表格网模型的生成

(1) 地表基本单元划分

在算法中,数字高程模型数据被划分为 3×3 的基本单元,基本单元可以有如图 2 所示的 7 种配置。基本单元通过四叉树结构组织起来。由于要通过四叉树来组织和管理数据,所以要求原始的 DEM 数据的大小必须为 $(2^n \times 2^n)$ 。

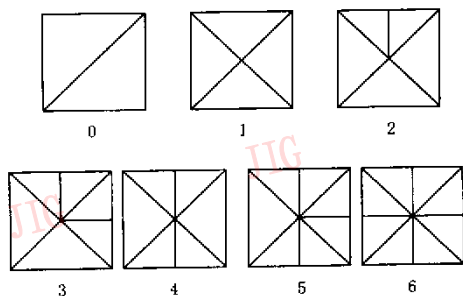


图 2 地表单元的 7 种配置

(2) 单元四叉树的生成

原始的数字高程模型数据 (DEM) 通过单元四叉树组织起来。单元四叉树结构可以维持在一定的深度,一般由计算机内存容量而定,这样单元四叉树结构叶节点所覆盖的地表单元的数量就不同。叶节点所覆盖的地表单元数量由原始的数字高程模型数

据的大小决定,对于较小的(不超过 $1\ 024 \times 1\ 024$) DEM,所覆盖的单元数量可以为 4 个 (2×2);对于较大的 DEM 数据(超过 $2\ 048 \times 2\ 048$),所覆盖的单元数量可以为 16 个 (4×4);而对于巨大的 DEM 数据(超过 $4\ 096 \times 4\ 096$),所覆盖的单元数量可以为 64 个 (8×8)。可见,通过单元四叉树,驻留在计算机内存中的是 DEM 总体信息,而具体的 DEM 数据仍然存在与外存中(即计算机硬盘上),仅是在处理单元四叉树时,处理的深度超过初始深度,才会在外存中去进一步提取数据,而且在算法结束时,仍然会释放超过初始深度的单元四叉树节点,这样就可以非常有效地利用有限的计算机资源来管理巨大的 DEM 数据 (DEM 数据可以超过 GB)。每个单元四叉树节点结构上除了保存有该节点 4 个角点的信息外,还保存有该节点所覆盖区域在高程方向上的最大值和最小值。

(3) 工作四叉树的生成

以单元四叉树为基础,快速生成覆盖整个可见区域的另一个四叉树结构,这里将它称之为算法工作四叉树结构。整个算法以工作四叉树为基础,生成覆盖整个区域的三角网模型。通过工作四叉树节点除了可以获取节点信息外,还可以获取算法所需要的其他信息。工作四叉树的生成过程可以分为以下两个步骤:首先从单元四叉树的根节点出发,寻找工作四叉树的根节点,工作四叉树的根节点覆盖整个可见区域;然后从参与组成工作四叉树的根节点的单元四叉树节点出发,按照广度优先的方法,测试每个单元四叉树的子节点,如果通过测试,则生成包含该单元四叉树节点的工作四叉树节点。在工作四叉树生成过程中,最重要的过程是单元四叉树的测试,测试包括几何指标测试和工作四叉树之间的依赖关系测试。地表单元几何指标测试使用的是下列的公式

$$block_enabled = ((Z_{\max} - Z_{\min}) / V_{\text{dist}}) > M_{\text{berr}}$$

其中, Z_{\max} 为单元中的点在 Z 方向的最大值; Z_{\min} 为单元中的点在 Z 方向的最小值; V_{dist} 为视点到单元中心点距离; M_{berr} 为误差限。

另外,为了维护生成表面的连续性,在工作四叉树节点之间存在着依赖关系,如图 3 所示, B 节点和 C 节点均为 A 节点的子节点, B、C 相邻, B 的子节点 D 和 C 节点之间存在依赖关系。如要生成 D 节点,则要检查 C 节点是否存在,如不存在,则要增加 C 节点。节点之间这种依赖关系,对于快速生成连续的地表三角网模型非常重要。

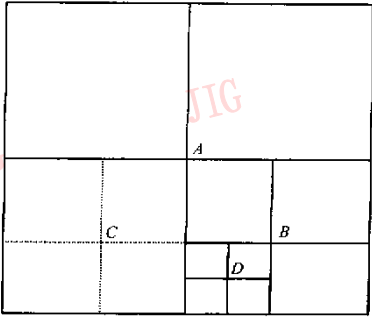
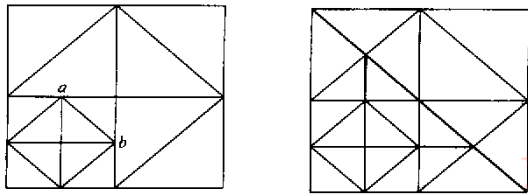


图3 工作四叉树节点之间依赖关系
(C,D之间存在依赖关系)

(4) 地表三角网的生成

地表三角网是在工作四叉树基础上直接生成的,但具体生成过程相对比较复杂.不但要测试工作四叉树节点中点的几何误差限,而且为了保证生成三角网的连续性,还需设定四叉树节点中的一些标志位.地表单元三角网结构如图4所示,在 a, b 点处无法保证地表三角网模型的连续性.



(a) 不连续的

(b) 连续的

图4 三角网结构示意图

为了解决图4(a)所示三角网的不连续问题,在工作四叉树中引入了点是否参与构网的标志位,如点参与构网,则称该点有效,并设置该点对应的有效位.对于工作四叉树节点中各点的有效位有下列基本规律:

- ① 如节点本身需要参与构网,则节点的4个角点自动有效;
- ② 如节点中4个边上有任一点有效,则该节点的中点也有效;
- ③ 节点4个边上的点的有效位可以在该节点相邻的节点之间传播.

在图4(a)中,按照上面的规律3,点 a, b 的有效设置可以传播到相邻的节点,在相邻的节点中应用规律2,可以得到连续的三角网结构(如图4(b)所示).

接下来将讨论节点中的几何误差限测试.在图5中,要测试点 d 的几何误差限,如点 d 参与构网,则有三角形 $\triangle abd$ 和 $\triangle acd$,如 d 不参与构网,

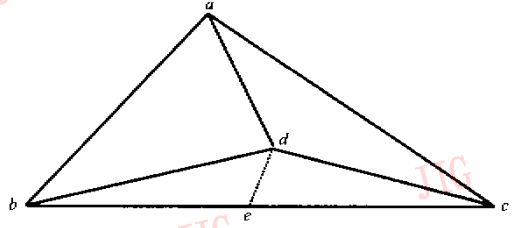


图5 点的几何误差限测试示意图

$\triangle abd$ 和 $\triangle acd$ 被 $\triangle abc$ 取代,假设点 e 为点 d 沿 z 方向在边 bc 上的投影,则点 d 在 z 方向引入的误差矢量为点 d 和点 e 之间的方向矢量,即 $z_{err} = \text{vector}(d, e)$.假设点 d 和点 e 的中点为点 f ,则点 d 在到视方向的向量设定为视点 $view$ 到 f 之间的向量,即 $v = \text{vector}(view, f)$.点 d 的几何误差为点 d 在 z 方向误差向量 z_{err} 在与视方向垂直的方向上投影长度,并计为 $Elen(z_{err}, v)$,最后得到点 d 测试公式为

$$vertex_enabled = Elen(z_{err}, v) > M_{verr}$$

其中, M_{verr} 为误差限; z_{err} 为误差矢量; v 为点到视点的方向矢量.

(5) 算法中误差限的设定

算法中的误差限指的是工作四叉树中地表单元几何误差测试中的误差限(M_{berr})和节点中点的几何误差测试的误差限(M_{verr}).误差限的确定由两个因素决定,一个是显示设备的物理特性,即DEM显示时在显示设备上的分辨率,以栅格来度量;另一个因素是根据显示设备能力预设的每帧三角网中三角形总数的期望值.

2.2 多分辨率的系列遥感影像层次结构生成

自适应多层次细节信息地表模型生成算法的另一个方面是与数字高程模型模型对应的不同分辨率影像数据的处理,包括不同分辨率的系列遥感影像层次结构生成和地表三角网中三角形影像纹理数据的获取.一般不同分辨率的系列遥感影像按分辨率由低到高的顺序,组成金字塔形层次结构,该结构是事先已经建立好的.在获取三角形影像纹理数据时,算法简化后的地表三角网中,三角形纹理数据处理是以工作四叉树节点为单位,这样比按每个三角形计算可以降低计算量.三角形纹理影像数据通过其所在的工作四叉树节点获取.对需要参与计算的节点,从金字塔形层次结构的顶部影像开始计算,计算的准则是该节点在纹理影像上所占据的纹理单元数(texels)大于该节点在显示设备上占据的栅格数

(pixels), 第 1 个满足这个条件的影像数据即为该节点所采用的纹理数据, 同时也为该节点中所有三角形将采用的纹理影像数据。

3 算法应用实例

图版 II 图 1 是由该算法生成的厦门地区地表模型。地表格网初始大小为 2048×2048 , 图的上部分是整个地区的地表模型, 当逐步走近到红色矩形区域内时, 就得到了图的下部分所示的地表模型。

4 时间复杂性分析

在本文算法中, 单元二叉树是在初始化过程中建立的, 所以算法的时间复杂性由工作二叉树的建立、工作二叉树上生成三角网和三角形纹理数据获取这 3 个方面决定。工作二叉树上三角网的生成与三角形纹理数据获取都是以工作二叉树的叶节点为计算单位, 并且与工作二叉树的叶节点数有着线性关系, 所以本文算法的时间复杂性与工作二叉树的叶节点数量有着线性关系。

工作二叉树是在单元二叉树基础上生成, 工作二叉树的深度与单元二叉树测试误差限, 即 M_{berr} , 以及地表起伏的状况有关。实际应用表明, 在平原地区, 通过该算法可以获得接近实时的效果; 而在山区, 由于地表变化较大, 通过单元误差测试的节点自然也会增多, 从而事实上会降低算法的效率, 这时可以通过增大 M_{berr} 来减少通过测试的节点数, 以提高算法的时间效率。

事实上, 本文算法在实现时, M_{berr} 的值具有一定的智能性, 他会自动根据每帧三角网的总数变化而自动调整。在算法中, 有一个外部参数, 即期望的每帧三角网总数。该期望值同所采用的设备有关, 可按设备可以接近实时效果的要求来设定 (一般的 PC 机, 一般不超过 10 000)。如果某一帧三角形总数超过该期望值, 则软件会自动增加 M_{berr} 的值, 如当某一帧三角形总数少于该期望值, 则 M_{berr} 的值会自动减少到基本值。 M_{berr} 的自动调整是本文算法自适应性的一个重要方面, 而且把算法的执行与采用的设备联系起来, 从而在不降低算法近似实时要求的同时, 又可以保证输出图象的质量。

应用实例也表明, 本文设计的算法可以适用于大规模的地表模型生成, 并且可以快速、平滑地在不同

多层次细节信息地表模型之间过渡。

参考文献

- 1 Cosman M A, Mathiesen A E *et al.* A new visual system to support advanced requirements[A]. In: Proceedings of IMAGE V Conference[C], Arizona, USA, 1990:370~380.
- 2 Falby J S, Zyda M J *et al.* NPSNET: Hierarchical data structures for real-time three-dimensional visual simulation[J]. Computers & Graphics, 1993,17(1):65~69.
- 3 Peter Lindstrom, David Koller *et al.* Real-time, continuous level of detail rendering of height fields[A]. In: SIGGRAPH '96 Conference Proceedings[C], New Orleans, Louisiana, USA 1996: 109~118.
- 4 Stefan Röttger, Wolfgang Heidrich, Philipp Slusallek *et al.* Real-time generation of continuous levels of detail for height fields [R]. Technical Report 13/1997, Universität Erlangen-Nürnberg.
- 5 Mark Duchaineau, Murray Wolinski *et al.* ROAMing terrain: Real-time, optimally adapting meshes[A]. In: Proceedings of the Conference on Visualization '97[C], Phoenix, AZ USA, 1997:81~88.
- 6 Douglas D H. Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model [J]. Cartographica, 1986,23(4):29~61.
- 7 Fowler R J, Little J J. Automatic extraction of irregular network digital terrain models[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'97 [C]. Computer Graphics,19,13(2):144~151.
- 8 L De Floriani, E Puppo. Hierarchical triangulation for multiresolution surface description[J]. ACM Transactions on Graphics, 1995,14(4):363~411.
- 9 L De Floriani, P Magillo, E Puppo. Building and traversing a surface at variable resolution [A]. In: Proceedings IEEE Visualization'97 [C], Phoenix, AZ, USA,1997:81~88.
- 10 Hugues Hoppe. View-dependent refinement of progressive meshes [A]. In: Proceedings SIGGRAPH'97 [C], Los Angeles, USA,1997:189~198.
- 11 Hugues Hoppe. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering [A]. In: Proceedings IEEE Visualization '98[C]. North California USA, 1998:35~42.



谢传节 1971 年生, 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室博士生。主要研究方向为 GIS 系统软件设计, 特别是多维 GIS 系统中的数据模型和算法研究。



万洪涛 1969 年生, 1997 年获中科院地理所资源与环境信息系统国家重点实验室博士学位。现正在中科院遥感所进行博士后研究。主要从事地理信息系统、遥感以及水文方面的研究。

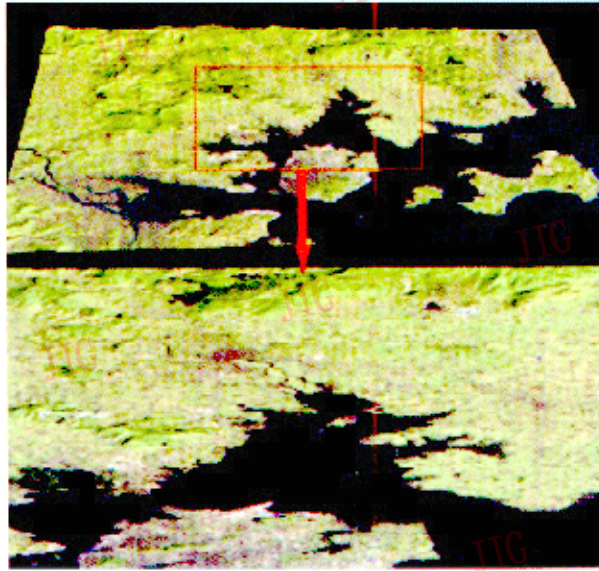


图1 厦门地区地表模型示

周杨等：影像融合在三维地形仿真中的应用



(a) 30米分辨率TM彩色影像
(局部区域)



(b) 1米分辨率IKONOS全色影像
(局部区域)



(c) 高分辨率TM/IKONOS融合彩色影像
(局部区域)



(d) 融合图象与DEM复合的三维图
(局部区域)

图1 融合实验结果