

基于点删除的 TIN 简化算法改进

陈准,姚国清,梁凤林

(中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083)

摘要:三角网格模型的简化在三维建模过程中占有很重要的地位。本文通过系统研究目前常用的三角网简化算法,归纳总结出了各主要算法的优缺点与适用范围。文中重点选择了一种适用性比较广的基于点删除的 TIN 简化算法,并将它应用于实际的三维地形模型简化当中,在实际工作中检验它的实用性。根据三维地形数据量大、精度要求具层次感的特点,对原算法做了一些修改,在保证简化模型细节损失在误差控制范围内的情况下,使得算法简化效率更高。

关键词:三角网格模型;TIN;三角网简化;点删除

中图分类号:P 237 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-070X(2005)03-0023-04

0 引言

近年来,GIS 技术越来越成熟,它一般用多边形网格的数据模型表征原始物体的几何特征,并利用光照、纹理技术来提高多边形网格模拟的真实性和视觉效果。TIN(Triangulated Irregular Network)是 GIS 中表达连续表面的主要方式之一,它具有可变的分辨率,精度高,能较好地表现不规则地貌的形态特征,因此有着非常广泛的用途。通过 TIN 可以进行多种地理信息的分析和处理,包括产生等高线和高程带,计算坡度坡向、表面面积和表面长度以及进行可见性分析和视区分析等。

在所有生成 TIN 的方法中,由于 Delaunay 三角网具有“最大最小内角”规则^[1,2],最大限度地避免了尖锐内角的出现,因此,在地形拟合方面,它的表现最为出色,也得到了广泛的应用。但是,一方面,复杂的 Delaunay 三角网格模型能够较好地表征地形的几何特征,但这需要很高的显示平台支持才能达到一定的绘制速度,而有些模型数据在目前的硬件水平下根本无法达到可接受的绘制效果。比如,在高度数据场得到的三角网格模型的数量级约为 $10^5 \sim 10^7$,如此海量数据,要精确快速地显示需要昂贵的硬件代价;另一方面,简单的 Delaunay 三角网络模型虽然能够获得较高的绘制速度,但在模拟原始物体几何特征上却缺乏跃然的逼真度。因此,超大规模数据量与现有较差硬件条件的矛盾,导致了三

角网简化的必然性。另外,细节层次模型(Level Of Detail, LOD)也是以三角网简化为基础的,所以,三角网的简化是三维建模过程中必须的一个环节。

1 不规则三角网(TIN)简化算法简介

三角网简化的目的是把一个三角网表示的模型用一个近似模型表示,该模型基本保持原模型的可视特征,但是顶点数目少于原始三角网顶点的数目。

三角网的简化有很多算法,根据具体的简化过程(是从一个初始的粗网格逐步增加细节还是从原始网格删除几何元素)分为两类,一类称为逐步细化方法,另一类为几何元素删除方法。其中,几何元素删除方法最为常用,这类方法的具体算法较多,如顶点删除法、边折叠法^[3]及三角形折叠法等,其中,顶点删除法是常用的算法,该算法比较容易实现,特别适合地形 Delaunay 三角网的简化。

文献[4]设计了一个基于点删除的 TIN 简化算法,该算法的目的是在简化原始三角网的基础上建立一个能满足要求的连续 LOD 模型。算法的核心思想是基于 TIN 的 LOD 模型的相邻层次三角形之间不是简单一对多的关系,但通过简化,可以建立起一组对一的关系,即在 LOD 模型层次间切换的时候,可以用细节较高的一组三角形取代细节较低的一组三角形(图1)。

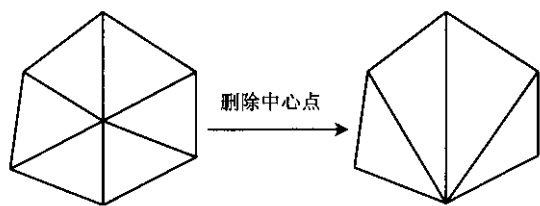


图1 顶点删除示意图

根据以上思想,对一个 TIN 格网遍历所有的顶点,删除可满足条件的顶点及其周围的三角形,修改该点和它相邻点组的删除标志,然后对留下的星形多边形进行局部三角化,同时对顶点结构进行修改,并在三角形链表中删除原始三角形组和增加新的三角形组,得到下一级简化格网。该过程可反复进行,直到要求得到满足为止。这样,就得到一个连续的 LOD 模型。本研究根据实际工作的需要,设计将简化模型划分为 5 级:对应原始模型、第 1 次简化模型、第 2 次简化模型、...第 4 次简化模型。

2 算法新思想

2.1 对误差的考虑

三角网简化的目的就是要获得比初始三角网模型简单,但要尽可能与原三角网模型相似的简化三角网模型。为了能量化评估以某个简化模型代替初始模型所产生误差的大小,有必要建立一种衡量两个三角网模型之间差异的误差评估方法。

三维空间中一点 x 到三角网模型 M 的距离 d_E 定义为

$$d_E(x, M) = \min_{y \in M} [d(x, y)]$$

其中 $d(x, y)$ 为点 x 到点 y 的欧氏距离,即

$$d(x, y) = \sqrt{(x_x - y_x)^2 + (x_y - y_y)^2 + (x_z - y_z)^2}$$

三角网模型 M_0 到 M 的单向 Hausdorff 距离 d_S 定义为

$$d_S(M_0, M) = \min_{x \in M_0} [d_E(x, M)]$$

三角网模型 M_0 到 M 的对称 Hausdorff 距离 d_H 定义为

$$d_H(M_0, M) = \min [d_S(M_0, M), d_S(M, M_0)]$$

选择采用对称 Hausdorff 距离来评估两个三角网模型之间的差异,若三角网 M_0 到 M 的对称 Hausdorff 距离 d_H 小于 ε ,则以网格 M 代替 M_0 时产生的误差小于 ε 。

本算法使用 Hausdorff 距离来衡量简化模型的误差。万方数据

2.2 点删除判定条件的重新设定

在原算法中,给定应删除顶点的判定条件为:

- ①自由度小于给定的值;
- ②重要度小于某个预先定义的值;
- ③相邻点组中没有顶点被删除。

其中,条件②是针对不同 TIN 模型由设计人员人为设定的,为了使算法更具易用性,作者对重要度阈值的设定作了重新的考虑。

设 5 个阈值分别为 C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 , C_0 为所有顶点重要度的最小值,即

$$C_0 = \min\{I_{p_i}\}$$

式中, C_0 不等于零, I_{p_i} 为顶点的重要度。为了使简化模型的变化具有良好的均匀性,要求各阶顶点重要度的下限值满足等比关系,即

$$C_0/C_1 = C_1/C_2 = C_2/C_3 = C_3/C_4 = r \quad (r < 1)$$

当然, C_4 应该小于所有顶点重要度的最大值,即

$$C_4 < \max\{I_{p_i}\}$$

r 与 C_1 两个值的选定可以测试,保证每次的简化效率都是 10%。当然,可以由用户指定的精度来决定。

自由度其实对简化模型的误差控制没有多大的贡献,作者弃用这个判定条件。

2.3 针对效率偏低问题的算法改进

选择顶点的第三个要求导致简化非常不彻底。原来使用这个要求的目的是为了保证简化误差不会累积,但是会有这样一个情况出现:如果周围有点已经被删除的话,即使这个点的重要度为 0,它也不能被删除。所以,到第 5 级简化模型,最简化的效果也是隔一个点删除一个点,根本体现不了地形特征对简化的要求——地形表面曲率小的地方要比曲率大的地方更简化。

为了保持原算法对误差累积的控制,又要提高算法的效率,对整个算法流程做重新设计,即在每次简化之前,加入一简化初始化的环节,在这个环节中,将上次简化中删除顶点的重要度分摊到此顶点的相邻顶点上,使各顶点的重要度不再是固定不变的,而是随着顶点删除的进行而浮动。

在这一环节中,还有一个工作,就是重新生成 TIN 模型,在此 TIN 模型中,不包括删除了的顶点与删除了的三角形,而加进新生成的三角形,重新构建 TIN 的拓扑关系。这个工作能保证上一次的删除顶点不会对本次简化造成扰乱,而只是通过重要度这一参数来控制误差。

3 算法的具体实现

整理以上所有改进思想 ,重新设计算法流程如图 2 所示。

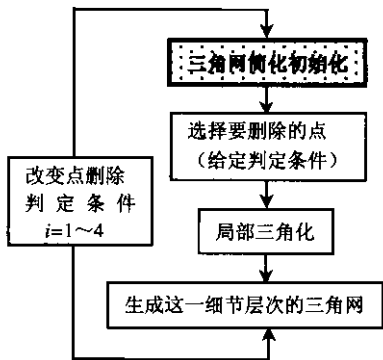


图 2 算法流程

(1)三角网简化初始化 : ①分摊上次删除顶点的重要度 ; ②重新构建 TIN 的拓扑关系。

(2)选择应删除顶点 : ①根据上面讨论的重要度阈值规则 ,确定本细节层次的重要度阈值 ; ②遍历所有顶点 ,将所有满足 $I_p < C_i$ (I_p 为顶点的重要度 , C_i 为本细节层次的重要度阈值)的顶点放入一链表(DeciVertex)里。

(3)局部三角化 : ①遍历链表 DeciVertex ,取出顶点 ,设置顶点的删除标志 ,同时设置所有邻接三角形的删除标志 ; ②三角化删除形成的多边形空洞。

(4)生成本细节层次的 TIN : ①设置所有未删除顶点与三角形的细节层次标志 ,生成这一层次的 TIN。

4 实验结果

4.1 统计结果

简化过程中删除顶点数统计结果如表 1 所示。

表 1 简化统计结果

试验模型顶点总数/个	63 246	
第 i 次简化	删除点数量	
	原算法	改进算法
1	4 036	3 473
2	1 167	5 817
3	8 686	12 997
4	1 162	11 379
总删除点数量/个	15 051	33 666
简化效率/%	23.80	53.23

15 051 个顶点 ,简化效率仅为 23.8% ,而改进算法的简化共删除 33 666 个顶点 ,简化效率为 53.23% ,远远高于原算法的简化效率。而且 ,用改进算法进行简化 ,删除点数基本上随简化的深入而逐级递增 ,这使得简化更加合理和彻底。

4.2 两算法误差比较

随机抽取 10 个点(这 10 个点在两简化模型中都被删除了) ,分别计算这些点在原算法最简化模型、改进算法最简化模型中相对原始模型的高程 (H)误差 ,即

$$ERROR_{old} = H_{old} - H$$

$$ERROR_{new} = H_{new} - H$$

为了方便比较 ,计算了相对误差

$$Error = (Error / H) \times 100\%$$

误差分析数据如表 2 所示。

表 2 两算法的误差比较

顶点 标号	H			误差			
	原模型/m	old/m	new/m	old/m	new/m	old/%	new/%
5284	1 334.00	1 340.67	1 332.99	6.67	1.01	0.50	0.08
12568	1 254.00	1 267.33	1 265.72	13.33	11.72	1.06	0.93
25079	1 174.00	1 160.67	1 174.00	13.33	0.00	1.14	0.00
29405	1 134.00	1 147.33	1 140.67	13.33	6.67	1.18	0.59
33658	1 234.00	1 220.67	1 220.67	13.33	13.33	1.08	1.08
37275	1 054.00	1 054.00	1 046.61	0.00	7.39	0.00	0.70
40748	1 054.00	1 047.33	1 054.00	6.67	0.00	0.63	0.00
56281	1 114.00	1 100.67	1 128.93	13.33	14.93	1.20	1.34
61176	1 134.00	1 134.00	1 134.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14785	1 274.00	1 254.00	1 274.00	20.00	0.00	1.57	0.00
平均误差				10.00	5.51	0.84	0.47

从表 2 不难看出 ,改进算法简化模型的误差与原算法简化模型的误差相差不大。根据项目要求 ,两算法的误差都在允许范围内 ,但是改进算法的效率提高 ,更适合于对简化效率要求高的应用。

4.3 同一控制条件下简化效果图比较

图 3 是原始 TIN 模型线状图 ,顶点非常密集 ,显示效果非常好 ,山脉和河流的轮廓很清晰。

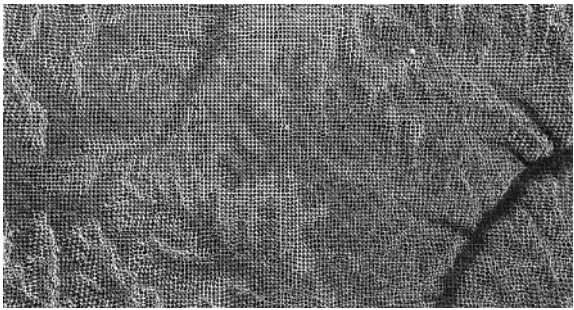


图 3 原始 TIN 模型线状图

图 4 是原算法简化后线状图 ,顶点数据减少 ,山

在实验过程中 ,应用原算法简化模型共删除了

脉和河流的轮廓变得模糊,但是细节的损失在误差范围内。

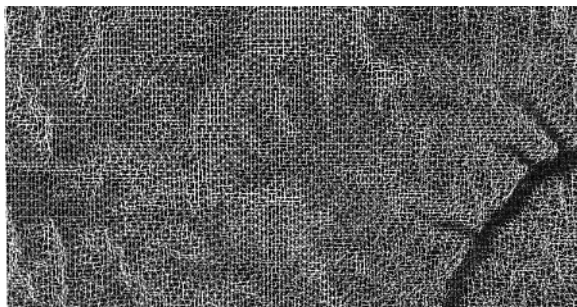


图 4 原算法简化后线状图

图 5 是改进算法简化后线状图,顶点数据明显

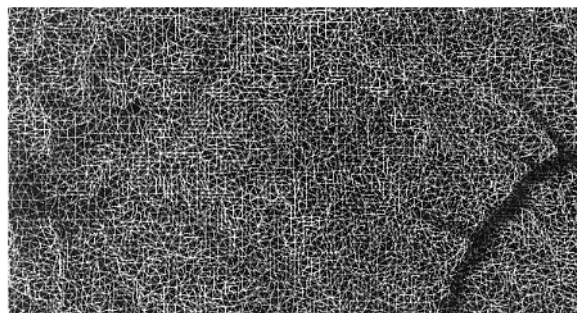


图 5 改进算法简化后线状图

减少,比图 4 的顶点数更少,但是山脉和河流的轮廓没有变得更模糊,虽然损失掉更多的模型细节,但还是在误差范围控制内的,而且这不影响模型的浏览

与查看。在地形查找的时候会对速度要求很高,这种简化模型就很适合。而如果要进行地形测量等对精度要求很高的工作,我们可以调节 LOD 层次,以便显示更精确的地形模型。

5 结论

本研究在算法的误差控制与简化效率等几个方面的改进取得了一定的成功。根据项目在地形浏览与测量过程中对精度的不同要求,改进算法既保留了高精度的原始模型,又提高了简化效率,使基于点删除的 TIN 简化算法适合大规模三维地形的建模和显示,该算法可广泛应用于对地形简化效率要求很高的场合。

参考文献

- [1] Lee D T, Schachter B J. Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation[J]. Int. J. of Computer and Information Sciences, 1980, 9(3).
- [2] 艾廷华,郭仁忠,陈晓东. Delaunay 三角网支持下的多边形化简与合并[J]. 中国图象图形学报, 2001, 7(7).
- [3] 林报嘉,叶燕林,赵建伟. 三角网的生成与简化算法[J]. 地理学与国土研究, 2001, 2(1).
- [4] 许妙忠,李德仁. 基于点删除的地形 TIN 连续 LOD 模型的建立和实时动态显示[J]. 武汉大学学报, 2003, 6(3).

THE IMPROVEMENT OF TIN SIMPLIFIED ALGORITHM BASED ON VERTEX DECIMATION

CHEN Zhun, YAO Guo-qing, LIANG Feng-lin

(College of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Simplification of triangulation structure plays an important role in constructing three-dimensional models. The authors studied all currently-used triangulation-simplification algorithms and applied a very useful algorithm named TIN simplification based on Vertex Decimation to actual simplification of the three-dimensional terrain. Considering the huge quantities of data from the three-dimensional terrain, the authors made some improvement on this algorithm so as to render it more efficient. The simplified modeling using the improved algorithm simplification has the same error as the original algorithm.

Key words: Triangulation structure model; TIN; Triangulation-simplification algorithm; Vertex decimation

第一作者简介:陈 淮(1980-),男,硕士研究生,毕业于中国地质大学(北京)信息工程学院,研究方向为图形图像。

(责任编辑:刁淑娟)