

文章编号:1001-9081(2006)05-1018-03

利用 Voronoi 图构建多分辨率 TIN

王殷行¹, 刘 梁², 石杏喜³

(1. 山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 山东 泰安 271019;

2. 山东煤田地质局物探测量队, 山东 泰安 271000;

3. 南京理工大学 材料科学与工程系, 江苏 南京 210000)

(wyxhtml@163.com)

摘 要:为了满足大区域地形环境的实时高速绘制要求,对多分辨率不规则三角网(Triangulated Irregular Networks, TIN)进行了研究。首先利用 Voronoi 图和 Delaunay 三角网构建了能充分反映地形地貌特征的多分辨率 TIN,然后将多分辨率 TIN 进行了合并,统一管理,动态调用。试验结果表明,该方法构建的多分辨率 TIN 实时绘制地形场景时的质量和速度都很好,可以较好地应用于大规模地形场景漫游中。

关键词: Voronoi 图; 不规则三角网; 多分辨率 TIN; 层次细节技术

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Constructing multiresolution TIN with Voronoi diagrams

WANG Yin-xing¹, LIU Liang², SHI Xing-xi³

(1. College of Geoinformation Science & Engineering

Shandong University of Science and Technology, Tai'an Shandong 271019, China;

2. Exploration and Survey Group, Shandong Geological Bureau, Tai'an Shandong 271000, China;

3. Department of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: To study the LOD techniques for large scale terrain visualization, this paper focused on the design of multiresolution TIN. First, a new approach of constructing multiresolution TIN that represents terrain well was given based on Voronoi diagrams and Delaunay triangulation networks. Second, multiresolution TIN was incorporated, thus making the management and load of it even more easily. The results show that the response speed and display effect are very satisfying. It can make real time and seamless walkthrough in large scale 3D visualization.

Key words: Voronoi diagram; triangulated irregular networks; multiresolution TIN; levels of detail

0 引言

在地理学领域,经常需要处理大量分布于地域内的离散数据。由于这些数据分布的不均匀性,就产生了一个如何合理有效地使用这些数据的问题。Voronoi 图(以下称为 V 图)和 Delaunay 三角网^[1](以下称为 D 三角网)就成了被普遍接受和广泛采用的分析研究区域离散数据的有力工具,活跃于许多与分析有关的领域。^[2]

在 GIS 中,有关地形的分析处理是由数字地形模型(Digital Terrain Models, DTM)模型进行的。DTM 主要由栅格和 TIN 两种数据格式来表示,而以后者更为重要。TIN 相对于 DTM 中的其他模型有着不可替代的优点。TIN 模型可以根据地形的具体特点和复杂程度而确定采样点的密度和位置,可以避免数据冗余,并且可以相对准确地表达地形的结构和细部;同时,它又便于进行地形计算和分析,能够较好地反映实际地形信息^[3]。在进行地形分析或地貌显示时,原始数据多是大量离散高程点,需要进行 TIN 的构建。符合 Delaunay 规则的 TIN(D 三角网)充分考虑了点的影响范围和相邻性,成为了构建 TIN 的首选^[4]。由于实际的地形较为复杂,地形高程点的数据量是巨大的,在进行三维可视化时往往影响处理速度。层次细节简化技术(Level of Detail, LOD)是解决此问题的有效方法。LOD 是在不影响画面视觉效果

条件下,通过逐次简化景物的表面细节来减少场景的几何复杂度,从而提高绘制速度。对 TIN 使用 LOD 技术,涉及到点的取舍、TIN 重构以及多分辨率 TIN 的调用等问题^[5]。为此,下文将对这些问题进行探讨。

1 多级 V 图与多分辨率 TIN 的建立

1.1 由生长点构建多级 V 图

由生长点(地面高程点)构建多级 V 图和 TIN 首先涉及到生长点的取舍问题。每一个生长点对 TIN 的影响力度主要体现在两个方面:一是该点的影响范围,稀疏地方点的影响范围要大于密集地方点的影响范围^[6,7];二是该点与周围点的高程差异,差异大的点影响力度也相应较大。影响范围与高程差异的确定通常用 V 图,点的影响范围可以用其对应的 V 多边形表示,高程差异可以用该点与周围点的高差表示,这里的周围点定义为对应 V 多边形与该点 V 多边形邻接的生长点。影响范围与高程差异比较,高程差异的影响力度要大得多。另外,有些生长点为地形特征点,在综合时应适当保留。

确定生长点的取舍策略后,就可以构建多级 V 图了,矢量 V 图的生成方法有多种,常见的有基于半平面的交的算法、增量构造算法、分治算法、减量算法和平面扫描算法等,多级 V 图构造算法及处理四邻点同圆方法参见文献[9~12]。多级 V 图构建方法如下:

收稿日期:2005-11-11;修订日期:2006-01-19 基金项目:国家自然科学基金资助项目(40501053)

作者简介:王殷行(1972-),男,山东烟台人,博士研究生,主要研究方向:地形三维可视化,虚拟现实; 刘梁(1973-),男,山东滕州人,高级工程师,硕士,主要研究方向:三维建模; 石杏喜(1975-),男,安徽宿松人,讲师,硕士,主要研究方向:CAD 与图形图像处理。

由所有生长点构建一级 V 图 $V(1)$, 如图 1。

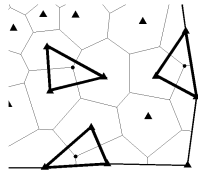


图1 V图与D三角形

依据 $V(1)$ 按照一定的取舍策略删除一定数量的生长点, 由剩下的生长点重新构建二级 V 图 $V(2)$ 。

依据 $V(2)$ 按照一定的取舍策略删除一定数量的生长点, 由剩下的生长点重新构建三级 V 图 $V(3)$ 。

依据 $V(U-1)$ 按照一定的取舍策略删除一定数量的生长点, 由剩下的生长点重新构建 U 级 V 图 $V(U)$ 。

不同级别的 V 图选取的生长点数量不同, 适合构建不同级别的 TIN, 从而应用在不同级别的三维地面场景中。同时, 多级 V 图采用的是基于邻级的综合, 保证了综合的合理性, 使构造的 TIN 能充分反映地形特征。

1.2 由多级 V 图构建多分辨率 TIN

如图 1, 每一个 Voronoi 多边形边界点都连接三条边, 将这三条边所属的三个 V 多边形包含的生长点依次相连, 便得到一个 D 三角形 (D 三角网中的三角形)。该方法在边界处仍然有效, 最终会在包含所有生长点的最小凸多边形范围内生成 TIN (D 三角网), 如图 2。

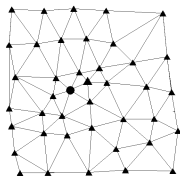


图2 构建 TIN

分别由 1.1 节中构建的各级 V 图构造不同级别的 TIN, 并分开存放。文中称由一级 V 图 $V(1)$ 构建的 TIN 为 $TIN(1)$, 由二级 V 图 $V(2)$ 构建的 TIN 为 $TIN(2)$, 以此类推直至最大级别 $TIN(U)$ 。TIN 由三角形类组成, 三角形类如下定义, 主要增加了两个变量 AC 和 DC。

```
Class Triangle
{
    Public Integer AC;
    /** 此三角形为 TIN 变换为 AC 级时的补充三角形, 默认为 null; **
    **
    Public Integer DC;
    /** 此三角形在 TIN 变换为 DC 级时应当被替换, 默认为 null; **
    Public Points *Point;
    /** // 此三角形的坐标指针, 指向三个生长点; **
    ...
}
```

构建符合 Delaunay 规则的 TIN 方法很多, 像分割-归并法、逐点插入法、三角网生长法等^[8,9]。如果采用其他方法对各级取舍综合后的生长点数据构建符合 Delaunay 规则 TIN, 可以略去 1 节。

2 多级 V 图和 TIN 的局部变化性

由 V 图的性质知道, 删除部分生长点, 重新构建的 V 图仅在局部发生变化。如图 3(b) 为图 3(a) 中删除大三角生长点而重新构建的 V 图, 可以看出, 二图仅粗实线范围内的 V 多边形发生了变化。图 3(c) 为图 3(b) 删除圆形生长点后重新构建的 V 图, 可以看出, 二图仅粗虚线范围内的 V 多边形发生了变换, 我们称 V 图的这种性质为局部变化性。

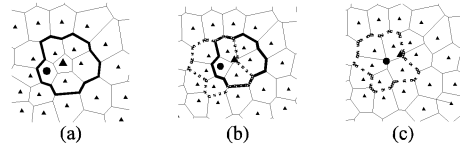


图3 V图局部变化性

由于 V 图的局部变换性, 1.2 节中由各级 V 图构建的 TIN 也仅在局部发生变化。如图 4(b) 为图 4(a) 删除大三角和圆形生长点后重新构建的 TIN, 仅在内部粗虚线范围内的三角形发生了变化。对比二图可以看出, 粗虚线内由 9 个三角形变成 5 个。发生变化的三角形被完全包含在发生变化的 V 多边形范围内, 反之, 发生变化的 V 多边形范围内被包含的三角形 (边界不重合) 会发生变化, 示例如图 4(a)、(b), 粗实线为发生变化的 V 多边形范围。

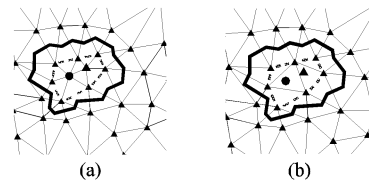


图4 TIN局部变化性

3 多分辨率 TIN 的合并与分级调用

3.1 多分辨率 TIN 的合并

有了 1.2 节中建立的各级 TIN, 就可以构建多分辨率 TIN 合并库, 包括删除重合的三角形, 标定三角形所属显示级别等工作, 具体方法如下:

(1) 将 $TIN(1)$ 中的所有图形的 AC 值赋为 1。

(2) 比较 $TIN(1)$ 与 $TIN(2)$, 将 $TIN(1)$ 中与 $TIN(2)$ 不重合的三角形的 DC 值赋为 2 (如图 4(a) 中粗虚线中的三角形), 表示如果 $TIN(1)$ 变换为 $TIN(2)$, 这些三角形应该被替换。将 $TIN(2)$ 中与 $TIN(1)$ 不重合的三角形的 AC 值赋为 2 (如图 4(b) 中粗虚线中的三角形), 表示这些三角形为 $TIN(1)$ 变换为 $TIN(2)$ 的补充三角形, 删除 $TIN(2)$ 中与 $TIN(1)$ 重合的其他三角形。

(3) 调出 $TIN(1)$ 中 $DC \neq 2$ 的三角形和 $TIN(2)$ 中的三角形形成新图面 $TV(2)$ (此时的图面实际与 $TIN(2)$ 相同), 并与 $TIN(3)$ 进行比较, 将 $TV(2)$ 中没有与 $TIN(3)$ 发生重合的三角形的 DC 值赋为 3, 表示如果 $TIN(2)$ 变换为 $TIN(3)$, 这些三角形应该被替换。将 $TIN(3)$ 中不与 $TV(2)$ 重合的三角形的 AC 值赋为 3, 表示这些三角形为 $TIN(2)$ 变换为 $TIN(3)$ 的补充三角形, 删除 $TIN(3)$ 中与 $TV(2)$ 重合的其他三角形。

(4) 调出 $TV(2)$ 中 $DC \neq 3$ 的三角形和 $TIN(3)$ 中的三角形形成新图面 $TV(3)$ (此时的图面实际与 $TIN(3)$ 相同), 并与 $TIN(4)$ 进行比较, 将 $TV(3)$ 中没有与 $TIN(4)$ 发生重合的三角形的 DC 值赋为 4, 表示如果 $TIN(3)$ 变换为 $TIN(4)$, 这些三角形应该被替换。将 $TIN(4)$ 中不与 $TV(3)$ 重合的三角形的 AC 值赋为 4, 表示这些三角形为由 $TIN(3)$ 变换为 $TIN(4)$ 的补充三角形, 删除 $TIN(4)$ 中的其他三角形。

(5) 调出 $TV(U-2)$ 中 $DC \neq U-1$ 的三角形和 $TIN(U-1)$ 中的三角形形成新图面 $TV(U-1)$ (此时的图面实际与 $TIN(U-1)$ 相同), 并与 $TIN(U)$ 进行比较, 将 $TV(U-1)$ 中没有与 $TIN(U)$ 发生重合的三角形的 DC 值赋为 U, 表示如果由 $TIN(U-1)$ 变换为 $TIN(U)$, 这些三角形应该被替换。将 $TIN(U)$ 中不与 $TV(U-1)$ 重合的三角形的 AC 值赋为 U, 表示这些三角形为由 $TIN(U-1)$ 变换为 $TIN(U)$ 的补充三角形, 删除 $TIN(U)$ 中的其他三角形。

(6) 合并 $TIN(1), TIN(2), TIN(3), \dots, TIN(U)$ 等图形, 形成一个新库 TIN, 为了方便以后调用, 可以以 AC 和 DC 值

建立索引。

在新库 TIN 中,存放了所有必要的各级三角形,并用 AC、DC 表明了他们所属级别,消除了冗余数据。同时,由于是逐步邻级更新比较,避免了一个 DC 被赋值多次的情况。通过如上构造过渡, t 级 TIN—— $TIN(t)$ 的三角形具有如下特点:

- 1) $TIN(t)$ 中所有三角形的 AC 值都小于等于 t ($AC \leq t$)。
- 2) $TIN(t)$ 中所有三角形的 DC 值都大于 t 或等于 null ($DC > t$ or $DC = \text{null}$)。

该规律具有充要条件的特性,即如果将新库 TIN 中同时满足 ($AC \leq t$) 和 ($DC > t$ or $DC = \text{null}$) 的所有三角形调出,则组成了 $TIN(t)$ 。

3.2 多分辨率 TIN 的调用

有了 3.1 节中建立的多分辨率 TIN 库,在进行三维显示时可以依据视点的位置、方向和距离地面的远近等进行分级显示。具体调用过程如下:

假设当前 TIN 级别为 $TIN(J)$ ($J < \text{最大分级数 } U$),当需要由 $TIN(J)$ 变换到 $TIN(J+1)$ 时,通过 AC 索引找到 $AC = J+1$ 的三角形,替换掉当前 TIN 中 $DC = J+1$ 的三角形,算法描述如下:

算法 1

```
For g in Current TIN Index by DC{
  If (g. DC = J + 1) Then Dispose(g);
} //根据 DC 索引对当前 TIN 中的三角形 g 进行取舍;
//Dispose(g): 将 g 舍弃;
For G in TIN_DB Index by AC{
  If G. AC = J + 1 Then Read(G);
} //根据 AC 索引读入 TIN 库中的补充三角形 G; Read(G): 读入 G;
假设当前 TIN 级别为  $TIN(J)$  ( $J > 1$ ),当需要由  $TIN(J)$  变换到  $TIN(J-1)$  时,通过 DC 索引找到  $DC = J-1$  的三角形,替换掉当前 TIN 中  $AC = J$  的三角形,算法描述如下:
```

算法 2

```
For g in Current TIN Index by AC{
  If (g. AC = J) Then Dispose(g);
} //根据 AC 索引值判断三角形 g 的取舍;
For G in TIN_DB Index by DC{
  If G. DC = J - 1 Then Read(G);
} //根据 DC 索引读入补充三角形 G;
```

由于 V 图的构建是邻级综合,各级 TIN 库的建立也是邻级对比,即 M 级 TIN 是综合自 $M-1$ 级,如果进行跨多级显示,必须将目标级 TIN 补充图形周围的三角形恢复到其上级的状态,才不至于留有空隙,跨多级显示算法描述如下:

假设当前 TIN 级别为 $TIN(M)$,当需要由 $TIN(M)$ 变换到 $TIN(N)$ ($N < \text{最大分级数 } U$ 且 $N - M > 1$) 时,调入 $AC = M+1, M+2, \dots, N$ 中 $DC > N$ 或 $DC = \text{null}$ 的三角形替换当前 TIN 中 DC 位于 M 和 $N+1$ 之间 ($M < DC \leq N$) 的三角形,算法描述如下:

算法 3

```
For g in Current TIN Index by DC{
  If (g. DC > M and g. DC <= N)
  Then Dispose(g);
} //根据 DC 索引判断当前 TIN 中三角形 g 的取舍;
For G in TIN_DB Index by AC, DC{
  If (G. AC in (M + 1, N)) and (G. DC > N or
  G. DC = null) Then Read(G);
} //根据 AC、DC 索引读入 TIN 库中的补充三角形 G;
假设当前 TIN 级别为  $TIN(N)$  ( $N < \text{最大分级数 } U$ ),当需要由  $TIN(N)$  变换到  $TIN(M)$  ( $N - M > 1$ ) 时,调入  $AC = 1, 2, \dots, M$  中  $DC > M$  的三角形替换当前 TIN 中  $AC$  大于  $M$  ( $AC > M$ ) 的三角形,算法描述如下:
```

算法 4

```
For g in Current TIN Index by AC {
  If (g. AC > M) Then Dispose(g);
} //根据 AC 索引判断三角形 g 的取舍;
For G in TIN_DB Index by AC, DC{
  If (G. AC in (1, M) and G. DC in (M + 1, N))
  Then Read(G);
} //根据 AC、DC 索引读入补充三角形 G;
```

文中给出了相邻级别和跨多级级别的变换算法,但如果跨越级别过多,在进行视图变换时往往进行跳跃式变化,影响显示效果。文中使用的局部更新策略执行速度完全可以满足将跨多级变换转换为逐步单步过渡变换。

4 结语

该多分辨率 TIN 设计思想在泰安市项目“数字泰山”中进行了验证。构建泰山风景区 TIN 共采集了 9 万个高程点,分为 15 级。由于 TIN 中三角形存储结构固定,采用了 oracle 关系数据库存储,格式如下:

ID	AC	DC	Coors	...
----	----	----	-------	-----

其中 ID 为三角形编号,Coors 为三角形三个点坐标,AC、DC 含义同前。在景区三维可视化屏幕刷新时,使用该多级调用更新算法平均可以提高刷新速度 60% 左右(相关设备:P4 2.6GHz, 256M RAM)。

本文用多级 V 图实现了多分辨率 TIN 模型,并给出了分级调用算法。由于采用逐级综合,生成的多分辨率 TIN 精度高,能够较好地反映脊、谷、鞍等特征。同时,多分辨率 TIN 统一存储,没有冗余数据。采用局部更新的策略使得刷新速度受数据量的影响很小,只是随着综合程度呈近似线性增长,可以较好地应用在地理信息系统中。

参考文献:

- [1] DELAUNAY B. Sur la sphere vide[J]. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, Classe des Sciences Mathematiques et Naturelles, 1934, (8): 793 - 800.
- [2] HIESSEN AH. Precipitation averages for large areas [J]. Monthly Weather Review, 1911, (39): 1082 - 1084.
- [3] 宋哲, 刘衍聪. GIS 中 TIN 模型的实现算法[J]. 计算机应用, 2003, 23(12): 94 - 96.
- [4] 徐青. 地形三维可视化技术[M]. 北京: 测绘出版社, 2000. 144 - 147.
- [5] 郭伦, 刘瑜. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 200 - 201.
- [6] 齐敏, 郝重阳, 佟明安. 三维地形生成及实时显示技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 269 - 275.
- [7] 陈军. Voronoi 图动态空间数据模型[M]. 测绘出版社, 2002. 117 - 124.
- [8] 周培德, 陆易. 计算几何——算法分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 148 - 154.
- [9] 文伟. 用 VC++ 语言实现的 Delaunay 三角剖分算法[J]. 华北电力大学学报, 2000, 27(4): 54 - 58.
- [10] LINDSTROM P, PASCUCCHI 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.
- [11] 舒广, 徐鸿. 一种线性 TIN 地形模型的压缩与解压方法[J]. 计算机应用, 2000, 20(8): 237 - 240.
- [12] REEVES WT, BLAU R. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems[J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 313 - 322.