

规则 DEM 地形数据转换为 TIN 模型的迭代搜索算法

顾耀林, 张 萍

GU Yao-lin, ZHANG Ping

江南大学 信息工程学院, 江苏 无锡 214122

School of Information Technology, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

GU Yao-lin, ZHANG Ping. Iteration searching algorithm of transition from regular DEM terrain data to TIN model. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(23): 69-71.

Abstract: In reality it always needs to transform the regular square grids to the triangulation of irregular network, due to the larger data size and the harder for storage and some analytic calculations need the TIN model. This paper uses the iteration searching algorithm to transform the RSG to DTIN. To improve the executing efficiency, an optimized way of locating points in TIN and a simplified efficient formula of empty circum-circle test are provided in the algorithm.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); Regular Square Grid (RSG); Triangulation of Irregular Network (TIN); Delaunay triangulation

摘 要: 在实际应用中由于规则网格 DEM 的数据量大而不便存储, 而且某些分析计算也经常需要使用 TIN 模型的 DEM, 需要将网格 DEM 转成 TIN 模型的 DEM。采用迭代搜索算法将网格转化为 DTIN。在 DTIN 的生成算法中, 对点的定位算法和空外接圆判断算法进行了改进和优化, 从而提高了算法的整体执行效率。

关键词: 数字高程模型; 规则网格; 不规则三角网; Delaunay 三角网

文章编号: 1002-8331(2007)23-0069-03 文献标识码: A 中图分类号: TP301.6

1 引言

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM), 是数字地形模型 (Digital Terrain Model, DTM) 的子集。数字地形模型是地形表面形态属性信息的数字表达, 是带有空间位置特征的数字描述。数字地形通常有等高线、规则网格 (Regular Square Grids, RSG) 和不规则三角网 (Triangulation of Irregular Network, TIN) 三种不同的表示方法^[1]。

但这三种不同数据结构的数字高程模型表示方式在数据存储以及空间关系等方面, 则各有优劣, 见表 1。从表 1 可以看出, 虽然 TIN 在存储空间的要求上相对较高, 但在处理任意复杂的地形上具有绝对的优势, 加之大多数图形显示硬件都针对三角形进行了特殊优化; 因此, 在可视化研究中以 TIN 的数据结构作为本文研究的数据模型。在实际应用中, DEM 模型之间可以相互转换。大部分 DEM 数据都是规则网格 DEM, 但由于规则网格 DEM 的数据量大而不便存储, 也可能由于某些分析计算需要使用 TIN 模型的 DEM, 如进行通视分析^[2]。有些时候需要将网格 DEM 转成 TIN 模型的 DEM。

表 1 不同数据结构数字高程模型比较

	等高线	规则网格	不规则三角网
存储空间	很小(相对坐标)	依赖格距大小	大(绝对坐标)
数据来源	地形图数字化	原始数据插值	离散点构网
拓扑关系	不好	好	很好
任意点内插效果	不直接且内插时间长	直接且内插时间短	直接且内插时间短
适合地形	简单、平缓变换	简单、平缓变换	任意、复杂地形

最常用的方法是 Delaunay 三角剖分法, 因为它具有唯一性。采用 Delaunay 三角形只需要存储顶点, 对于边则可以用算法生成。这样一来, 可以大大减小 TIN 表示所需的存储量^[3]。因此, 选用合适的算法从 DEM 转换成 Delaunay 三角网是本文研究的主要目的。

2 网格转化为 DTIN 的迭代搜索算法

尽管规则网格 DEM 在计算和应用方面有许多优点, 但也存在许多难以克服的缺陷:

- (1) 在地形平坦的地方, 存在大量的数据冗余;
- (2) 在不改变网格大小的情况下, 难以表达复杂地形的突变现象;
- (3) 在某些计算如通视问题, 过分强调网格的轴方向。

地形形态学的研究表明, 地形的轮廓形状主要取决于少数地形特征点如山峰点、山谷点、山脊点、鞍点等。一旦这些特征点确定了, 那么地形的轮廓、起伏和走向就可以大致确定。不规则三角网数字高程由连续的三角面组成, 三角面的形状和大小取决于不规则分布的测点, 或节点的位置和密度。不规则三角网与高程矩阵方法不同之处是随地形起伏变化的复杂性而改变采样点的密度和决定采样点的位置, 因而它能够避免地形平坦时的数据冗余, 又能按地形特征点如山脊、山谷线、地形变化线等表示数字高程特征。利用这些特征点的 DTIN 表示可以完全或基本上代替原规则网格^[4]。

因此,采用特征点的 DTIN 的表示地形数据模型将减小地形的存储空间,从而解决直接用 TIN 带来的缺点。

目前的 DTM 和 DEM 数据大多是用网格的方式表示的,可以采用迭代搜索算法将网格转化为 DTIN:

(1)假定具有矩形边界的方形规则网格地形块的 4 个角点为特征点。

(2)把上述 4 个角点组成的初始特征点集和矩形的一条对角线构成的 2 个大三角形,作为地形初始 DTIN 表示。

(3)在建立 DTIN 后,可以由 DTIN 解求该区域内任意一点的高程。DTIN 的内插与矩形网格的内插有不同的特点,其用于内插的点的检索比网格的检索要复杂。一般情况下仅用线性内插,即三角形 3 点确定的斜平面作为地表面,因而仅能保证地面连续而不能保证光滑。进行三角网内插,一般要经过以下步骤:

①给定一点的平面坐标 $P(x_i, y_i)$,要基于 DTIN 内插该点的高程 Z ,首先要确定点 P 落在 TIN 的哪个三角形中,检索到用于内插 P 点高程的 3 个网格点。

②若 $P(x_i, y_i)$ 所在的三角形为 $\triangle P_0, P_1, P_2$, 3 顶点坐标为 $(x_0, y_0, z_0), (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$,则由 P_0, P_1, P_2 确定的平面方程为:

$$\begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i & 1 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_{10} &= x_1 - x_0 & x_{20} &= x_2 - x_0 \\ \text{令 } y_{10} &= y_1 - y_0 & y_{20} &= y_2 - y_0 \\ z_{10} &= z_1 - z_0 & z_{20} &= z_2 - z_0 \end{aligned}$$

则 P 点高程为:

$$z_i = z_0 - \frac{(x_i - x_0)(y_{10}z_{20} - y_{20}z_{10}) + (y_i - y_0)(z_{10}x_{20} - z_{20}x_{10})}{x_{10}y_{20} - x_{20}y_{10}} \quad (2)$$

利用上式得到原方形网格处的高程值,并与网格点处的原高程值进行比较,求出高程恢复误差,同时记录高程绝对误差最大的网格点,即整块地形中原方形网格上高程值与通过对 DTIN 的线性插值得到的相同网格上的高程值的绝对值中的最大值。

(4)判断高程恢复误差是否小于等于给定的误差值,若小于等于,则地形特征点的提取完毕。若大于,则继续下一步。

(5)上一步中的 P 点加入到特征点集中去构建新的特征点集,并用特征点集构造 DTIN,从而得到地形的新的 DTIN 表示,并转到第(3)步。直到所有的特征点都抽取完毕。

通过迭代搜索步骤(3)中的线性内插和高程绝对误差的计算,只需要对于新增加的特征点引入的新增三角形进行计算就可以了,而原来的已经存在的老三角形无需重复计算。因此, D-三角网的生成算法是以上 4 个步骤中的关键。

3 Delaunay 三角网的定义及特性

Delaunay 三角网^[5]是 V-图的伴生图形。Delaunay 三角网(D 三角网)的定义是:有公共边的 V-多边形称为相邻的 V-多边形。连接所有相邻的 V-多边形的生长中心所形成的三角网称为 D-三角网。

对于给定的初始点集 P ,有多种三角网剖分方式,而 Delaunay 三角网有以下特性:

(1)其 Delaunay 三角网是唯一的。

(2)三角网的外边界构成了点集 P 的凸多边形“外壳”。

(3)没有任何点在三角形的外接圆内部,反之,如果一个三角网满足此条件,那么它就是 Delaunay 三角网。

(4)如果将三角网中的每个三角形的最小角进行升序排列, Delaunay 三角网的排列得到的数值最大。

4 Delaunay 三角网的生成算法

Tsai 根据实现的过程,把生成 D-三角网的各种算法分成三类:分治算法、逐点插入算法和三角网生成算法^[6]。算法的基本点都是利用 Lawson 提出的局部优化过程 LOP(Local Optimization Procedure)。

LOP 过程^[7]其实就是运用 D-三角网的性质对于两个由公共边的三角形组成的四边形进行判断,如果其中一个三角形的外接圆包含第 4 个顶点,则将此四边形的对角线交换,如图 1 所示。

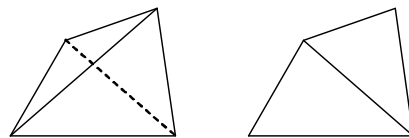


图 1 局部优化过程 LOP

4.1 快速判断点与三角形位置关系的算法

对于点的定位问题,一般是通过扫描整个或局部三角网,利用点在多边形中原理进行判断计算^[8]。但随着点数的增加,三角形数目也成倍增加。当三角形数目较大时,这个过程是相当费时的。但若最多只利用两个向量即可进行点的定位,则可大大提高算法的效率。

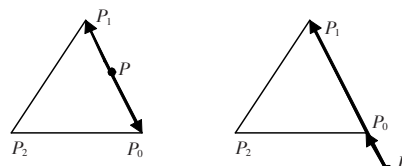
如图所示,三角形 $\triangle P_0P_1P_2$ 的 3 个顶点坐标为 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$,任意点为 $P(x_i, y_i)$ 。则判断 P 与 $\triangle P_0P_1P_2$ 位置关系算法如下:

利用向量的向量积来进行 P 的定位。

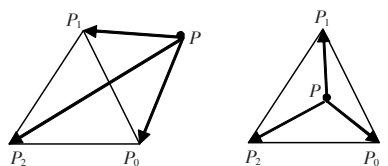
令 $i(0 \leq i \leq 2), j=(i+1) \% 3$, 设 $M_i = PP_j \times PP_i$, 则:

(1)若 $M_i = 0$,则表明 P 与三角形 3 个顶点中的两点共线。假设 P 与 P_0P_1 两点共线,此时, P 的位置还是有两种可能,或在 P_0P_1 线段内,或在 P_0P_1 线段的延长线上,如图 2(a)、(b)所示。当 $PP_0 \cdot x * PP_1 \cdot x > 0$ 或 $PP_0 \cdot y * PP_1 \cdot y > 0$, 则表明 P_0P_1 两点在 P 点的同方向,也表明 P 在 $\triangle P_0P_1P_2$ 的外面;反之,则 P 在线段 P_0P_1 上,即在 $\triangle P_0P_1P_2$ 内。

(2)而判断点 P 在 $\triangle P_0P_1P_2$ 内还是外,则只需判断两个向量即可。因为如果 3 个向量分布在同一侧,则必定有 1 个向量



(a)点在三角形的边上 (b)点在三角形边的延长线上



(c)点在三角形外 (d)点在三角形内

图 2 点与三角形的关系

使得另外的 2 个向量在该向量的同一侧。如图 2(c)所示, PP_0 在 PP_1 和 PP_2 的一边, PP_1 在 PP_0 、 PP_2 的一边, 所以 PP_0 、 PP_1 、 PP_2 中两个向量都可以判断 3 个向量 PP_0 、 PP_1 、 PP_2 对应的顶点 P_0 、 P_1 、 P_2 在 3 个向量原点 P 的一个方向, 所以点 P 不在此三角形中。反之, 3 个向量都在不同的两侧, 则 P 点在 $\Delta P_0P_1P_2$ 内, 如图 2(d)所示。

4.2 点定位后的三角网修改

当 P 点定位到 $\Delta P_0P_1P_2$ 内后, 其位置关系有如下三种情况 (如图 3 所示), 根据不同情况要对三角网进行修改。

(1) 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 内。此时, 将点 P 与三角形的 3 个顶点相连, 形成 3 个三角形, 见图 3(a)。

(2) 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的非凸壳边上。此边必是 2 个三角形的公共边。此时点 P 与 2 个三角形的公共边的对应顶点相连, 形成 4 个三角形, 见图 3(b)。

(3) 当 P 点位于凸壳边上。此边有且仅有一个相邻三角形因此, 只需将点与此凸壳边对应的三角形顶点相连, 形成 2 个三角形, 见图 3(c)。

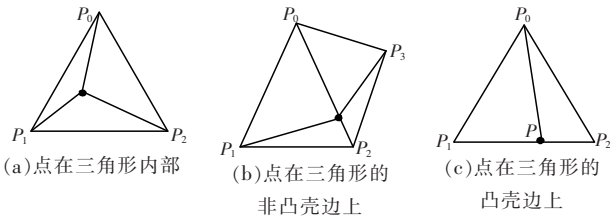


图 3 点在三角形内时的三种情况

4.3 LOP 优化

一旦三角网被修改, 必须进行 LOP 优化。使用 Delaunay 空外接圆准则考查新生成三角形, 如不满足, 则调换与相邻三角形所组成的凸四边形的对角线。若对角线发生交换, 则继续向相邻三角形扩展此过程, 直至满足空外接圆准则或到达三角网边界, 这一过程是恒定的, 具有累计性^[9]。当数据较大时, 它在整个程序执行中所占用的 CPU 时间不容忽视。通常的做法是计算新增三角形的外接圆圆心和半径, 然后利用第 4 点到圆心距离与半径关系进行判定^[10]。但这一过程中多次用到开方、平方等低效函数, 因此有必要尽量减少计算次数和低效的函数, 简化处理用于空外接圆法则的计算公式, 从而提高执行效率。

如图 4 示, 检测 P 点是否在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆内。当 $\alpha < \alpha'$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆外; 当 $\alpha = \alpha'$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆上; 当 $\alpha > \alpha'$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆内。由于 $\alpha' + \beta = \pi$, 故 $\cos\beta = -\cos\alpha'$ 。因此, 可以通过比较 α 、 β 来判断 P 是否在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆内。当 $\cos\alpha < -\cos\beta$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆外; 当 $\cos\alpha = -\cos\beta$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆上; 当 $\cos\alpha > -\cos\beta$ 时, 点 P 在 $\Delta P_0P_1P_2$ 的外接圆内。如果点 P 在外接圆内, 则交换凸四边形的对角线。如果点 P 在外接圆上, 则比较

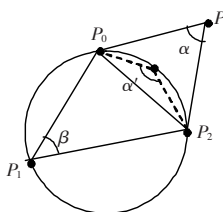


图 4 空外接圆法则的简化

凸四边形 2 个对角线, 取较短的那条。一旦凸四边形的对角线发生交换, 就继续向相邻三角形扩展优化, 直到被检测三角形满足空外接圆准则或达三角网边界。

5 实验结果与分析

应用本文算法原理, 基于 Windows 操作系统在 Visual C++ 2005 编译环境中实现了规则 DEM 数据转换为 TIN 模型, 如图 5 所示。通过比较可以看出, 转换后的地形图地形特征基本被保留下来。相比规格网格而言, 转换后的地形图不仅能够避免地形平坦时的数据冗余, 而且又能按地形特征点如山脊、山谷等表示数字高程特征。利用这些特征点的 DTIN 表示可以完全或基本上代替原规则网格。对于算法的执行效率, 根据问题规模的不同, 分别对规则网格的网格数从 2 000 到 10 000 分别对算法的执行时间进行了测试, 如图 6 所示, 说明了该算法的执行时间和问题规模接近于线性变化, 具有较高的执行效率。



(a) 规格网格 DEM 生成的地形图



(b) 转换成 TIN 后生成的地形图

图 5 将规则 DEM 数据转换成 TIN 模型

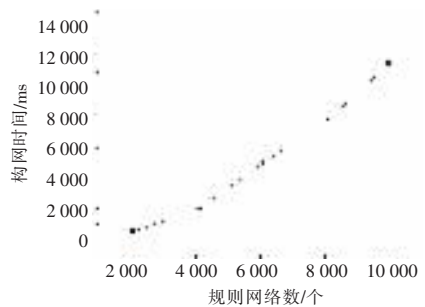


图 6 算法运行时间与问题规模的折线图

6 结束语

本文实现了规则 DEM 数据转换为 TIN 模型算法, 转换后的 TIN 模型基本上保留了原始规则网格的地形特征。实践证明, 该算法有较高的执行效率, 而且执行时间与问题规模接近于线性变化。该算法的实现也是继续进行多分辨率建模和分形仿真的基础。(收稿日期: 2007 年 1 月)

参考文献:

- [1] Wu Xiao-bo, Wang Shi-xin, Xiao Chun-sheng. A new study of Delaunay triangulation creation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(1): 28-35.
- [2] Wu Xiao-bo, Wang Shi-xin, Xiao Chun-sheng. A hybridized method for building Delaunay triangulation[J]. J of Remote Sensing, 2000, 4(1): 32-35.
- [3] Qiu Zhu-li, Li You-li. Research on transition from irregular DEM