

基于Delaunay三角网的模型拼合算法研究

程朋根^{1),2)} 刘少华¹⁾ 龚健雅²⁾ 谭福初¹⁾

¹⁾(东华理工学院测量系, 抚州 344000)

²⁾(武汉大学测绘与遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要 模型拼合在地理建模、铁(公)路路线三维设计等领域应用十分广泛, 研究如何快速高效地获得拼合模型的算法很有必要。基于 Delaunay 三角网模型的拼合算法, 提出了一种快速获取模型拼合交线的方法和快速搜索交线范围内三角形的算法, 采取拼合交线入网及初始 D-三角网的裁剪 2 个关键步骤来实现 D-三角网模型拼合。对模型拼合的整个过程进行了详细的阐述, 采用 VC++ 6.0 语言实现了算法, 并利用实验数据对算法进行测试, 验证了算法的正确性与可行性。

关键词 计算机图形学 Delaunay 三角网 裁剪 模型拼合 算法

中图分类号: TP301.6 P208 TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0451-05

Research on Models Merge Algorithm Based on Delaunay Triangulation

CHENG Peng-gen^{1),2)}, LIU Shao-hua¹⁾, GONG Jian-ya²⁾, TAN Fu-chu¹⁾

¹⁾(Department of Surveying, East China Institute of Technology, Fuzhou, 344000)

²⁾(National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract Models merging is widely used in many domains such as geography modeling, 3D design of highway and railway route and so on, so it is essential to design an efficient models merging algorithm. The objective of this paper is to research on models merging algorithm based on Delaunay triangulation. A method of obtaining model merged intersection lines quickly and an algorithm of searching triangles on the inside of the intersection lines fast are proposed. For the purpose of implementing Delaunay triangulation models merging, two main steps, such as insert the merged intersection lines into the Initial Delaunay Triangulation (IDT), and cut the triangles inside of the intersection lines in IDT out, are adopted. The processes of models merging are expatiated detailedly. The proposed algorithms are implemented by using VC++ programming language and tested by some experimental data. The experimental result validated the correctness and feasibility about the proposed algorithms.

Keywords computer graphics, Delaunay triangulation, cut out, model merging, algorithm

1 引言

不规则三角网在地理信息系统、地学、计算机图形学及虚拟现实等领域有着广泛的应用, 也是近 20 年来的热门课题之一。由于 Delaunay 三角网(简称 D-三角网)具有最大的最小角及空外接圆两大重要性质, 因此它在所有的构网原则中是最优的, 这也使它成为数字地面模型 DTM 的一种主要的表示方法。通过不规则三角网建立的数字地面模型(简称

DTM)具有很高的实用价值, 不仅可以用于坡度分析、填挖方的计算, 还可用于 2 个 D-三角网模型进行拼合时, 平面或三维设计等应用中。比如, 在某地区建一大坝, 首先建立该地区的数字地面模型(称为初始 D-三角网模型), 然后就可以按实际需要在大坝进行选址, 构建一大坝的 D-三角网模型(称为设计 D-三角网模型), 将两模型拼合, 就可得到一新的带大坝数据模型的数字地面模型(称为目标 D-三角网模型), 这样一来, 就可以在新的模型上进行各种操作运算, 所以 D-三角网模型的拼合具有重要的实

基金项目: 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(WKL(01)0302); 国家“973”资助项目(G2000077904); 香港理工大学科研基金资助项目(B. 34. 37. Q238)

收稿日期: 2002-11-06; 改回日期: 2003-12-19

用价值。目前,国内外有关 D-三角网的构建算法非常成熟^[1~4],但 D-三角网模型拼合算法还不多见,文献[5]中提到了模型的叠加算法,但是只用孔斯曲面片构建的设计模型与 D-三角网模型的拼合。为此,在 D-三角网的构建算法的基础上,对 D-三角网模型拼合算法进行了研究,并提出了相应的算法,有效地解决了 D-三角网模型间的拼合问题。

2 算法涉及的数据结构

算法的执行效率与算法设计的数据结构之间存在密切的关系,一个好的数据结构能对数据进行高效的管理,从而提高算法的执行效率。算法涉及的数据结构如下:

(1) 顶点数据结构

```
typedef struct vertex
{
    int NO; //顶点号
    double x,y,z; //顶点的三维坐标
} VERTEX;
```

(2) 三角形数据结构

```
typedef struct triangle
{
    int NO; //三角形号,它对应于三角形链中的索引号
    int triNO[3]; //三角形 3 个邻接三角形号
    BOOL delete_flag; //三角形的删除标志
    struct vertex v[3]; //三角形的 3 个顶点
} TRIANGLE;
```

有一点需要说明一下,在存储三角形时,三角形 3 个顶点的顺序是按逆时针方向。如果三角形某条边 i (取值范围为 0, 1, 2) 的邻接三角形为空,则令 $triNO[i] = -1$ 。三角形结构中也隐含了一条重要信息,即每个三角形的三边下标对应于三角形结构中的 $triNO[i]$ 的 i 值,它是用 0, 1 和 2 来表示的。

3 D-三角网模型拼合

模型拼合的整体思路如下:先分别构建初始 D-三角网模型及设计三角网模型,再求出设计三角网模型的外围边(称为拼合交线),然后将所求的所有外围边作为约束线段嵌入到初始 D-三角网模型中。这些外围边组成一个多边形,将包含在该多边形内的所有初始 D-三角网模型中的三角形删除(称初始 D-三角网的裁剪),就实现了模型的拼合。

在构建初始 D-三角网模型过程中,采用内插法并对模型中的每个三角形都建立了网格索引,三角形建立索引是以其重心为基准为基准,这将大大提高判断点所在三角形中的速度,有利于初始 D-三角网模型中内插拼合交线的顶点和快速确定拼合交线在初始 D-三角网模型中的影响区域,从而提高了模型拼合的速度。

3.1 设计三角网模型的外围边获取

对设计三角网模型中的每个三角形进行判断,如果三角形中某条边 i 的邻接三角形不存在即 $triNO[i] = -1$,则说明该边为外围边。这种方法虽然可以得到所有的外围边,但执行效率不高,且得到的外围边按先后顺序并不是相连的。由于在相邻的两拼合交线的顶点中,有一个顶点是相同的,按上述方法,将拼合交线顶点插入初始三角网模型的过程中,存在很多的重叠计算工作,每个顶点都被使用 2 次,即使第 2 次没有入网,但因先要定位点所处的三角形,并检查该点是否已经存在,所以也要花费一定时间,从而降低了模型拼合的效率。如果能找到一种方法,使外围边按得到先后顺序相连,那将有助于拼合交线入网。

如图 1 所示,先在三角网中找到任一条外围边 13,并用外围边链表存储;然后从该外围边 13 出发,在目标三角形 T_1 中按逆时针方向搜索边,如果是外围边,则将目标边改为目标三角形中下标比当前边下标大 1 的边,具体过程如下:设边 13 在目标三角形 T_1 中对应下标为 i ,由于该边是外围边,下一次要找的边就是目标三角形中下标为 $i+1$ 对应的边 32,如果 $i+1$ 等于 3,则令其值为零,若该边不是外围边,则目标三角形由 T_1 转为边 32 的邻接三角形 T_2 ,在三角形 T_2 中按逆时针方向搜索边,就得到边 34 并判断,若没有找到则目标三角形转到 T_3 ,按同样的方法就可得到外围边 35,并存到外围边链表尾部。由于 35 是外围边,下一目标边就变为 54,如此下去就可以把所有的外围边全部找出,并且按得到的先后顺序,它们一定是相连的。这样拼合交线就形

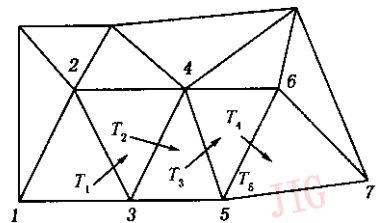


图 1 生成拼合交线

成了。这一过程的结束标志是循环一周后,目标三角与第一个目标三角形 T_1 相同时就结束过程。

3.2 拼合交线入网

将拼合交线纳入初始 D-三角网模型中是模型拼合的一个重要环节,这一过程与在无约束的 D-三角网中嵌入约束线段类似。拼合交线入网的整体思路分两步进行,首先将拼合交线的所有顶点入网,然后找到每条拼合交线的影响区域,并进行三角网的局部重构。

3.2.1 拼合交线顶点入网

拼合交线顶点入网实际上就是在三角网中内插点。具体的实现过程与内插构网算法相同^[1,2,6,7]。由于在构建初始 D-三角网模型时,实时生成的三角形采用了网格索引,它大大加快了点在三角网中的定位,从而提高了拼合交线顶点入网的速度。

3.2.2 影响区域的形成及三角网局部重构

拼合交线入网的关键在于确定其影响区域。影响区域的形成要通过求交运算,从拼合交线的第 1 个端点所在的三角形出发,沿着拼合交线的方向前进,判断前进过程中所有经过的三角形与拼合交线是否相交,如相交,则纳入拼合交线的影响区域中,否则,继续前进,判断,直至到达拼合交线的另一个端点就结束该条拼合交线影响区域的确定过程。实际上,影响区域是与拼合交线相交的三角形的并集,这个并集是一个封闭区域或说成是一个多边形。由于拼合交线的顶点已经全部入网,拼合交线 ab 把影响区域分成左右两部分,如图 2 所示,因此拼合交线影响区域的三角网局部重构要分左右两边进行,拼合交线 ab 左边 (P_{left}) 的 D-三角剖分过程与右边 (P_{right}) 一样,现以 ab 的右边三角网局部重构算法为例进行说明:

(1) 在 ab (有向,下同) 右边,从组成影响区域的顶点集 V 中,找与 a, b 组成夹角最大的点 4 ,组成第 1 个三角形 $a4b$,并将所生成的 3 边的使用次数加 1,如图 2 所示。

(2) 分别以三角形的 2 条新边 ($a4, 4b$) 作为基底,重复上一步进行扩展生长,当扩展边是外边界边或是使用了两次时,就结束该边向外扩展(例如, $4b$ 是边界边,它不向外扩展),如果新生成的三角形的某边是影响区域的外边界边且该边有两相邻三角形时,要对该边的两邻接三角形进行 LOP (局部优化处理) 优化,若两三角形共圆要交换对角线,以保证三角网最优,并建立三角形拓扑关系,例如,在新生

成的三角形 $a4b$ 中, $4b$ 为外边界边,如果边 $4b$ 有两相邻的三角形 ($\Delta a4b, \Delta 4cb$) 就要进行 LOP 优化,否则就不进行 LOP 优化。

(3) 重复第 2 步,将新生成的边作为基底进行扩展生长,直至所有的边都被处理了一次为止,这样就完成了该约束线段影响区域三角网局部重建。

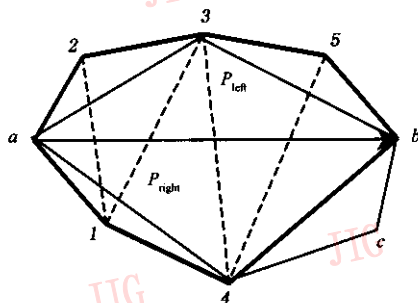


图 2 拼合交线影响区域与三角网局部重建

3.3 初始 D-三角网的裁剪

要实现模型间的真正拼合,还必须在初始 D-三角网模型中,将包含在拼合交线组成封闭区域内的所有三角形全部删去。当所有的拼合交线全都插入到初始 D-三角网模型中时,它将形成一约束边界,约束边界内的所有三角形都是要被删除的。显然找出所有在约束边界内的三角形是个关键。如果对初始 D-三角网模型的所在三角形都进行判断,看是否在约束边界内,将一个很复杂的过程,且非常费时,特别是当初始 D-三角网模型中三角形数很多时,这种方法是不可取的,本文根据三角形的拓扑关系,通过如下算法大大简化了这一过程。为便于算法的实现与管理,建立数组 $Array_D$ 用于存储约束边界内的三角形,设置变量 TT 表示数组 $Array_D$ 内三角形的总数,并设置一个三角形使用计数器 TU 。设三角形 T 是约束边界内的一个三角形,并已存储在 $Array_D$ 中,此时 $TT=1, TU=0$ 。搜索约束边界内部所有三角形的算法描述如下:

(1) 在初始三角网模型中,对 $Array_D$ 中的第 $(TU+1)$ 个三角形 T 的 3 边分别进行判断,如果不是组成约束边界的边(图 3 的粗线边),且与该边邻接三角形的删除标志不为真,就将其存入数组 $Array_D$ 中, TT 加 1,并在初始三角网模型中,将该三角形的删除标志设为真;当三角形 T 的 3 边都进行判断后,三角形的使用计数器 TU 加 1。例如,如图 3 所示,在起始三角 T 中,由于边 ab 和边 bc 都是约束边界边,则这两边对应的与 T 相邻两三角形

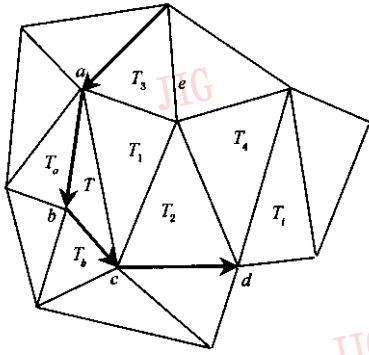


图3 搜索内部三角形

(T_a, T_b) 不存入数组 $Array_D$ 中, 由于边 ac 不是约束边, 所以该边与 T 相邻的三角形 T_1 应存入三角形数组 $Array_D$ 中, TT 加 1, 并在初始 D-三角网模型中, 将三角形 T_1 的删除标志设为真; 之后三角形的使用计数器 TU 加 1。

(2) 判断 TU 是否等于 TT ? 如果 TU 小于 TT , 则重复第 1 步; 如果 $TU = TT$, 则结束约束边界内部三角形的搜索, 此时, $Array_D$ 中存储了约束边界内部的所有三角形, 而初始三角网模型中位于约束边界内部的所有三角形的删除标志均为真。

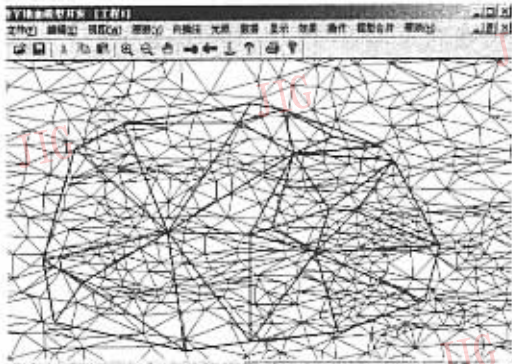
上述算法是从一个处于约束边界内的三角形 T 开始的, 如果专门要去找处于约束边界内的任一三角形 T , 也是一件很麻烦的事, 为了省去这一步工作, 算法在实现时按下面的方法进行: 设计 D-三角网模型的外围边是按逆时针方向逐一得到, 所以拼合交线左侧的邻接三角形应该被删除, 于是在最后一条拼合交线入网时, 把拼合交线左侧进行 D-三角剖分生成的第 1 个三角形 (如图 2 中的三角形 $ab3$) 记录下来, 并把它作为搜索约束边界内部三角形的出发点 (即三角形 T)。

在初始 D-三角网模型中, 将所有删除标志为真的三角形全部删掉, 就完成了初始 D-三角网模型的裁剪。

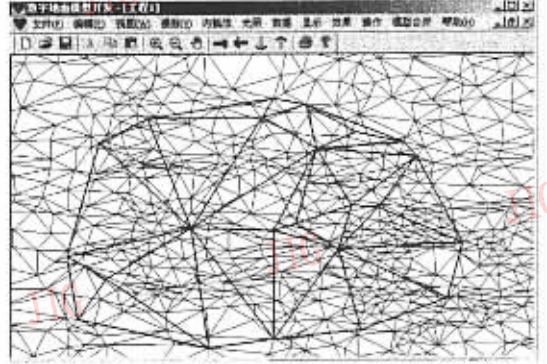
通过以上操作过程后, 初始 D-三角网模型与设计 D-三角网模型的并集就是拼合模型。

4 应用实验与结论

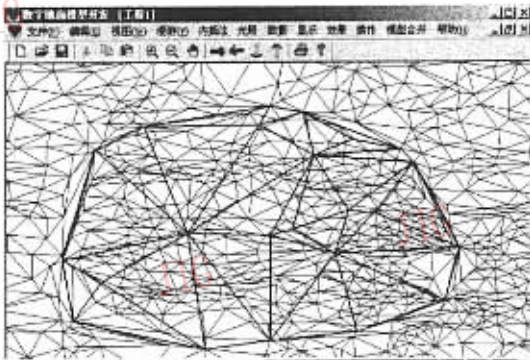
按照上述算法的思路, 在 VC++6.0 下实现了算法, 并通过实验数据对算法进行了测试, 实验结果如图 4 所示。



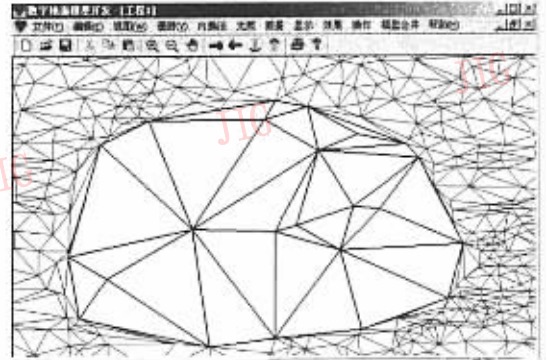
(a) 模型拼合前



(b) 拼合交线顶点入初始网



(c) 拼合交线入初始网



(d) 模型拼合后结果图

图4 模型拼合过程图

图 4(a)为模型拼合前的初始 D-三角网模型与设计 D-三角网模型;按照算法的步骤,先拼合交线顶点入网,顶点插入到初始三角形模型中的结果如图 4(b)所示;然后拼合交线入网,入网之后的情形如图 4(c)所示;再将约束边界内的三角形全部删除实现模型间的拼合,两模型合并后生成的新 D-三角网模型如图 4(d)所示。拼合的过程是在瞬间内完成的,从实验的结果中,可以看出算法的可行性与正确性。该算法可适用于铁(公)路路线三维设计及地理建模等诸多的工程应用中,具有较高的实用参考价值。

参 考 文 献

- 1 武晓波,王世新,肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28~35.
- 2 刘学军,符铎砂,赵建三. 三角网数字地面模型快速构建算法研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 16~20.
- 3 徐青,常歌,杨力. 基于自适应分块 TIN 三角网建算法[J]. 中国图象图形学报(A 版), 2000, 5(6): 461~465.
- 4 Lewis B A, Robinson J S. Triangulation of planar regions with applications[J]. The Computer Journal, 1978, 21(4): 324~332.
- 5 蒲浩,宋占峰,詹振炎. 基于 Delaunay 三角网数字地面模型的路线三维建模方法[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 81~87.
- 6 刘少华,程朋根,陈红华等. Delaunay 三角网内插特征点算法研究[J]. 华东地质学院学报, 2002, 25(3): 254~257.
- 7 刘学军,龚健雅. 约束数据域的 Delaunay 三角剖分与修改算法[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 82~88.



程朋根 1964 年生,教授,硕士生导师,1996 年获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业硕士学位,现为武汉大学摄影测量与遥感专业博士研究生。主要研究方向为地理信息系统理论研究与应用开发、三维 GIS 空间数据模型、计算机地图制图等。

刘少华 1976 年生,助教,2003 年获东华理工学院大地测量学与测绘工程专业硕士学位,现在江汉石油学院地球科学系工作。主要从事三维 GIS 数据模型、理论研究与应用开发和图形算法等方面的研究。

龚健雅 1957 年生,教授,博士生导师,1992 年获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业博士学位。主要研究方向为地理信息系统理论关键技术与软件开发、遥感图像处理、空间数据模型等。

谭福初 1977 年生,助理工程师,2003 年获东华理工学院大地测量学与测绘工程专业硕士学位,现在广州市房地产测绘所工作。主要从事房产测绘与信息系统应用研究。