

一种复杂轮廓线的真三维 TIN 算法

朱 庆¹ 李逢春^{1,2} 张叶廷¹

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 东方地球物理勘探有限责任公司物探技术研究中心,涿州市甲秀路,072750)

摘 要:针对多层轮廓线三维重构问题,研究了真三维复杂轮廓线的空间分布特征,通过引入参考基准面概念,提出了一种顾及局部平展特性的真三维 TIN 生成算法。该方法在递增生成表面过程中,利用了加权最小三角化方法,动态建立参考基准面,将三角面片自身形态和局部邻接轮廓点的相对空间关系有机地结合起来,避免了面片的遮掩重叠和自相交,使得重建表面和原始表面的拓扑差异最小。选取三维地震量测的多层反射波剖面数据进行了实验,并对不同算法得到的实验结果进行了分析比较,得出实验结论:本文算法快速可靠,重建出来的三维表面过渡光滑、自然,更接近实际的表面形态。该方法对于石油、地质勘探三维地质构造形态辅助解译具有现实的应用意义。

关键词:三维表面重建;不规则三角网;局平特性;参照基准面

中图法分类号:P208

复杂三维表面的优化算法是以优化准则为目标进行处理的。目前,大致有以下两种处理方法:① 全局优化方法,依照某种度量对目标进行全局寻优,如利用有向图寻找最短路径的方法来确定三角形的连接形式^[1,2];② 局部优化方法,选择轮廓线上的两个顶点进行连接,然后依照某种局部度量选择最优的两点进行连接^[3],逐步构造物体表面。如果层与层间的距离特别小,对应问题可以通过轮廓线的重合程度来解决。但当距离较大而重合程度不能得到正确结果时,对应问题就成为一个不确定性难题了^[4]。为了得到不自交的三维表面,提出了基于动态规划算法(BPLI)的最优化三角剖分策略^[5-8]。该方法将不同层轮廓线投影到 xy 平面上,将不同层轮廓线的相交和相似部分提取出来分段匹配并剖分,然后采用基于动态规划法求解其余部分的三角剖分。文献[9]提出了一种基于角度均分取点并满足面片方向一致和跨度最小条件的三角形连接方法。

在上述表面重构的方法中,轮廓线分别位于不同的二维平面内,且平行于 xy 平面。轮廓线的分割、匹配和分支处理便于投影到 xy 平面来

考虑。在实际应用中(如地球物理勘探三维数据解译),对来自多层表面非平面轮廓线的三维 TIN 构建很困难。因为同一条轮廓线在深度方向的位置波动幅度可能很大,如较大的凹陷和凸起,相邻层间轮廓线的连接和对应关系也变得更加复杂。即使将轮廓线投影到二维平面,同一条轮廓线自身也往往会产生大量的重叠和交叉现象。现有的经典方法难以进行对应和匹配,而且得到的结果往往与实际情况的拓扑差异较大。与上述各种基于多组二维平面轮廓线的三维重构方法不同的是,本文研究了一种真三维复杂轮廓线重构算法。本文方法是一种局部最优的方法,每次从轮廓线上的两个候选顶点中选择并进行连接;然后依照当前生成的三角形和候选轮廓线节点建立局部参考基准面,度量选择最优的点构造新三角形,逐步生成覆盖相邻轮廓线的表面。

1 顾及局部平展特性的真三维 TIN 生成算法

首先将数据经过预处理(包括重点剔除、边界

自相交处理、是否闭合);然后寻找初始连接边,在递生成表面过程中,利用加权最小三角化方法和动态建立的参考基准面,依照三角面片自身形态以及与局部邻接轮廓节点在轮廓线走向的相对空间关系选取最优节点构造新三角形,并同步更新拓扑邻接关系。当完成两相邻轮廓的构网后释放辅助拓扑邻接边界列表内存,然后继续进行下两条邻接轮廓线的拼接。算法的流程如图 1 所示。

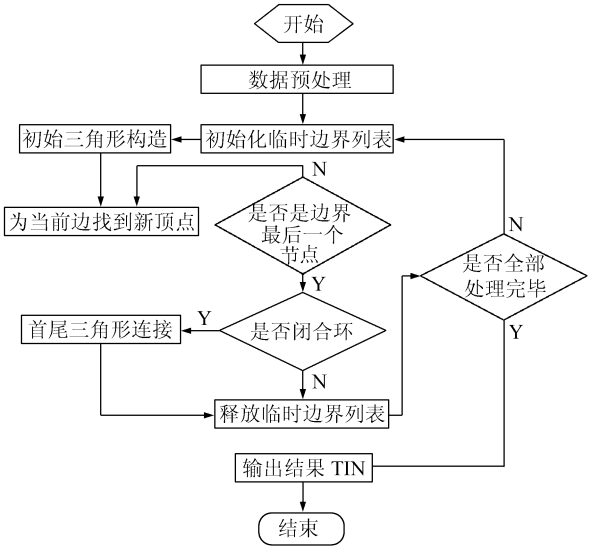


图 1 真三维 TIN 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of True 3D TIN Modelling

1.1 初始边连接

首先要找到一条连接 (z_k, z_{k-1}) 的初始边。然后按照以下的步骤进行相邻剖面线间初始三角形构造。

- 1) 在 z_{k-1} 中任意选择一个点 P 作为初始连接边的起点。
- 2) 在 z_k 中找到与 P 点空间距离最近的一点 Q 作为初始连接边的终点。
- 3) 分别以 P 、 Q 的前驱节点 R 和 L 作为第三顶点,得到两个三角形 $\triangle PQR$ 和 $\triangle PQL$ 。 N 表示三角形的法向量,如果 $N_{PQR} \times N_{PQL} > 0$,转到步骤 5);如果 $N_{PQR} \times N_{PQL} \leq 0$,转到步骤 4)。
- 4) 以 Q 的前驱(或者后继)节点替换 Q ,转到步骤 3)。
- 5) 选取 $\triangle PQR$ 和 $\triangle PQL$ 中的面积最小者作为初始三角形,并将初始三角形三边的拓扑信息保存到边界列表。

1.2 新顶点搜索

如图 2 所示, (z_k, z_{k-1}) 是一对相邻轮廓线。新顶点搜索的主要思想是,从 (z_k, z_{k-1}) 的初始三角形开始,以三角形向前扩张的方式完成每对轮

廓线 (z_k, z_{k-1}) 的联网。假设 $\triangle Q_{j-2} P_{i-1} Q_{j-1}$ 是当前生成的三角形, P_{i-1} 的后继节点 P_i 和 Q_{j-1} 的后继节点 Q_j 将是新三角形的候选点,谁将入选一方面取决于 P_i 、 Q_j 相对于当前三角形 $\triangle Q_{j-2} P_{i-1} Q_{j-1}$ 的加权三角化值;另一方面取决于新三角形和局部邻接面片间的相对空间关系。以候选点 P_i 为例,相对于邻接三角形加权三角化值为:

$$W(P_i) = k(P_{i-1}, Q_{j-1}) |P_{i-1} Q_{j-1}|^2 + k(P_{i-1}, P_i) |P_{i-1} P_i|^2 + k(Q_{j-1}, P_i) |Q_{j-1} P_i|^2 \quad (1)$$

$$k(P_{i-1}, Q_{j-1}) = (|P_{i-1} Q_{j-2}|^2 + |Q_{j-1} Q_{j-2}|^2 - |P_{i-1} Q_{j-1}|^2) / A(P_{i-1} Q_{j-1} Q_{j-2}) + (|P_{i-1} P_i|^2 + |Q_{j-1} P_i|^2 - |P_{i-1} Q_{j-1}|^2) / A(P_{i-1} Q_{j-1} P_i) \quad (2)$$

$$k(P_{i-1}, P_i) = k(Q_{j-1}, P_i) = 2 \times (|P_{i-1} P_i|^2 + |Q_{j-1} P_i|^2 - |P_{i-1} Q_{j-1}|^2) / A(P_{i-1} Q_{j-1} P_i) \quad (3)$$

式中, W 为加权三角化值; k 为边长面积比系数; A 为三角形的面积。

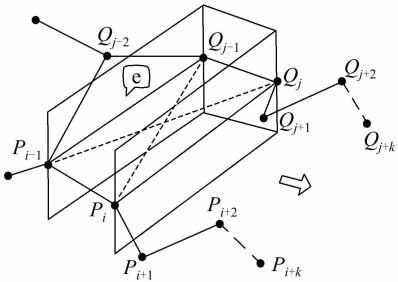


图 2 新顶点选取示意图

Fig. 2 Searching Process of New Vertex

基于局平特性的三角形顶点优选准则如下。

- 1) 候选点 P_i 、 Q_j 位于当前弦边参考基准面 R 的同侧(正向)。

设 θ_i 、 θ_j 分别是 $\triangle Q_{j-1} P_{i-1} P_i$ 和 $\triangle Q_{j-1} P_{i-1} Q_j$ 与当前三角形所夹二面角。如果 $|\theta_i - \theta_j| \leq \epsilon$,检验加权三角化值最大的候选点,取该候选点的 k 个后继节点,如果这 k 个节点均在过 $\triangle Q_{j-1} P_{i-1} Q_j$ 两边 $P_i Q_j$ 和 $Q_j Q_{j-1}$ 的两个参考基准面正向,则加权三角化值最小的候选点优先。 k 个节点中,只要有一个节点在两参考基准面的负向,则加权三角化值最大的候选点优先;反之,如果 $|\theta_i - \theta_j| > \epsilon$, $|\theta - \pi|$ 绝对值小者优先。

- 2) 候选点 P_i 、 Q_j 位于当前弦边参考基准面 R 的异侧。

若 P_i 、 Q_j 两点分别位于参考基准面 R 的异侧,检查 R 负侧的候选点相对于 R 的空间偏移量。候选点到当前边 e 的空间距离 d_1 ,到自身的两后继节点所在直线的距离为 d_2 ,该候选点的后继的后继节点到 e 的距离为 δ , λ 为偏移量系数。

若参考基准面 R 负侧的候选点空间偏移量满足式(4),则参考基准面 R 负侧的候选点优先选取。

$$\begin{cases} d_1 \leq \lambda \delta \\ d_2 \leq \lambda e, \lambda \in (0,1) \end{cases} \quad (4)$$

如果位于 R 负侧的候选点不满足式(4),则位于 R 正向的候选点优先。假设 Q_j 在参考基准面 R 的负向,则 P_i 优先,并将 P_i 的后继节点 P_{i+1} 作为当前候选点。

3) 候选点 P_i 、 Q_j 位于当前弦边参考基准面 R 的同侧(负向)。

比较两候选点的加权三角化值,值小者优先选取。

1.3 新三角面片构造

三角面片的三个顶点按照存储顺序依次为 v_0 、 v_1 、 v_2 ,与法向的关系符合右手定则。为保持法向的一致性,当前边 e 的起点作为新三角形的第二顶点 v_1 ,当前边 e 的终点作为新三角形的第一顶点 v_0 ,符合三角形优选准则的候选节点作为第三顶点 v_2 。根据选取的第三顶点 v_2 和新三角形的对应边,同步更新当前三角形的邻接拓扑关系,然后新构造的三角形即成为当前三角形。如图 3 所示,如果 P_i 入选,首先绑定当前三角形和新三角形 $P_{i-1}Q_{j-1}$ 边的邻接拓扑关系,并在对应的临时边界列表中保存新三角形 $\triangle Q_{j-1}P_{i-1}P_i$ 边 $P_{i-1}P_i$ 的拓扑信息,然后将新三角形 $\triangle Q_{j-1}P_{i-1}P_i$ 作为当前三角形, P_iQ_{j-1} 作为当前边,算法转入下一次递归过程。同理,如果 Q_j 入选,新三角面片的构造及其拓扑关系的更新过程类似。

2 实验结果及分析

取三维地震量测所得的反射波数据,由水平方向的 X 、 Y 和深度方向的 Z 构成。由于同一条轮廓线上的点并非来自一个平面,波峰波谷点 Z 值差异较大并在三维空间中呈锯齿状分布。在微机平台上利用 VC++ 语言实现了本文的多层复杂轮廓线的三维 TIN 算法,其中每层取点 189 个,这样共有 $189 \times 2 \times 2 = 756$ 个小三角形面片。其中参数取值 $\epsilon = \pi/6, k = 3 \sim 5, \lambda = 0.2$ 。图 3(a)为所用剖面线图,图 3(b)、图 3(c)为采用传统算法的重构结果,图 3(d)、图 3(e)为采用本文提出的优选准则的重构结果。通过实验结果对比,本文算法能够合理地匹配连接相邻轮廓线的弦线段,三角网格的形状和尺寸也较好。即使在数据密集的区域,无交互折叠的面片,重建表面的视觉效果也与实际情况吻合。

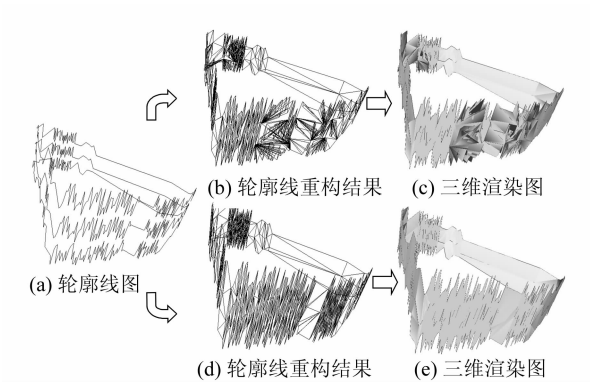


图 3 实验结果

Fig. 3 Experimental Results

3 结 语

本文提出了一种复杂轮廓线的真三维 TIN 表面重构算法,分析了轮廓线的空间分布特征和形状特点,根据当前三角形和后继节点动态生成参照基准面,考虑了局部邻域轮廓线的相对空间关系。重建出来的三维表面过渡更光滑、自然,更接近实际的表面形态。实验结果表明,该方法重建的三维表面细部清楚,能够逼真描述相邻轮廓线之间的表面形态。本算法在石油、地质勘探领域具有现实的应用意义,并可推广到其他学科领域。该方法应用于三维地震量测的多层剖面数据构网,为油气勘探工作者提供了便捷的三维地质构造形态解译手段。下一步将考虑具有分支结构的轮廓线的三维重构算法。

参 考 文 献

[1] Keppel E. Approximating Complex Surface by Triangulation of Contour Lines[J]. IBM Journal of Research and Development, 1975 (19):11-12

[2] Fuchs H, Kedem Z M, Uselton S P. Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours[J]. Communication of the ACM, 1977, 10(20):693-702

[3] Christiansen H N, Sederberg T W. Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygonal Element Mosaics[J]. Computer Graphics, 1978, 3 (12):187-192

[4] Ekoule A B, Peyrin F C, Odet C L. A Triangulation Algorithm from Arbitrary Shaped Multiple Planar Contours[J]. ACM Transactions on Graphics, 1991, 2(10):182-199

[5] Barequet G, Sharir M. Piecewise-linear Interpolation Between Polygonal Slices [C]. 10th Annu. ACM Sympos. Computational Geometry, New

York, 1994

[6] Barequet G, Shapiro D, Tal A. Multilevel Sensitive Reconstruction of Polyhedral Surface from Parallel Slices[J]. The Visual Computer, 2000, 16:116-133

[7] Barequet G, Michael T G, Aya Levi-Steiner, et al. Contour Interpolation by Straight Skeletons [J]. Graphical Models, 2004, 4(66):245-260

[8] 何国金,查红彬. 基于 BPLI 从二维平行轮廓线重建三维表面的新算法[J]. 北京大学学报(自然科学

版),2003, 3(39): 399-411

[9] 邓小英,李英,张宏梅,等. 用序列二维轮廓线重建三维形体表面的方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2003,5(21): 98-100

第一作者简介:朱庆,教授,博士生导师。现在主要从事数字摄影测量、数码城市地理信息系统、虚拟地理环境的研究。

E-mail:zhuq66@263.net;http://VRLab.whu.edu.cn

True Three-dimensional TIN Modelling Algorithm for Complicated Serial Sectional Contours

ZHU Qing¹ LI Fengchun^{1,2} ZHANG Yeting

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Geophysical Prospecting Research and Development Center of BGP CNPC, Jiaxiu Road, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: For the purpose of surface reconstruction from serial sectional contours, the spatial distribution characteristics of complicated serial sectional contours are analyzed, and an efficient algorithm is proposed for true three-dimensional TIN modelling concerning the reference plane. Starting with a seed edge, the new point of triangle is selected based on the local flatness of surface and minimum-weight triangulation. Not only the shape of triangle patch but also the spatial relationship between triangle and neighbor points are considered in the triangulation criterion. This method guarantees to produce non self-intersected surface and the reconstructed surfaces are then close to the actual surface. Experiment is carried out with multi-layer reflected wave data from three-dimensional seismic exploration.

Key words: 3D surface reconstruction; TIN; flatness of surface; reference plane

About the first author: ZHU Qing, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. Interesting research includes digital photogrammetry, cybercity GIS and virtual geographic environments.

E-mail: zhuq66@263.net; http://VRLab.whu.edu.cn

《科技导报》征稿、征订启事

《科技导报》是中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),以“处理来稿周期短,报道成果时效强;探究问题起点高,研讨思路视野宽;提出对策着眼远,争鸣学术气氛浓;刊载信息密度大,排版印刷质量好”为特色,是一本有影响、有特色、有品位的高层次、高水平、高质量科技类学术期刊。《科技导报》是中国科学技术协会学术会刊,设有卷首寄语、专题稿件、研究论文、综述文章、研究报告、学术争鸣、实验技术、科技评论、科学家之声等栏目,主要发表国内外科学和技术各学科专业原创性学术论文,同时刊登阶段性最新科研成果报告,读者对象为国内外一线科技工作者。

《科技导报》2007 年为半月刊,全刊彩色印刷,每册定价 7.00 元,国内邮发代号 2-872,国外发行代号 M3092。欢迎投稿,欢迎订阅。通讯地址:北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社(邮编 100081)。联系电话:010-62103282(编辑部),010-62175871(办公室)。投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。征订信箱:kjdb@cast.org.cn。