

doi:10.3799/dqkx.2016.137

一种基于三角网的地质体三维模型切割方法

万波^{1,2}, 尹芮芮¹, 左泽均^{1,2*}, 王润¹, 吴信才^{1,2}

1. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

2. 国家地理信息系统工程技术研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 三维地质体模型相交元素之间构成的奇异空间关系与复杂的模型要素形态极大影响了切割算法稳健性及切割结果可靠性。提出一种几何运算与关系表达相统一的地质体三维模型切割算法。算法首先构建交点对象拓扑结构, 存储交点与所在三角形单元及空间邻近要素的相对位置关系; 然后结合精确谓词法设计完整的边-三角形相交类型分类图, 记录27种相交情况与交点位置的对应关系, 并在重三角化过程中建立交点调整机制, 利用交点对象拓扑结构中关联的空间关系作为上下文约束, 有效控制投影降维浮点误差带来的交点位置偏差的不良影响。实验结果表明, 算法能够有效处理地质体模型中的三角网退化/近似退化、自相交及共面/近似共面等奇异空间关系, 同时具有良好的运算效率。

关键词: 地质体; 三维GIS; 三维空间分析; 遥感; 切割分析; 可靠性。

中图分类号: P208

文章编号: 1000-2383(2016)11-1966-11

收稿日期: 2016-04-15

3D Geological Model Intersection Algorithm Based on Triangular Mesh

Wan Bo^{1,2}, Yin Ruirui¹, Zuo Zejun^{1,2*}, Wang Run¹, Wu Xincan^{1,2}

1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. National Engineering Research Center of Geographic Information System, Wuhan 430074, China

Abstract: The complexity of 3D geological model and the singular spatial relationship among geological intersection objects greatly influenced the robustness and the reliability of intersection algorithm. An efficient and reliable intersection algorithm of complex geological model is proposed in this paper. Firstly, an intersection point topological structure is built to store the relative position between intersection point and adjacent elements. Then combining the exact predicates method, a complete edge/triangle intersection classification figure is designed which records 27 kinds of intersection cases and corresponding intersection point positions; in the process of re-triangulation, the designed adjustment mechanisms make full use of associated spatial relationship as the constraints, adding an additional level of reliability to the algorithm. The experimental results show that our algorithm efficiently handled the degenerate/self-intersection cases in triangular mesh and the tangency/co-planar/near co-planar triangles special cases in intersection process, and could provide a reference for 3D complex geological model intersection analysis.

Key words: geological model; 3D GIS; 3D space analysis; remote sensing; cutting analysis; reliability.

0 引言

地质体三维模型反映了目标地质体的几何形状及各地质体之间的关联关系, 是开展地质空间分析

与应用研究的基础(Xu and Tian, 2009; 王国灿等, 2015)。对地质体三维模型的切割分析, 能够直观地了解地质体模型内部空间结构及空间展布细节特征, 增强对复杂地质构造与地质信息的理解(明镜

基金项目: 中国地质调查局油气资源调查中心项目(No.2013110069); 国家自然科学基金项目(Nos.41301426, 41301427, 41371422); 国家重点研发计划项目(No.2016YF0502304)。

作者简介: 万波(1975-), 男, 副教授, 主要从事空间数据库、三维地质建模研究。E-mail: magicwan1105@163.com

* **通信作者:** 左泽均, E-mail: zuozejun@mapgis.com

引用格式: 万波, 尹芮芮, 左泽均, 等, 2016. 一种基于三角网的地质体三维模型切割方法. 地球科学, 41(11): 1966-1976.

等,2008),为矿产资源勘测、区域发展规划和地质灾害风险分析等提供辅助决策依据(谭正华等,2012)。

复杂地质体模型切割分析是三维空间分析的难点之一。不同于简单空间实体的切割分析,复杂地质现象的三维体模型中常包含如孔洞、自相交、退化等空间形态(Ragan,2009;Mei and Corporation,2014;郁建军等,2015),切割分析过程涉及大规模地质现象的组合(如断层、褶皱等;据李兆亮等,2015),易产生奇异的空间关系(如平行、共面、相交于某一点或某一边等)(于海燕和何援军,2013)。因此,地质体模型的切割分析需顾及各种复杂的模型要素形态,以避免奇异空间关系的不当处理影响切割结果的正确性(宗真等,2014)。

目前,地质体三维模型以易于可视化分析的不规则三角网模型应用最广(Caumon *et al.*,2009;杨洋等,2014)。基于三角网模型的切割分析通常包括碰撞检测、交点计算、交线追踪、相交三角形剖分重构、分类 5 大过程(Lindenbeck *et al.*,2002;花卫华等,2006)。大部分切割方法都针对这 5 个基本子过程开展研究。Lindenbeck *et al.*(2002)提出切割方法 TRICUT,综合使用多个开源库实现切割过程;Guo *et al.*(2007)采用邻接表的方式,改进了 TRICUT 方法的数据结构;明镜等(2008)对地质体模型采用改进的三角形求交和包含测试分类方法,但在极狭长的三角形等特殊情况下的浮点误差问题未完全解决。为降低算法过程中浮点数精度误差的影响,一些学者(Schifko *et al.*,2010;Feito *et al.*,2013;Barki *et al.*,2015)提出基于精确数值的求交方法,但此类算法时间复杂度较高;另一类为利用网格间拓扑关系的求交方法,给定交线初始交线线段后,基于网格中相邻三角形之间的拓扑邻接关系及交线连续性,快速形成交线链或环.Lo and Wang(2004)首先提出基于 TNOIT(tracing the neighbors of intersecting triangles)的网格求交方法;Elsheikh and Elsheikh(2014)建立追踪方向数据结构,兼顾不同追踪方向,但对输入模型的拓扑结构有较严格的约束,要求必须为流形且不能存在自相交。另外,许多主流的专业软件中也集成了切割分析方法,如 GOCAD(geological object Computer aided design)(Coelho *et al.*,2000)、Autodesk Maya、3ds Max、Open CASCADE 等。Autodesk Maya 和 3ds Max 对于复杂模型的切割表现出易脆性(Attene,2014),Open CASCADE 在自相交情况下切割异常,功能鲁棒性欠缺。

虽然已有众多三维模型切割算法被相继提出,

但多数方法对输入模型的拓扑结构有要求,且对模型中奇异空间关系未进行系统的考虑,导致了面向复杂的三维地质体模型切割时,算法的可靠性与效率不高。针对上述问题,本文首先提出一种交点拓扑对象结构,描述交点所在三角形单元与空间邻近要素的相对位置关系;然后采用精确谓词判定精细化的边-三角形相交关系类型,计算交点坐标,构建复杂交线;并在精细拓扑关系约束下,几何纠正不精确交点坐标,准确地剖分重构三角网,进而实现基于三角网的地质体三维模型切割算法。

1 算法数据结构

准确无误地计算出交点个数、相对位置关系及其坐标是切割算法的关键。但在利用几何坐标进行交点位置关系判断时,由于数值浮点误差可能会导致逻辑上的矛盾(Hoffmann,1989),影响交线的连接以及被切割三角形的重三角化,产生异常切割结果。本文通过定义交点拓扑对象结构 I ,描述交点所在三角形单元与空间邻近要素(点、边、邻接三角形)的相对位置关系,准确确定交点数量、坐标,维护交点与空间邻近要素之间位置关系的一致性。

假设, T 为包含交点 P 的三角形,则数据结构 $I(P, T)$ 表示交点 P 在三角形 T 中的位置关系:

$$I(P, T) = (P, S, N), \quad (1)$$

其中, P 为交点, S 为交点相对位置关系,描述了交点在其所在的三角形单元位置关系(图 1a),包括交点在三角形内部(inTri)、在三角形边上(onEdge)和在三角形顶点上(onVert); N 表示交点相对位置关系 S 对应的几何元素 ID 值。

假设两个相交三角形 T_1 和 T_2 所形成的交点 P 在两个三角形中拓扑信息分别为 $I_1(P, T_1)$ 、 $I_2(P, T_2)$,则交点 P 拓扑对象结构如下:

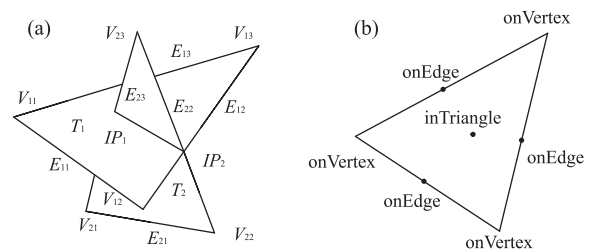


图 1 交点位置关系(a)和三角形对相交示意(b)

Fig.1 Intersection point position (a) and intersection of two triangles (b)

$$I_P = (P, I_1(P, T_1), I_2(P, T_2)) = (P, S_1, N_1, S_2, N_2). \quad (2)$$

例如图 1b 所示, 交点 P_1 在三角形 T_1 中 $I_1(P_1, T_1) = (P_1, \text{inTri}, T_1)$, 在三角形 T_2 中 $I_1(P_1, T_1) = (P_1, \text{onEdge}, E_{23})$, 交点 P_1 的拓扑对象数据结构为:

$$I_{P_1} = (P_1, I_1(P_1, T_1), I_2(P_1, T_2)) = (P_1, \text{inTri}, T_1, \text{onEdge}, E_{23}). \quad (3)$$

2 算法流程与思路

2.1 算法流程

对于任意切割网格实体与被切割网格实体, 算法首先构建 OBB 树进行碰撞检测, 获得相交三角形对集合(Gottschalk *et al.*, 1996); 采用精确谓词判定相交三角形对中边/三角形精细的相交关系, 并基于相交关系记录交点拓扑对象结构, 生成交点拓扑对象数据集和交线段集; 通过连接交线, 投影降维, 判断是否存在由于交点坐标浮点误差带来的特殊情况, 若存在, 则利用交点拓扑对象结构中位置关系信息, 调整交点坐标完成正确的重三角化; 最后以交线段集为分界约束条件, 依据网格中描述的拓扑邻接关系及空间位置关系双重约束分类重组三角网格单元, 生成最终的切割结果. 算法流程如图 2 所示.

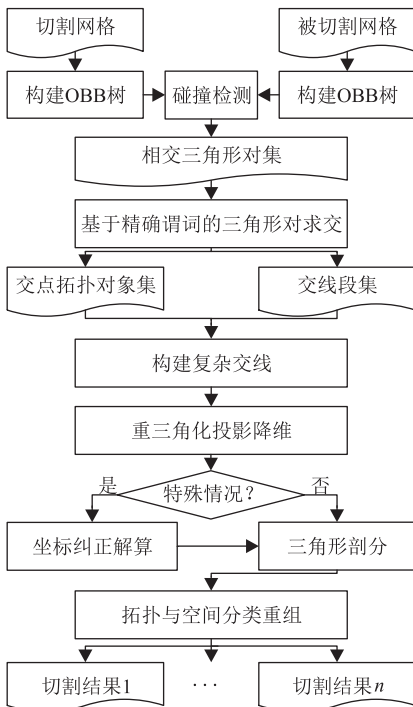


图 2 算法整体流程

Fig.2 Algorithm flow chart

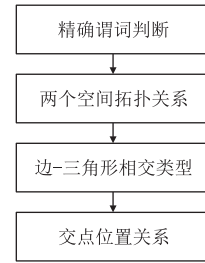


图 3 三角形对求交流程

Fig.3 Flow chart of triangle intersection algorithm

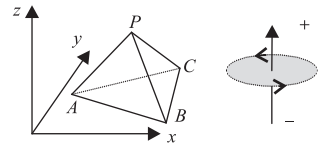


图 4 平面方向示意

Fig.4 The direction of the plane
P 在 ABC 上方

元, 生成最终的切割结果. 算法流程如图 2 所示.

2.2 基于精确谓词的三角形对求交

本文将两三角形间的求交分解为边-三角形求交, 利用精确谓词(Shewchuk, 1996a)得到精细化的边-三角形空间拓扑关系以确定边-三角形相交类型, 并在交点拓扑对象数据结构 I 中记录交点相对位置关系 S (图 3).

(1)精确谓词确定边-三角形相交关系. 对于三维空间中的 4 点 A, B, C, P , 假设点 A, B, C 不共线, 则 3 点决定一个平面(图 4).

定义 $ORIENT3D(A, B, C, P)$ 行列式:

$$ORIENT3D(A, B, C, P) = \begin{vmatrix} A_x & A_y & A_z & 1 \\ B_x & B_y & B_z & 1 \\ C_x & C_y & C_z & 1 \\ P_x & P_y & P_z & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_x - P_x & A_y - P_y & A_z - P_z \\ B_x - P_x & B_y - P_y & B_z - P_z \\ C_x - P_x & C_y - P_y & C_z - P_z \end{vmatrix}. \quad (4)$$

若 ABC 三点为逆时针方向排列, $ORIENT3D(A, B, C, P) > 0$, P 处在 ABC 所决定的平面上方; $ORIENT3D(A, B, C, P) < 0$, P 处在 ABC 所决定平面下方; $ORIENT3D(A, B, C, P) = 0$, 则 P 点在平面 ABC 内.

边 (PQ) 与三角形 (ABC) 对间的求交分解为异面与共面两种情况分别处理:

$ORIENT3D(A, B, C, P) > 0, ORIENT3D(A, B, C, Q) < 0$, 则线段 PQ 与 ABC 异面.

$ORIENT3D(A, B, C, P) > 0, ORIENT3D(A, B, C, Q) = 0$, 则线段 PQ 与 ABC 异面, 顶点 Q

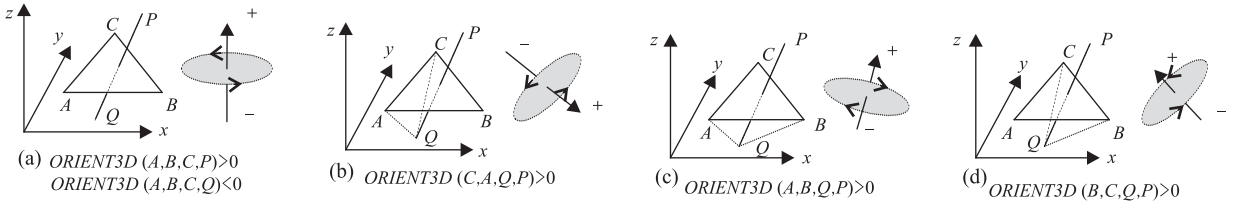


图 5 PQ 三角形 ABC 异面判断方法示意

Fig.5 Judgement method for non-coplanar cases of PQ and plane ABC

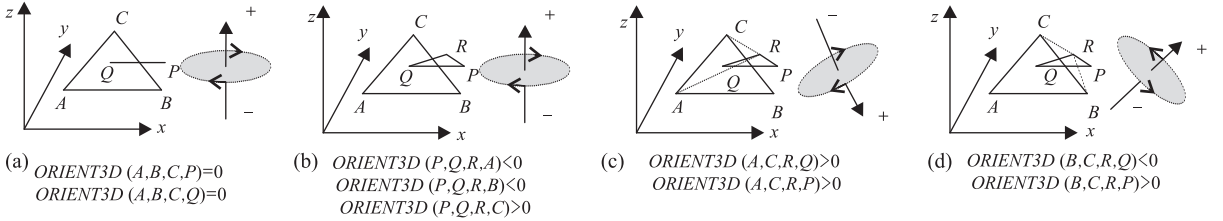


图 6 PQ 与三角形 ABC 共面位置判断方法示意

Fig.6 Judgement method for coplanar cases of line PQ and plane ABC

表 1 边-三角形基本拓扑关系分类

Table 1 Edge-triangle detailed topological relationship

基本关系	边-三角形基本拓扑关系
Touch	TouchVertex(TV)/TouchEdge(TE)/ TouchFace(TF)
Share	ShareVertex(SV)/ ShareEdge(SE)/ ShareFace(SF)
Across	AcrossVertex(AV)/ AcrossEdge(AE)/ AcrossFace(AF)
Disjoint	Disjoint(DJ)

在平面 ABC 中。

$ORIENT3D(A, B, C, P) = 0, ORIENT3D(A, B, C, Q) = 0$, 则线段 PQ 与 ABC 共面。

若边-三角形异面, 再结合 $ORIENT3D(A, B, Q, P), ORIENT3D(B, C, Q, P), ORIENT3D(C, A, Q, P)$ 三者的计算结果确定 PQ 与 ABC 具体相交关系。如图 5 计算得到 PQ 穿过三角形 ABC。

若边-三角形共面, 则需构造在 ABC 上方的辅助点 R 再进行 $ORIENT3D$ 谓词的判断综合判断相交类型。如图 6 得到 Q 点在 ABC 内部, 且 PQ 穿过 BC 边。

(2) 基于精确谓词的边-三角形相交关系分类。空间要素存在接触 (Touch)、共享 (Share)、相交 (Across)、相离 (Disjoint) 4 种基本拓扑关系, 结合三角形的顶点、边与面 3 种要素可将边-三角形的基本拓扑关系分为 10 种 (表 1)。本文通过组合两种拓扑关系得到三维空间中精细化的边-三角形相对位置关系, 并归纳总结每种相交关系中对应的交点位置 (6 种边-三角形异面相交类型如图 6, 21 种边-三角形共面相交类型如图 7; 其中 R1、R2 为基于精

确谓词求得的两拓扑关系)。

本文求交算法能够处理共面与异面所有相交类型。交点信息存储在交点数据结构 I_P 中, 交线段存储在集合 S_i 中。算法的详细步骤如下。

步骤 1: 对于候选集中的每一对相交三角形 T_1, T_2 , 采用精确谓词判断三角形 T_1 的三条边与三角形 T_2 的相交关系; 同样, 对三角形 T_2 三条边与三角形 T_1 求其相交关系。步骤 2: 边-三角形异面时, 若存在交点, 判断是否为重复点。若否, 用交点结构 I_P 记录计算所得的交点。在 6 次相交测试后, 若产生两个交点, 则将交点构成的交线段记录在 S_i 中。步骤 3: 边-三角形共面时, 若存在交点, 判断是否为重复点。若否, 用交点结构 I_P 记录计算所得的交点。每次相交测试后, 若产生两个交点, 则将交点构成的交线段记录在 S_i 中; 步骤 4: 得到交点集 $I_{P_i} (i=0, 1, \dots, m)$, 交线段集 $S_i (i=0, 1, \dots, t)$ 。根据 I_P 计算交点坐标。

2.3 构建复杂交线

不同于单纯交线链或交线环, 复杂交线存在多叉交线段, 即多个交线段 (大于 2 个) 共享一个交点。产生复杂交线的来源包括: 共面相交情况 (图 9a)、非流形模型相交情况 (图 9b)、两曲面网格特殊相交情况 (图 9c)。

图 10b 中 S_1, S_2, S_3 为多叉交线段; 两交线段共享唯一交点的交线段定义为非多叉交线段, 图 10a 中交线段 S_0, S_1, S_2 均为非多叉交线段。前期算法 (Lindenbeck *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2007) 中交

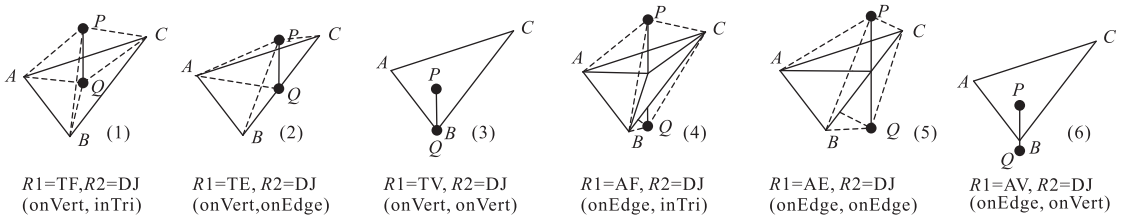


图 7 边-三角形异面相交类型分类

Fig.7 Non-coplanar cases of edge/triangle

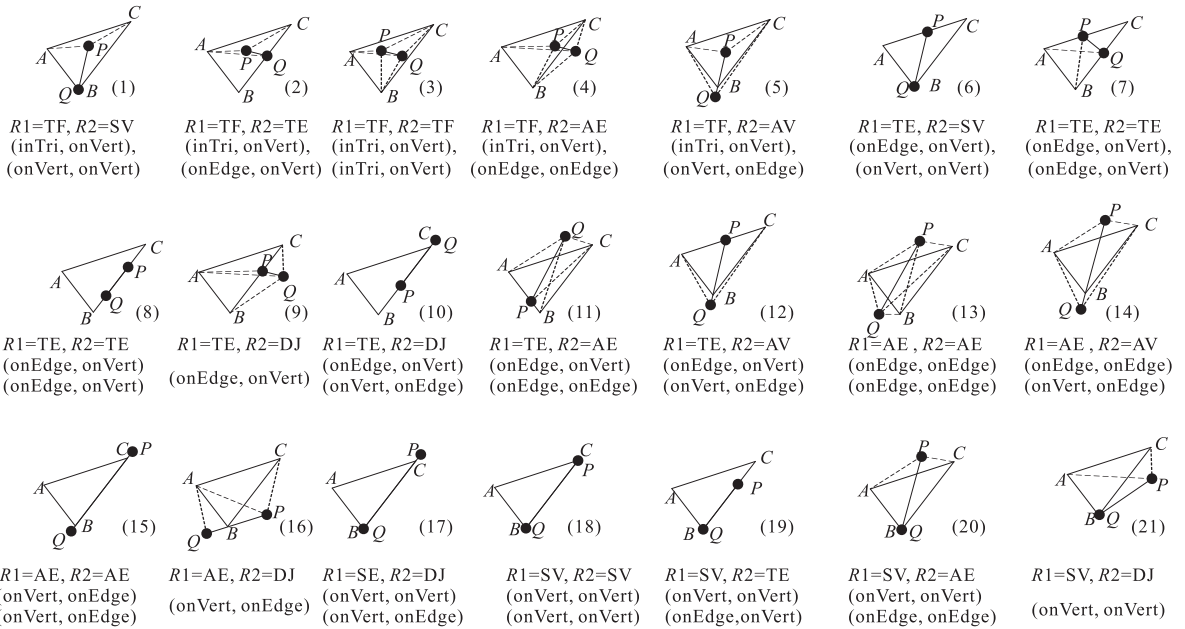


图 8 边-三角形共面相交类型分类

Fig.8 Coplanar cases of edge/triangle

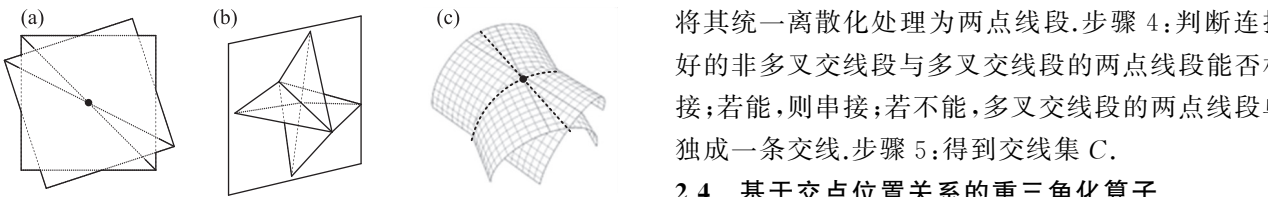


图 9 复杂交线情况示意

Fig.9 Examples of complex intersection lines

a. 共面相交; b. 非流形模型相交; c. 特殊相交

线连接大多建立在非多叉交线段连接的基础上(图 10a).但对于交线形态复杂情况,则可能出现交线连接不完全的情形.本文的交线连接算法可得到完整多条交线.交线构建算法步骤如下.

步骤 1: 输入的交线段集 $S_i (i = 0, 1, \dots, t)$, 集中判断非多叉交线段与多叉交线段, 将两者分离. 步骤 2: 挑选出非多叉交线段, 将非多叉交线段按交线段共享唯一交点进行串接. 步骤 3: 对于多叉交线段,

将其统一离散化处理为两点线段. 步骤 4: 判断连接好的非多叉交线段与多叉交线段的两点线段能否相接; 若能, 则串接; 若不能, 多叉交线段的两点线段单独成一条交线. 步骤 5: 得到交集 C.

2.4 基于交点位置关系的重三角化算子

重三角化算子主要基于投影降维思想, 即将三维空间坐标投影到二维平面, 三角化后再映射回三维空间. 但由于复杂地质体求交过程产生的交点易出现某些特殊情况, 如交点非常靠近或交点与边十分靠近等(图 11a). 在投影到二维平面时, 浮点计算误差或三角格网中本身的奇异关系导致交点位置发生偏移(图 11b), 将二维三角化结果还原回三维空间时, 易出现二维三维空间网格单元间空间关系不一致.

本文在三维坐标投影到二维平面之后, 采用交点调整改进策略. 首先分析是否存在特殊情况, 若存在, 则利用交点的位置关系信息调整交点坐标; 然后

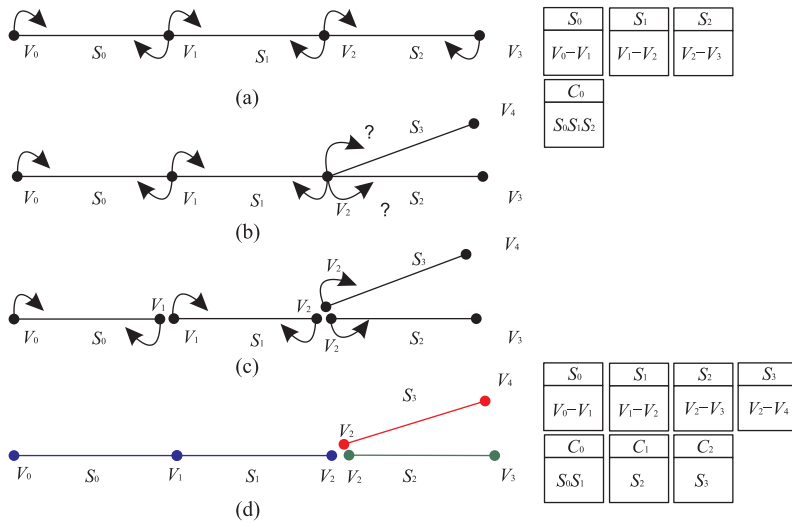


图 10 复杂交线构建示意

Fig.10 Constructing complex intersection lines

a.连接非多叉交线段;b.多叉交线段;c.离散化交线段;d.连接复杂交线

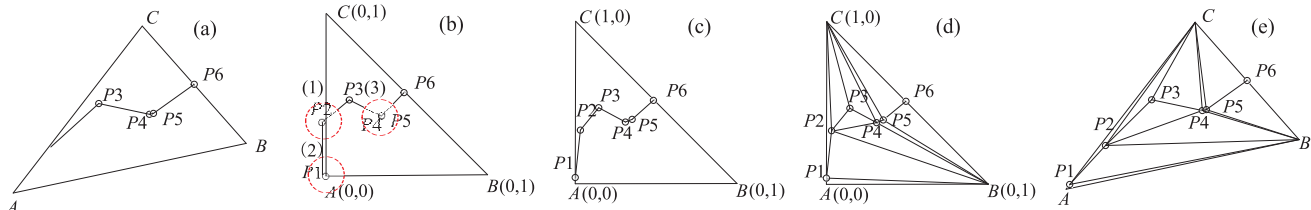


图 11 重三角化基本思想

Fig.11 The principle of re-triangulation

a.特殊情况;b.二维空间特殊情况;c.调整;d.二维重三角化;e.映射回三维空间

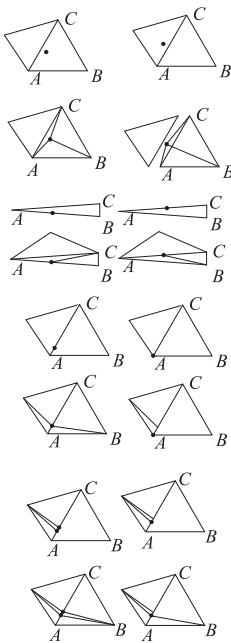


图 12 交点特殊情况分类

Fig.12 The special cases of intersection points

在二维空间中调用 TRIANGLE 库 (Shewchuk, 1996b)重三角化;最后将二维平面内的重三角化结果映射回三维空间(图 11)。

位置关系矛盾可分为两类:一为位置偏差;二为重合(图 12).位置偏差又可分为同类位置关系偏差、异类位置关系偏差.同类位置关系即三角形中交点原始位置与投影后的位置为同类几何元素,具体表现为:本应靠近边界的三角形内交点由于浮点误差出现在三角形之外;本应在边上的交点投影后出现在另一条边上.异类位置关系即三角形中交点原始位置与投影后的位置为不同类几何元素,具体表现为:本应在边上且靠近顶点的交点由于浮点误差与顶点重合或出现在边外部.重合包括边上的交点重合、三角形内交点重合、边界点和三角形内点重合 3 类情况。

为准确完成重三角化,据交点对象拓扑结构所存储的交点相对位置关系信息,笔者对不同类别的特殊情况提出相应的坐标纠正解算方法,确定交点坐标的偏移方向及偏移距离,调整偏移交点坐标。

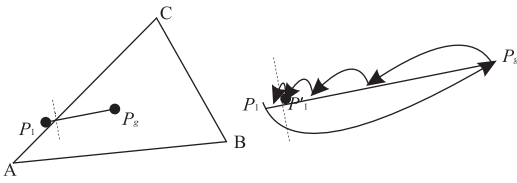


图 13 边界外点偏移示意

Fig.13 Example of point offset

三角形内点由于投影落在三角形外,则向三角形内偏移.确定偏移方向为待调整点的当前位置指向三角形重心方向,以二分法逐步确定偏移距离.具体为边界外的点和三角形的重心构成线段,首先取线段的中点,判定中点是否在三角形内,若在三角形内,则采用迭代操作沿线段向远离重心的方向逐级取分线段的中点,直至某中点出现在了边界外位置,结束迭代操作,取最后一个三角形内的分线段中点作为最终偏移的位置.如图 13 所示,交点坐标 P_1 位于三角形之外,对 P_1 进行调整,确定 P_1 的最终偏移位置为 P_1' .

位置偏差中异类位置关系的交点沿着其关联的边的方向进行不同程度的距离偏移.

对于三维空间中不重合但在二维三角形平面空间中被误判为重合的点,对应的调整偏移方法如下:边界点沿着边的方向,三角形内点在三角形内进行水平或者垂直的细微偏移,通过计算几个点的全排列,从中确定经调整后交线不出现自相交的偏移情况.

重三角化算法步骤如下.

步骤 1:对交集中的交点进行投影得到 P_1' ; 步骤 2:判断 P_1' 是否为三角形外点,若是,采用二分法进行偏移,否则转到步骤 3.步骤 3:判断 P_1' 是否为顶点外点,若是,顶点外点沿着边界调整,否则转步骤 4.步骤 4:判断 P_1' 是否为边错位点,若是,沿点向原始边调整,否则转步骤 5.步骤 5:判断 P_1' 是否为重合点,若是,重合点调整,否则转步骤 6.步骤 6:线段集 S_i 构建约束边界进行二维约束三角化.步骤

7:将重三角化结果映射回三维空间,得到重三角化网格实体 M_{ir} 、 M_{jr} .

3 实验与分析

本文设计可靠性和性能两组实验,验证算法对各奇异情况的处理及算法效率,并与 TRICUT 算法及典型软件 GOCAD、OCCT 的切割功能进行对比分析.实验运行环境为:OS: Windows Server 2008 R2 Enterprise; CPU: Intel Pentium G840 2.80 GHz; MEM: 4 GB.

3.1 可靠性实验

为验证算法对各奇异情况的处理效果,本文选取 3 组典型奇异情况(共面/近似共面、自相交、退化)以及柴达木盆地英西地区实际地质数据进行实验.

(1)共面/近似共面.本组实验采用两个立方体 A、B 进行共面/近似共面网格切割(图 14),立方体 B 绕图 13a 中 Z 轴旋转 0.01° .

立方体 A、B 中平面 f_{A2} 与 f_{B2} 的三角形共面(图 14b),则计算 ORIENT3D 谓词得到两种拓扑关系,根据边/三角形共面相交类型表确定具体的相交类型,将其对应的交点位置关系记录在交点拓扑对象数据结构中,基于求得的交点拓扑对象数据结构进行下一步的交点坐标计算及重三角化.

近似共面情况下,如图 14b 中 f_{A1} 与 f_{B1} 的三角形,即几何元素处于接近重合而又不完全重合的状态,容易因为浮点数误差引起交点空间坐标偏移,进而导致重三角化时网格拓扑不一致.本文在重三角化子过程中,以交点精确的位置关系为判断依据,若交点空间坐标存在偏移,则基于精确的交点相对位置关系调整偏移策略修正交点坐标,以保证交线两侧三角网拓扑一致.实验得到立方体 A 切割立方体 B 结果(图 14c, 14d).

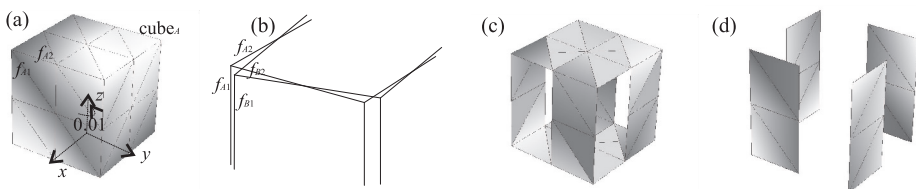


图 14 共面/近似共面网格切割示意

Fig.14 Intersection test of coplanar/near coplanar

立方体旋转 0.01 度; a.输入模型; b.输入模型相交关系; c.切割结果 1; d.切割结果 2

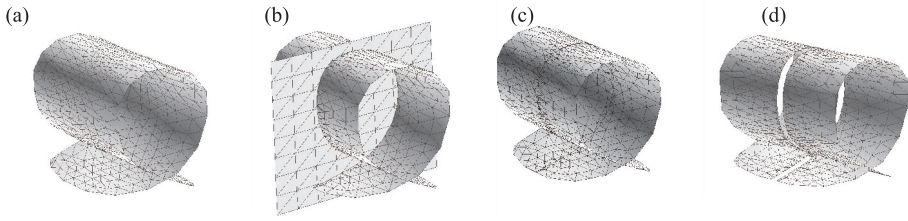


图 15 自相交情况切割示意

Fig.15 Intersection test of self-intersection models
a.自相交输入模型;b.输入模型;c.重三角化结果;d.切割结果

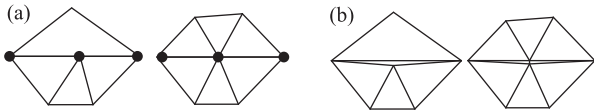


图 16 完全退化三角形(a)和近似退化三角形(b)

Fig.16 Complete degenerate triangles (a) and near-degenerate triangles (b)

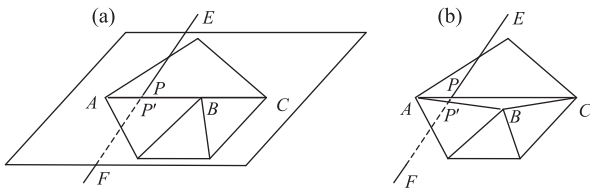


图 17 网格中退化三角形切割示意

Fig.17 Intersection test of degenerate triangle
a.完全退化三角形;b.近似退化三角形

(2)自相交.自相交为三维地质模型中常见的拓扑异常情况(图 15a).针对这一情况,本文在三角形对求交过程中通过精确谓词的判断计算保证交点集、交线段集的完整,在分类重组过程中依据网格间

拓扑邻接关系,以交线段集以及网格空间位置关系双重分界约束得到最终正确的切割结果(图 15c, 15d).

(3)退化.退化三角形包括:完全退化三角形和近似退化三角形(图 16),完全退化三角形包括内角为 180° 的帽形退化三角形和最短边长为 0 的针形退化三角形.

对于完全退化三角形,本文算法将其当作正常三角形,如图 17a 中切割面中边 EF 与被切割面中三角形 ABC 相交,产生两个交点 P, P' . P 与 P' 的拓扑结构对象不同,算法认为是不同的两个点,即:

$$I_P == (P, \text{onEdge}, N_{\text{Edge}AC}, \text{onEdge}, N_{\text{Edge}EF}),$$

$$I_{P'} == (P', \text{onEdge}, N_{\text{Edge}AB}, \text{onEdge}, N_{\text{Edge}EF}),$$

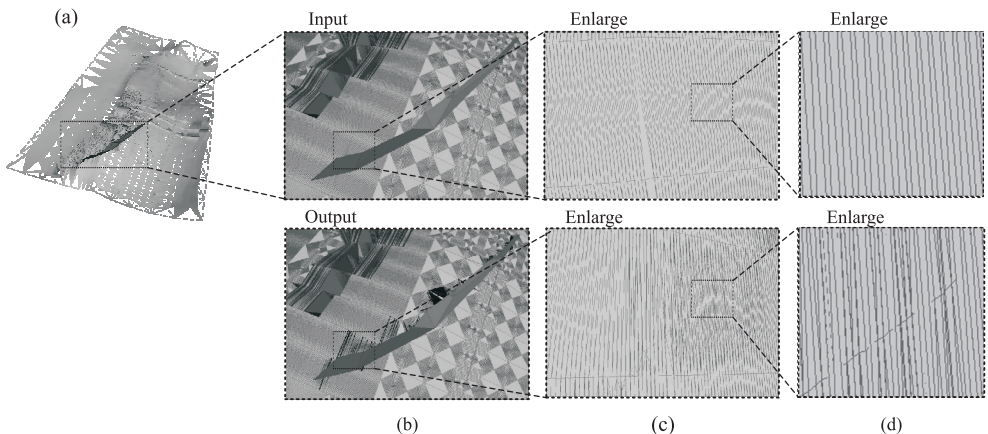


图 18 近似退化三角形切割示意

Fig.18 Intersection result of near-degenerate triangles
a.原始相交输入模型;b,c,d.切割放大结果

表 2 网格特殊情况处理对比分析
Table 2 Special cases comparison with prior arts

特殊情况	算法			
	本文算法	OCCT	GOCAD	TRICUT
共面	是	是	是	否
近似共面	是	是	是	否
自相交	是	否	否	否
退化	是	是	是	否

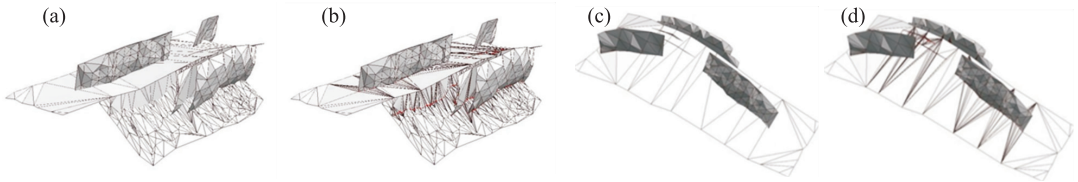


图 19 柴达木盆地英西区断层面间求交切割结果示意

Fig.19 Triangular mesh intersection of geological model of Yingxi area in Qaidam basin

a.断层模型;b.模型求交结果;c.断层模型;d.模型求交结果

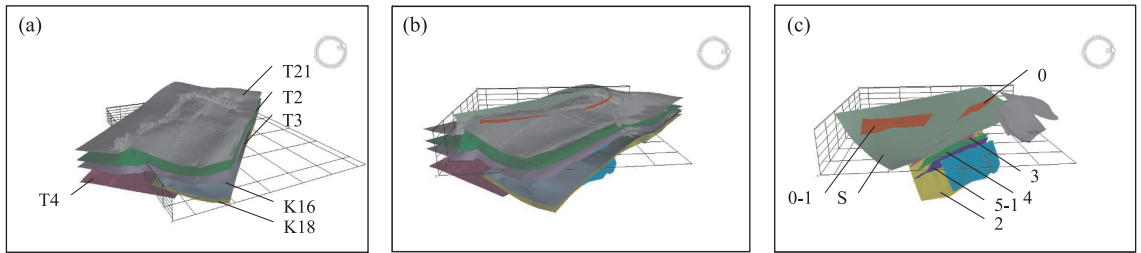


图 20 柴达木盆地英西区地质模型

Fig.20 Geological model of Yingxi area in the Qaidam basin

a.地质体模型地层面(T21 代表晚第三系—上新统中期地层(N22);T2 代表晚第三系—上新统早期地层(N21);T3 代表晚第三系—中新统地层(N1);T4 代表早第三系—渐新统晚期地层(E32);K16 代表白垩系地层(K16);K18 代表白垩系地层(K18));b.地质体模型相交情况;c.模型中断层面(0,0-1,S,3,4,5-1,和 2 均为断层面名称)

表 3 地质模型数据

Table 3 Detailed information of geological model

数据编号	数据名称		三角形数(个)		相交情况(个)		运算时间(ms)		
	被切割面	切割面	被切割面	切割面	三角形对	交点	本文	GOCAD	OCCT
1	0	S	158	30	40	41	12	32	10 187
2	2	4	604	21	75	76	29	540	26 348
3	T4	2	22 830	604	189	190	585	2 900	48 141
4	K18	4	62 061	23	488	496	2 097	4 600	66 300
5	T2	0	86 887	158	506	508	2 786	3 500	69 420
6	T2	0-1	86 887	32	993	1 019	4 308	9 400	165 641

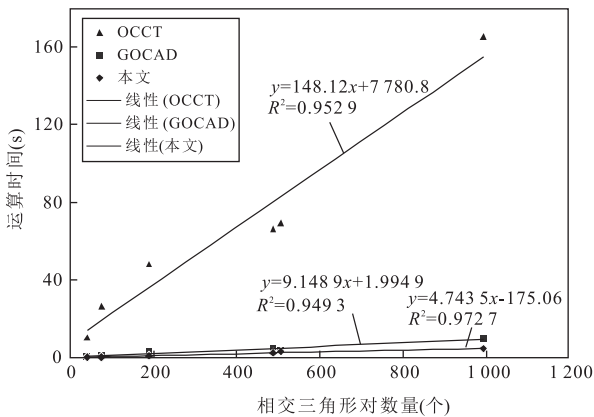


图 21 切割算法运算时间增长趋势对比

Fig.21 Growth trend comparisons of intersection algorithms

18),由于交点坐标精度限制,可能导致切割时的交点位置偏差.本文在重三角化算法中,通过交点拓扑对象结构中蕴含的交点位置关系及调整偏移策略,对交点偏差进行修正,进而准确重三角化.

本文将上述奇异情况分别在软件 OCCT、软件 GOCAD 与经典切割算法 TRICUT 中进行实验.结果表明(表 2),本文算法能够有效处理曲面网格中的退化、自相交、共面/近似共面 4 种奇异情况;OCCT 与 GOCAD 在存在自相交网格情况下会失败,能够处理退化、共面/近似共面 3 种情况;而 TRICUT 在 4 种奇异情况下均无法正常运行.

为验证算法在实际地质数据下的切割效果,本文还选用柴达木盆地英西地区数据进行实验.研究区域多期剧烈构造运动使得断层在空间上存在交叉、错切等复杂接触关系.实验结果表明,本文算法

但两交点坐标相同,数值计算上不影响切割算法.

对于无限接近零面积的近似退化三角形(图

能够准确处理实际地质体曲面网格中普遍存在的狭长三角形、自相交、共面/近似共面情况(图 19)。

3.2 性能实验

实验分别采用 GOCAD、OCCT 和本文算法对柴达木盆地西南缘英西地区地质模型进行切割分析(图 20),统计程序运行时间(表 3)。从 6 组实验结果可以看出,随着数据量的增加,程序运行时间均有明显增长;但 3 组运行时间中,本文算法时间最短。程序的运行时间与相交三角形对数量呈线性相关关系(图 21)。随着相交三角形对数量的增加,OCCT 时间增长速率明显较高(趋势线斜率为 148.12;图 21),本文算法与 GOCAD 软件的切割时间增长均比较平缓,且本文算法增长速率更低(趋势线斜率为 4.743 5)。这是因为 OCCT 软件中几何模型的分解,组合的对象化的操作造成了软件效率较低。本文使用交点拓扑对象数据结构提高了算法中拓扑搜索效率。

4 结语

通过对复杂地质体模型自身奇异类型以及切割分析过程中产生的各种奇异空间关系的分析,本文提出的三角网三维模型切割方法:(1)设计了完整的相交关系图,利用精确谓词得到精细边—三角形相交关系;(2)采用交点拓扑对象数据结构,减少求交过程中的交点坐标冗余计算,维护切割面与被切割面交点属性一致;(3)考虑了地质模型中交线形态的复杂多样性,有效连接复杂多分支交线;(4)提出在关系约束下重三角化相应调整偏移策略,有效控制了奇异情况下交点坐标不精确的不利影响,提高了算法的可靠性。实验结果表明,算法对输入模型的拓扑结构没有严格限制,能有效处理三维地质模型中的退化/近似退化、自相交等异常情况,及模型切割中产生的奇异空间关系(如共面/近似共面);并在基于柴达木盆地英西区三维模型数据的实验中表现出良好的运算效率。

后续研究工作包括:(1)基于切割算法流程的一致性可分割性,构建基于 CPU/GPU 加速的并行化分析算法,以支撑大规模复杂场景及海量数据分析;(2)从地质体模型蕴含的语义上下文中挖掘地质语义规则用于约束切割分析处理,以支持更复杂、更可信的地质体模型切割方法。

References

Attene, M., 2014. Direct Repair of Self-Intersecting Meshes.

Graphical Models, 76(6): 658—668. doi: 10.1016/j.gmod.2014.09.002

Barki, H., Guennebaud, G., Fofou, S., 2015. Exact, Robust, and Efficient Regularized Booleans on General 3D Meshes. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(6): 1235—1254. doi: 10.1016/j.camwa.2015.06.016

Coelho, L.C.G., Gattass, M., Figueiredo, L. H. D., 2000. Intersecting and Trimming Parametric Meshes on Finite Element Shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47(4): 777—800. doi: 10.1002/(sici)1097-0207(20000210)47:4<777::aid-nme797>3.0.CO;2-6

Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., de Veslud, C. L., et al., 2009. Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences*, 41(8): 927—945. doi: 10.1007/s11004-009-9244-2

Elsheikh, A. H., Elsheikh, M., 2014. A Reliable Triangular Mesh Intersection Algorithm and Its Application in Geological Modelling. *Engineering with Computers*, 30(1): 143—157. doi: 10.1007/s00366-012-0297-3

Feito, F.R., Ogayar, C.J., Segura, R.J., et al., 2013. Fast and Accurate Evaluation of Regularized Boolean Operations on Triangulated Solids. *Computer-Aided Design*, 45(3): 705—716. doi: 10.1016/j.cad.2012.11.004

Gottschalk, S., Lin, M. C., Manocha, D., 1996. OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection. *Proceedings of ACM Siggraph*, New York, 171—180. doi: 10.1145/237170.237244

Guo, K.B., Zhang, L.C., Wang, C.J., et al., 2007. Boolean Operations of STL Models Based on Loop Detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5—6): 627—633. doi: 10.1007/s00170-006-0487-5

Hoffmann, C.M., 1989. The Problems of Accuracy and Robustness in Geometric Computation. *Computer*, 22(3): 31—39. doi: 10.1109/2.16223

Hua, W. H., Deng, W. P., Liu, X. G., et al., 2006. Improved Partition Algorithm between Triangulated Irregular Network. *Earth Science*, 31(5): 619—623 (in Chinese with English abstract).

Lindenbeck, C.H., Ebert, H.D., Ulmer, H., et al., 2002. TRICUT: A Program to Clip Triangle Meshes Using the Rapid and Triangle Libraries and the Visualization Toolkit. *Computers & Geosciences*, 28(7): 841—850. doi: 10.1016/s0098-3004(01)00110-8

Lo, S.H., Wang, W.X., 2004. A Fast Robust Algorithm for the Intersection of Triangulated Surfaces. *Engineering with Computers*, 20(1): 11—21. doi: 10.1007/s00366-

004—0277—3

- Li, Z. L., Pan, M., Yang, Y., et al., 2015. Research and Application of the Three-Dimensional Complex Fault Network Modeling. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- Ming, J., Pan, M., Qu, H. G., et al., 2008. Zigzag Section Cut Algorithm Based on 3D Geological Objects Represented by Triangulated Irregular Network Data. *Geography and Geo-information Science*, 24(3): 37—40 (in Chinese with English abstract).
- Mei, G., Corporation, H. P., 2014. Summary on Several Key Techniques in 3D Geological Modeling. *The Scientific World Journal*, 2014: 1—11. doi:10.1155/2014/723832
- Ragan, D. M., 2009. Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques. Cambridge University Press, Cambridge, 1—10.
- Shewchuk, J. R., 1996a. Robust Adaptive Floating-Point Geometric Predicates. Proceedings of the Twelfth Annual Symposium on Computational Geometry, New York, 141—150. doi:10.1145/237218.237337
- Shewchuk, J. R., 1996b. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, London, 203—222. doi:10.1007/bfb0014497
- Schifko, M., Jüttler, B., Kornberger, B., 2010. Industrial Application of Exact Boolean Operations for Meshes. Proceedings of the 26th Spring Conference on Computer Graphics, Slovakia, 165—172. doi: 10.1145/1925059.1925089
- Tan, Z. H., Wang, L. G., Xiong, S. M., et al., 2012. A New Method for Automatic Generation of Complex Geological Mining Engineer Profile Chart. *Journal of Central South University*, 43(3): 1092—1097 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Xu, Y. X., Chen, X. J., et al., 2015. Three-Dimensional Geological Mapping and Visualization of Complex Orogenic Belts. *Earth Science*, 40(3): 397—406 (in Chinese with English abstract).
- Xu, N. X., Tian, H., 2009. Wire Frame: A Reliable Approach to Build Sealed Engineering Geological Models. *Computers & Geosciences*, 35(8): 1582—1591. doi: 10.1016/j.cageo.2009.01.002
- Yu, H. Y., He, Y. J., 2013. Testing the Intersection Status of Two Triangles. *Journal of Graphics*, 34(4): 54—62 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Wang, G. C., Xu, Y. X., et al., 2015. Constraining Deep Geological Structures in Three-Dimensional Geological Mapping of Complicated Orogenic Belts: A Case Study from Karamay Region, Western Junggar. *Earth Science*, 40(3): 407—418, 424 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Li, Z. L., Pan, M., 2014. Clipping Algorithm for Triangulated Irregular Network Based on Topology. *Geography and Geo-Information Science*, 30(3): 21—24 (in Chinese with English abstract).
- Zong, Z., Yuan, L. W., Luo, W., et al., 2014. Triangulation Intersection Algorithm Based on Conformal Geometric Algebra. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 43(2): 200—207 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 花卫华, 邓伟萍, 刘修国, 等, 2006. 一种改进的不规则三角网格曲面切割算法. *地球科学*, 31(5): 619—623.
- 李兆亮, 潘懋, 杨洋, 等, 2015. 三维复杂断层网建模方法及应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 51(1): 79—85.
- 明镜, 潘懋, 屈红刚, 等, 2008. 基于 TIN 数据三维地质体的折剖面切割算法. *地理与地理信息科学*, 24(3): 37—40.
- 谭正华, 王李管, 熊书敏, 等, 2012. 一种新的复杂地质体采矿工程剖面图自动生成方法. *中南大学学报(自然科学版)*, 43(3): 1092—1097.
- 王国灿, 徐义贤, 陈旭军, 等, 2015. 基于地表地质调查剖面网络基础上的复杂造山带三维地质调查与建模方法. *地球科学*, 40(3): 397—406.
- 于海燕, 何援军, 2013. 空间两三角形的相交问题. *图学学报*, 34(4): 54—62.
- 郁军建, 王国灿, 徐义贤, 等, 2015. 复杂造山带地区三维地质填图中深部地质结构的约束方法: 西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质填图实践. *地球科学*, 40(3): 407—418, 424.
- 杨洋, 李兆亮, 潘懋, 2014. 基于拓扑追踪的不规则三角网裁剪算法. *地理与地理信息科学*, 30(3): 21—24.
- 宗真, 袁林旺, 罗文, 等, 2014. 三角网求交的共形几何代数算法. *测绘学报*, 43(2): 200—207.