

正颌截骨术中的凸柱体网格切割算法研究

翟培芳¹,张艳宁¹,施建宇¹,周洪²

ZHAI Pei-fang¹,ZHANG Yan-ning¹,SHI Jian-yu¹,ZHOU Hong²

1.西北工业大学 计算机学院,西安 710129

2.西安交通大学 口腔医院,西安 710003

1.School of Computer Science,Northwestern Polytechnical University,Xi'an 710129,China

2.Stomatology Hospital,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710003,China

E-mail:zoezhai@vip.qq.com

ZHAI Pei-fang,ZHANG Yan-ning,SHI Jian-yu,et al.Convex prism mesh cutting algorithm for virtual craniofacial osteotomy.Computer Engineering and Applications,2009,45(18):171-173.

Abstract: Computer-aided technique plays an important role in prediction and analysis of orthognathic surgery.However,the available methods cannot meet the diverse demand of virtual osteotomies.This paper presents a prism mesh cutting algorithm inspired by planar clipping.It regards the cutting track of virtual surgical knife as the cutting intersection of a polygon prism and a triangular mesh model.The results show that the proposed algorithms can handle effectively variant complex virtual osteotomies and provide further assistance with a preoperative guidance.

Key words: orthognathic surgery;craniofacial osteotomy;mesh cutting;prism

摘 要:计算机辅助虚拟手术技术对正颌外科手术方案的制定、手术效果的预测分析发挥着重要作用。然而,现有的计算机辅助正颌截骨术只能实现少量简单的截骨操作,不能满足虚拟截骨术多样性的需要。在平面切割地基础上,提出了一种基于凸柱体网格切割算法。该算法用凸柱体模拟虚拟手术刀对三维网格模型进行切割,根据截骨术的切口类型构造柱体,用此柱体进行切割实现骨块的分离。实验结果表明,该算法能有效地实现多种复杂虚拟截骨术,为手术方案的制订提供了辅助指导作用。

关键词:正颌手术;截骨术;网格切割;柱体

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2009.18.051 **文章编号:**1002-8331(2009)18-0171-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391.9

1 引言

在正颌外科手术中,传统的手术计划方法是由经验丰富的外科医生基于头影测量分析或者计算机颅面轮廓图二维平面上进行手术模拟与预测^[1],但这些方法不能全面反映颅面三维结构变化情况,且颅面结构并非左右完全对称,限制了手术方案的精确制定和手术后治疗效果的预测。计算机辅助三维虚拟手术计划成为一个重要的研究领域,为手术方案的制定以及手术效果的分析提供了一个辅助工具。

虚拟截骨术就是利用网格切割的技术进行骨块分离。目前提出了大量网格切割算法^[2-4]。平面切割算法^[2-3]通过选择三点构造一个平面对网格进行切割,是最简单、快速的切割算法,但由于平面本身具有的无限延伸性,只能模拟几种简单的截骨术如颏成形术等。立体剪裁方法^[4]是多平面切割算法的扩展,它能够模拟更多的手术类型,但它很难实现对于如前根尖下截骨术、下颌支矢状等切口为不规则多边形的截骨术。

为了满足正颌手术多样性的需要,提出一种基于凸柱体的网格切割算法,它根据不同的正颌手术截骨术,构造不同柱体将待切割模型包围起来,用柱体的面对 3D 颅骨网格模型进行切割,实现不同类型的正颌截骨术。

2 平面切割算法

设切割平面 π 方程为:

$$ax+by+cz+d=0 \quad (1)$$

则 π 的法向量为 $n(a,b,c)$, π 将三维空间分为两个半空间 S_a 和 S_b , 其中 S_a 处于 π 的正法向量方向, S_b 在负法向量方向,如图 1 所示。对空间任一点 $P(x_p,y_p,z_p)$, 则点 P 所处的空间位置关系为:

$$D(P)=\text{sign}(ax_p+by_p+cz_p+d)=\begin{cases} 1 & P \in S_a \\ 0 & \text{on the plane } \pi \\ -1 & P \in S_b \end{cases} \quad (2)$$

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60472072);陕西省科技计划项目(the Science and Technology Planning Project of Shaanxi Province of China under Grant No.2004K05-G23);中国博士后科学基金(China Postdoctoral Science Foundation under Grant No.20070421130)。

作者简介:翟培芳(1985-),女,硕士,主要研究领域为医学图像处理;张艳宁(1967-),女,教授,主要研究领域为计算机视觉与数字图像语音处理;施建宇(1979-),男,博士后,主要研究领域为数字图像处理;周洪,男,教授,主要研究口腔正畸学。

收稿日期:2008-10-06 **修回日期:**2008-12-18

对处于不同半空间的两个点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 和 $N(x_n, y_n, z_n)$, 点 M, N 所在直线段为 l , 则 l 的参数方程为:

$$l(t) = \begin{cases} l_x = x_m + (x_n - x_m)t \\ l_y = y_m + (y_n - y_m)t \\ l_z = z_m + (z_n - z_m)t \end{cases}, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

直线段 l 与平面 π 相交, 交点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 在点 M, N 之间, 其值可由公式(1)和(3)解得。

对网格模型的任意三角面片 T, T 与平面 π 之间可能的空间位置关系如图 1 所示, 用水平直线代表平面 π , 与其垂直的箭头方向表示其法向量 n 的方向, 空心点表示 T 与 π 的交点。

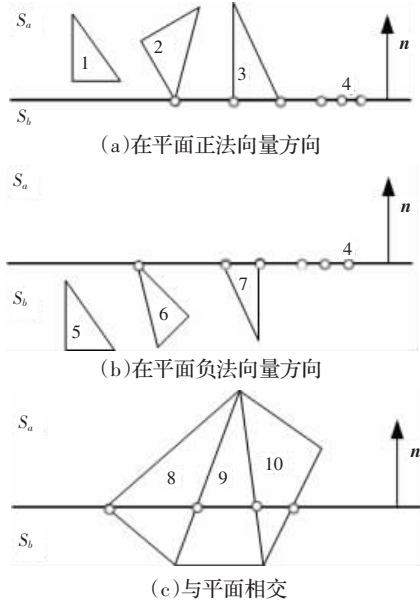


图 1 切割平面 π 与三角面片的位置关系

T 的空间位置关系可归纳为 3 种情况: 在半空间 S_a 中; 在半空间 S_b 中; 部分在 S_a 中, 另一部分在 S_b 中。 T 的空间位置关系由其三个顶点的空间位置关系 $D(P_i), i=1, 2, 3$ 判定:

$$I(T) = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \{D(P_i) \geq 0, P_i \in T\} = 3 & T \subset S_a \\ \sum_{i=1}^3 \{D(P_i) \leq 0, P_i \in T\} = 3 & T \subset S_b \\ \text{otherwise} & T \text{ intersects } \pi \end{cases} \quad (4)$$

若 T 的三个顶点全在半空间 S_a 或 S_b 中时, 则 T 在 S_a 或 S_b 中, 如图 1(a) 和图 1(b) 所示; 否则, T 与平面 π 相交, 如图 1(c) 所示。

对于图 1(c) 所示的三角面片 T 的切割, 利用交点, 采用三角剖分的技术进行划分。为了建立三角网格模型, 对多边形采用三角化^[5-7]的方法将其划分为两个三角面片。

3 凸柱体切割算法

3.1 凸柱体切割思路

现有的正颌手术类型多样, 如图 2 所示为一些常用的正颌手术^[8]。从计算机图形学的角度进行分析, 这些被分割骨块皆可用一个凸柱体包围, 从原始模型中分离出来。柱体网格切割算法的基本思路是: 根据截骨术切口类型, 构造一个对应的柱体, 将待分离骨块完整包围起来, 且不包含冗余信息, 用此柱体对 3D 颅骨网格模型进行切割, 实现对应正颌截骨术。

3.2 三角面片与凸棱柱位置关系

凸柱体切割是对平面切割算法的扩展, 将一个切割平面扩

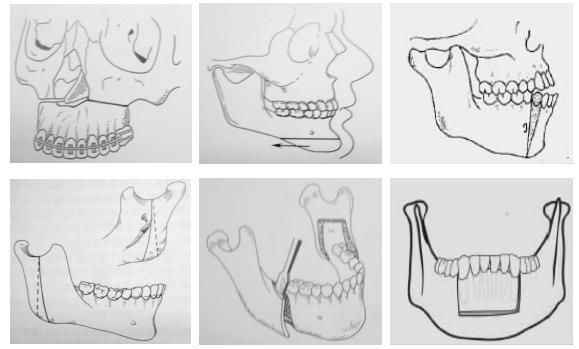


图 2 几种正颌截骨术示意图

展为切割柱体, 利用柱体的底面和侧面对三维网格模型进行切割。根据截骨术的切口类型, 构造一个 n 凸柱体 S, S 的所有面方程为:

$$S: a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0, \quad i=1, \dots, n+2 \quad (5)$$

规定 S 所有面的法向量 $n_i(a_i, b_i, c_i)$ 都指向棱柱外, 如图 3 所示, 以五棱柱 S 为例, 图中箭头的方向分别为 S 各个侧面的法向量方向, S 上下底面的法向量方向相反, 都指向柱体外。

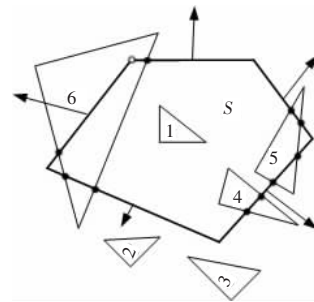


图 3 凸多棱柱 S 与三角面片的位置关系

对于网格模型上的三角面片 T, T 与 S 的位置关系如图 3 所示, 可归纳为 3 种情况: 在 S 内, 在 S 外以及与 S 相交。则 T 与 S 的位置关系可由其三个顶点 $D(P_i), i=1, 2, 3$ 与 S 各个面的位置关系判断:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n+2} \left\{ \text{BOOL} \left[\sum_{i=1}^3 \{D_j(P_i) \geq 0\} = 3 \right] \right\} \geq 1 & T \notin S \\ \sum_{j=1}^{n+2} \left\{ \text{BOOL} \left[\sum_{i=1}^3 \{D_j(P_i) \leq 0\} = 3 \right] \right\} = 3(n+2) & T \subset S \\ \text{otherwise} & T \text{ intersects } S \end{cases} \quad (6)$$

若三角面片 T 的三个顶点全在 S 的 $n+2$ 个面的负法向量方向时, T 在 S 内; 若 T 至少在 S 的一个面的正法向量方向时, T 在 S 外; 否则, 即若 T 至少与 S 的一个面相交, 且在其余不相交面的负法向量方向时, T 与 S 相交。

如图 3 所示, 三角面片 T 与凸柱体 S 的三种位置关系。不规则的五边形代表五棱柱 S , 箭头的方向代表 S 各个侧面的法向量方向, 三角形代表与 S 不同位置关系的三角面片 T 。 T_1 的三个顶点皆在 S 面的负法线方向, 则 T_1 在 S 内; T_2, T_3 三个顶点在 S 中一个面的正法向量方向, 则 T_2, T_3 在 S 外; T_4 与 S 的一个面相交, T_5 与 S 的两个面相交, T_6 与 S 的三个面都相交, 且在其他不相交面的负法向量方向, T_4, T_5, T_6 与 S 相交。

3.3 凸柱体切割流程

根据三角面片 T 与 S 的位置关系, 对 T 的切割可分为两种情况: 一种是 T 与 S 的至多一个面相交, 对 T 的柱体切割退化为平面切割; 另一种是 T 与 S 的 $m(m \geq 2)$ 个面都相交, 柱体切割算法主要处理第二种情况。

凸柱体切割的关键就是计算三角面片 T 与 S 的相交面的交点。如图 3 所示, T 与 S 的交点共有两类:一类是 T 的边与 S 的面的交点,以黑点表示,可由 T 的边与 S 的侧面求交点得到;另一类是 T 与 S 的棱的交点,以空心原点表示,这类交点为 S 的一个棱与多边形 T 所在平面的交点。

对于一个多边形 M 具有 n 个顶点 $\{V_i(x_i, y_i, z_i) | i=1, 2, \dots, n\}$, 其所在平面上的一点 $P_u(x_u, y_u, z_u)$, 则可根据该点与 M 各个顶点的夹角和来判断是否在 M 内:

$$\sum_{i=1}^n \theta_i(V_i P_u V_{i+1}) = \begin{cases} 360^\circ & \text{inside} \\ 0^\circ & \text{outside} \end{cases}, (i=n, V_{n+1}=V_1) \quad (7)$$

P_u 与 M 的任意两个顶点的夹角为:

$$\theta_i(V_i P_u V_{i+1}) = \arccos \left(\frac{(V_i - P_u) \cdot (V_{i+1} - P_u)}{|(V_i - P_u)| |(V_{i+1} - P_u)|} \right), i=n, V_{n+1}=V_1 \quad (8)$$

当 P_u 与 M 所有顶点的夹角和为 360° 时, P_u 在 M 内, 为 0° 时, P_u 在 M 外。再根据公式(1)和(3)即可得到这类交点。

设与 T 相交的 S 的面为 $\{S_\pi | \pi_i \subset S, \text{num}(\pi_i) = m, m \geq 2, 0 \leq i \leq (n+2)\}$, 通过顺序求取 T 与 π_i 的交点将 T 切割为处于 S 内外两部分, 再采用 Delaunay 三角剖分算法^[9]对切割结果进行三角剖分。算法步骤如下:

- (1) $l_i \rightarrow \text{ListIn}$, $\{l_i | V_i V_{i+1}, i=1, 2, 3, V_4=V_1\}$;
- (2) for π_i in S_π , ListIn 的边插入到 List 中, 清空 ListIn ;
- (3) while 没有到 List 的表尾, 从 List 中顺序取一个边 l_i ;
- (4) 若 l_i 与 π_i 相交, 计算交点 P_i , 将 P_i 以及 l_i 中处于 π_i 负方向的顶点 V_{in} 构成新的边 l_{in} 插入链表 ListIn 中, 同时将 P_i 和 l_i 的另一顶点 V_{out} 构成新的边 l_{out} 插入链表 ListOut 中;
- (5) 将新生成的顶点 P_u 构成新的边分别插入到 ListIn 和 ListOut 中;

(6) 对链表 ListIn 和 ListOut 中所有边构成的多边形进行 Delaunay 三角剖分。

其中, List 为存放待切割多边形边的链表, ListIn 为存放处于 π_i 负法向量方向多边形边的链表, ListOut 为存放处于 π_i 正法向量方向多边形边的链表。

如图 4 所示, 以与凸棱柱的三个面都相交的三角面片 T_6 的切割过程。

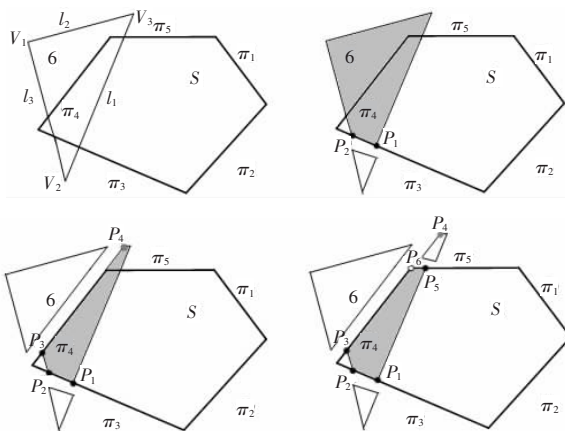


图 4 与 S 三个面相交的 T 的切割过程

由于三维颅骨模型是由三角面片表示的, 要表达切割后的模型, 必须对切割后的部分进行三角剖分, 即对上述切割后的内外多边形进行三角剖分。Delaunay 三角剖分是对任意平面多边形进行三角剖分的有效方法^[6-7]。采用 Delaunay 三角剖分对切割后不是三角面片的多边形进行剖分。

4 实验结果及分析

为了验证本文凸柱体切割算法的有效性和正确性, 利用从 CT 影像重建的三维颅骨模型, 抽取其内外表面构成三维颅骨网格模型, 选取一组与图 2 示意图对应的正颌截骨术进行截骨模拟, 这些截骨术分布在上下颌区域, 截骨切口形状各不相同, 有简单规则的形状, 也有复杂的不规则的形状。

实验结果如图 5 所示, 本文算法不仅对于颌成型、下颌支垂直形等这类简单的截骨术, 能够取得理想的切割效果, 而且对于上颌 Le Fort I 型、下颌支矢状、下颌前根尖等这类切口形状不规则的截骨术也能够较好的实现。

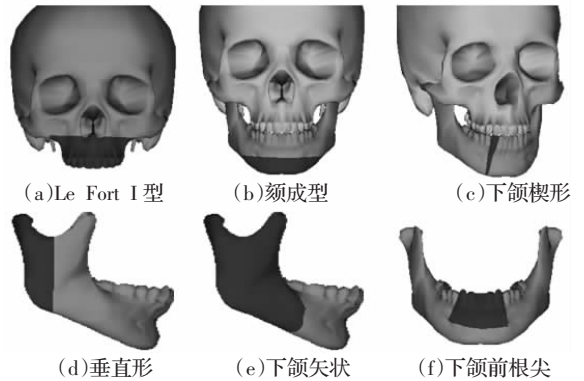


图 5 几种正颌截骨术结果图

5 结论

提出一种基于凸柱体的网格切割算法用于模拟正颌截骨术, 首先根据截骨术的切口类型, 构造相对应的柱体, 然后对柱体进行相应的调整, 使其能够满足截骨切割需要, 最后, 利用此柱体对 3D 颅骨网格模型进行切割, 完成骨块分离。本文算法能够实现大量复杂类型的正颌截骨术, 且在一定程度上能够适应正颌截骨术的改良变化。该方法为正颌医生提供了一个比较通用的虚拟正颌截骨工具。

参考文献:

- [1] Gateno J. Accuracy of custom stereo lithographic templates for the installation of an external multiplanar distractor[J]. J Oral Maxillofac Surg, 1996, 57:96.
- [2] Andre N, Katja B, Rainer W. Advanced virtual corrective osteotomy[J]. International Congress Series, 2005, 1281:684-689.
- [3] 王卫红, 秦绪佳, 郑红波. 医学图像 3 维重建模型的虚拟剖切算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(2):217-223.
- [4] Mohammad Azam R. Mulation of interactive cutting tool for craniofacial osteotomy planning[C]//Proceedings of the Computer Graphics, Imaging and Visualisation. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2007.
- [5] Lam J H, Yam Y A. skeletonization technique based on delaunay triangulation and piecewise bezier interpolation[C]//the 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, 2007.
- [6] Sakamoto M M. A 2-D delaunay refinement algorithm using an initial prerenement from the boundary mesh[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44:1418-1421.
- [7] 王占刚, 潘懋, 屈红刚, 等. 三维折剖面的 Delaunay 三角剖分算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1):94-96.
- [8] 胡静, 网大章. 正颌外科[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006.