

## 一种模拟手术刀轨迹并切割颅骨的方法

刘奇,周明全,耿国华

(西北大学 计算机科学系 可视化技术研究所,陕西 西安 710069)

**摘要:**在计算机辅助虚拟颅外科手术研究中,需要对基于CT技术构建的三维颅骨模型进行截骨。对颅骨模型进行截骨是比较复杂的一项操作,针对这一问题,文中提出了采用针刺取点法构建切割平面与颅骨面相交求交线的方法模拟手术刀轨迹切割颅骨。经实验表明,该方法容易实现,能够高效地切割颅骨,达到理想的效果。

**关键词:**虚拟颅外科手术;颅骨模型;截骨;针刺取点法

**中图分类号:**TP391.41

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3751(2006)03-0235-03

## An Approach for Simulating Bistoury Orbit and Incising Skull

LIU Qi, ZHOU Ming-quan, GENG Guo-hua

(Inst. of Visualization Techn., Dept. of Computer Sci., Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** In the computer aided craniofacial surgery simulation, need to cut the craniofacial model which acquired from CT scans of the individual. It's very difficult to cut the bone in craniofacial model, therefore, describe an approach which using 3D object - point to construct a plane and intersect with skull surface to get a curve, and this curve can exactly simulate the bistoury orbit. People can get the 3D object - point from "needle puncturing for points" method.

**Key words:** simulated craniofacial surgery operation; craniofacial model; osteotomy; needle puncturing for points

## 0 引言

计算机辅助外科是基于计算机对大量数据信息的高速处理,通过虚拟手术环境为外科医生从技术上提供支援,使手术更安全、更准确。随着CT成像技术的发展使计算机虚拟现实技术在颅外科中的应用得到了飞速的发展。三维CT图像对术前设计有明显优势,三维CT显示了颅骨三维结构,明确了其空间解剖关系。在三维图像上进行直接设计,确定截骨的位置、截骨量,骨段移动的距离和方向,比经过立体摄影形成的面部表面三维图像更准确、更容易。文中提出了采用针刺取点法构建切割平面与颅骨面相交的方法,模拟手术刀轨迹并显示切割情况,预测手术效果。

1)材料。基于PC和Windows操作系统,主要功能用VisualC++实现,采用OpenGL图形开发工具。采用西京医院螺旋CT得到的病人头部CT断层序列图像,图像格式为DICOM3.0,层距1mm,对断层序列图像进行三维重建得到三维体数据值。

2)三维显示和交互操作。利用三维重构技术得到颅骨表面的三角面数据和对应的法向量数据,用OpenGL三维显示。采用针刺取点法,将用户在屏幕选中的点的二

坐标变换到体数据坐标系中得到其深度坐标,依据此三维坐标搜索出相应的骨组织节点,得到对应的骨组织体数据和三角面片数据,对其实施操作。

3)虚拟截骨并模拟手术刀轨迹。为了保证精度,这里采用“直线”切割骨组织而不是任意“曲线”,当用户用鼠标模拟手术刀在屏幕切割骨组织的同时,系统得到鼠标点对应在设备坐标系中的坐标,然后将这些坐标映射到颅骨上就可确定一个切割平面,将切面经过的三角面片重绘,这样就完成了颅骨面的虚拟切割<sup>[1]</sup>。

## 1 算法思想

## 1.1 方法

三维颅骨在计算机中的存储形式为三维网格。三维网格由若干个三角形组成,组成三维网格的顶点分为若干层,每一层顶点位于平行于 $xoy$ 平面的某一个平面上(每层上的点组成颅骨表面的轮廓线, $i, j, k$ 为相应的轮廓线),且它们在此平面上按逆时针方向排列有序,相邻两平面之间的距离相等。这样,颅骨表面上的某一个点,其实就是在组成颅骨的三维网格的某一个三角形上。在三维空间中,一个点在一个三角形上,其含义为该点与该三角形同处于一个平面,且在此平面上该点位于该三角形上,这时,称此三角形为该点的相关三角形,如图1所示。

颅骨所在参照坐标系,及颅骨本身的坐标系位置如图2所示。

收稿日期:2005-06-22

作者简介:刘奇(1981-),男,陕西汉中,人,硕士研究生,研究方向为图形图像与多媒体技术;周明全,教授,博士生导师,研究方向为图形图像处理、三维可视化技术。

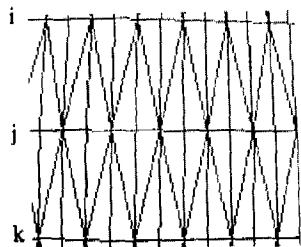


图 1 三角面片

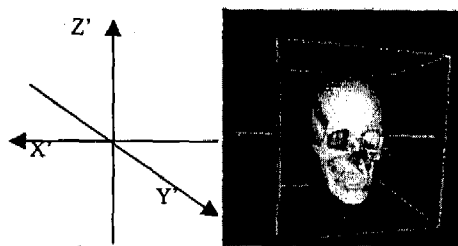
左为三维参照坐标系  $x'y'z'$ , 右为颅骨本身的坐标系  $x,y,z$ 

图 2 颅骨坐标系

让鼠标沿某一个方向在屏幕上移动并产生 3 个点,如图 3 所示,按下鼠标左键在屏幕上产生一个二维点  $R$ ,按住左键不放并拖动到预定终止位置,则在鼠标左键弹起的地方,屏幕上产生另一个二维点  $S$ ,然后再计算出线段  $RS$  的中点坐标  $F$ ,由针刺取点法可得到点  $R, F, S$  在颅骨上的相应点  $M, E, N$ 。点  $E, M, N$  就确定了一个切割平面(由于人类颅骨表面生理结构复杂,除非移动距离在一个三角面片内,否则这 3 个点极难共线)。虚拟手术刀的轨迹为该平面与颅骨表面的交线。

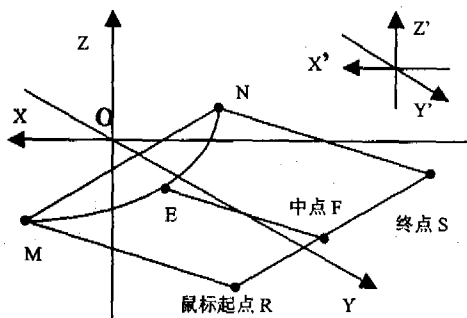


图 3 点、截平面、颅骨之间的对应关系

手术刀可以在颅骨表面沿任何方向移动,因为可以经过点  $M, E, N$  三点确定的平面和颅骨求交线,且此交线一定存在。截平面与颅骨表面求交线的过程实际上就是截平面与空间三角形求交线的过程。

设两条相邻的轮廓线分别为第  $i$  层、第  $j$  层,在第  $i$  和第  $j$  层之间进行颅骨表面的重构。每一个重构生成的三角面片的顶点均来自  $i$  和  $j$  上的采样点。在切割时,切割平面与相邻轮廓线形成的相交线段称为严格的重构线段。由于切割后的颅骨表面模型将从严格的重构线段处断开,所以需要修改重构后的颅骨表面模型,使之满足严格的重构线段的要求,即严格的重构线段不割裂任何颅骨表面模型的三角面片。如图 4 所示,重绘的过程为:

(1) 插值。将交点  $A, B$  分别插入轮廓线  $i$  和  $j$  的采样点中,采用最短对角线重构原则进行重构,只需局部调整。

(2) 调整重构的三角面片,使重构的三角面片不割裂严格的重构线段,为切割做准备。

截平面与颅骨表面求交线过程中会与三角面片产生大量交点,而实际需要的只是处于轮廓线上的点,所以还需要根据交点的  $z$  坐标排除这些不在轮廓线上的交点。

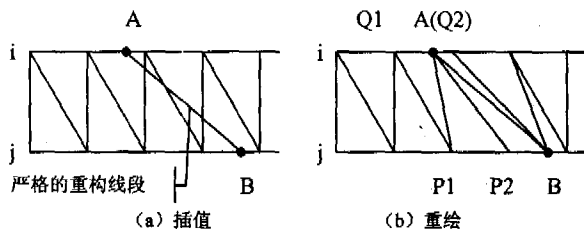


图 4 颅骨模型的三角面片重绘方法

最短对角线重构原则:在相邻两层中,下层轮廓线上的点和上层轮廓线上的点分别表示为:  $P = \{p(i), i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $Q = \{q(j), j = 1, 2, \dots, m\}$ 。按以下方法进行连接,如图 4(b) 所示:如果  $P1Q2 < P2Q1$ ,则连接  $\Delta P1P2Q1$ , 否则连接  $\Delta P1Q2Q1$ , 即在四边形  $P1P2Q1Q2$  中的两条对角线  $P1Q2$  和  $P2Q1$  中选择较短的一条作为下一三角面片的边生成三角面片。注:这里只作局部调整,即只调整交点  $A$  和  $B$  之间的三角面片,点  $A$  和  $B$  可能不止使用一次<sup>[2]</sup>。

### 1.2 针刺取点法

这里使用针刺取点法解决点的拾取问题,即依据屏幕坐标点得到用户所需的三维物体上的点且要转化为三维建模时所使用的坐标系(世界坐标系)中的坐标值。当用户用鼠标在屏幕上点击时,得到的是一个相对于屏幕坐标系的二维点,与屏幕上显示的三维颅骨没有直接联系。要得到用户所需的三维颅骨上的点的原始坐标值,首先,要把用户给出的二维屏幕坐标点转化为空间三维点,再从此点引一条三维空间直线,向物体空间延伸,通过计算求得它与三维物体表面的交点。直线可能与多个表面相交,存在多个交点。可以通过比较各点与起始点的距离,那个离起始点最近的交点就是所需的点。在得到这个点的坐标值之后,还须对此点进行矩阵变换,也就是对其进行由世界坐标系到设备坐标系及用户实时旋转、放大、缩小等变换的逆过程。最后得到此点在三维物体建模时所使用的坐标系中的坐标值,参见文献[3~5]。

### 1.3 截平面与颅骨面求交线

设截平面的方程式为:  $Ax + By + Cz + D = 0$ , 其中  $v(A, B, C)$  为平面的法向量。利用针刺取点法,可得到屏幕上鼠标点  $R, E, S$  对应颅骨面上点  $M, E, N$  的坐标分别为  $(x_m, y_m, z_m), (x_e, y_e, z_e), (x_n, y_n, z_n)$ 。针刺取点法得到的点  $M, E, N$  确定一个截平面,于是可求得该截平面的法向量  $v(A, B, C)$ 。

求平面与三角形面片的交线,其结果分 3 种情况:

- (1) 不相交;
- (2) 有一个交点,此时该交点只可能为三角形的某个顶点;

(3) 有两个不相同的交点,即交于一条线段。

所以当求截平面与  $AB, BC, CA$  的交点时,若存在 3 个交点,则必然有两个交点相同,此时为第 3 种情况;若有两个不相同的交点为第 3 种情况,相同则为第 2 种情况,不可能只有一个交点;没有交点,即是第 1 种情况,所以三角形与截平面求交线可分别求三角形的 3 条边  $AB, BC, CA$  与截平面的交点。

三角形的 3 条边与平面求交线的方法:

设直线  $L$  过三角形的顶点  $A(x_a, y_a, z_a)$ , 方向向量  $AB$  为  $v(X, Y, Z)$ 。

截平面的方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

若  $AX + BY + CZ = 0$  且  $Ax_a + By_a + Cz_a + D = 0$ , 则直线  $L$  在截平面内;若  $AX + BY + CZ = 0$  且  $Ax_a + By_a + Cz_a + D \neq 0$ , 则直线  $L$  平行于截平面;当  $AX + BY + CZ \neq 0$  时,直线  $L$  与截平面相交。

$L$  的参数方程为:

$$\begin{cases} x = x_a + tX \\ y = y_a + tY \\ z = z_a + tZ \end{cases} \quad (2)$$

当  $t > 1.0$  或  $t < 0.0$  时,线段所确定的直线与截平面的交点在线段的延长线上,否则线段与截面有交点。联立解方程组(1)、(2),即可求出  $L$  与截平面的交点坐标。这样,将点  $A(x_a, y_a, z_a)$  分别替换为三角形的顶点  $B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c)$ , 相应的  $v(X, Y, Z)$  分别为  $BC, CA$ , 即可分别求出三角形的 3 条边  $AB, BC, CA$  与截平面的交点<sup>[6]</sup>。

## 2 算法的处理流程

为了方便地进行求交运算,在建立颅骨模型的时候,定义如下类:C3Dpoint 类:三维点的对象类,提供三维点的各种操作,如  $+, -, =, + =, - =$ , 及求空间两个点的距离;C3DVertex 类:三角形顶点类,包含一个 C3DPoint 类型的成员和一个三角形指针数组,分别表示该顶点的位置和相关三角形;C3DTriangle 类:空间三角形类,提供对空间三角形的各种基本操作;C3DTriStrip 类:三角形条带类,储存同一层中的空间三角形;C3Dcontour 类:轮廓线类,储存轮廓线上的点信息。设计这样的结构,将 C3DVertex 类对象、C3DTriangle 类对象、C3DTriStrip 类对象、C3Dcontour 类对象根据它们之间的拓扑关系关联起来。该数据结构通过指针将每个顶点与其相邻的顶点和相邻三角形建立联系。由于之后的求交运算都是针对每个三角面片和其相邻三角面片进行计算的,因此这种数据结构可方便地进行查找,并提高运算速度。用下面流程可实现文中所讨论的算法:

Step1 由  $M, E, N$  三点确定截平面 plane 的法向量;

Step2 获取当前起点坐标及其相关三角形 triangle 信息(初始设为  $M$ );

Step3 判断当前起点相关三角形 triangle 和点  $N$  相

关三角形 triangle 是否相同,相同则删除该三角形,程序结束;

Step4 求切平面 plane 与 triangle 的交线  $AB$ ;

Step5 判断  $AB$  是否存在。若存在,则根据  $A$  和  $B$  与  $N$  的距离大小判断  $AB$  的起点与终点,将与  $N$  距离最近的作为终点  $B$ 、距离远的作为起点  $A$ ,保存  $B$  到链表 MyList 中。否则程序结束;

Step6 判断  $B$  与  $M$  是否相同,若相同则进行特殊化处理;

Step7 将  $B$  作为新的起点  $A$ ;

Step8 然后转至 Step2;

Step9 排除链表 MyList 中不在轮廓线上的点,通过相邻轮廓线层的相交信息,将上、下层的交点两两配对(一个交点可能不止使用一次),即可得到严格的重构线段;

Step10 对相邻轮廓线层交点之间的三角面片按最短对角线重构原则进行局部重构。

当  $B$  作为新的起点  $A$  后,则须搜索下一个与截平面有交线且此交线正规化以后其起点为  $A$  的相邻三角形。这时,  $A$  点的位置分两种情况:

(1) 在三角形的某个顶点上,所以需要搜索共用此顶点的其它所有三角形。

(2) 在三角形的某条边上,因为对于三维网格而言共用一条边的三角形只可能有两个,所以只需找到另一个以此边为边的三角形。当点  $A$  的相关三角形 triangle 和点  $N$  相关的三角形 triangle 相同时,即当前终点已经移动到颅骨面与截平面交线的终点,这时则可进行重构三角面片的工作。

## 3 结 论

文中在射影几何基础上,配合颅骨模型,提出了一种简便的模拟颅外科手术方法。本方法在实现时只需要在屏幕上采集 3 个点的信息,就可生成一条切割线模拟颅外科手术中的截骨手术效果。这种方法简便、实时,可以方便地应用在多种环境中,具备一定的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 李 晶,雷曼平,黄耀熊,等. 计算机手术模拟系统中的快速三维骨组织分割[J]. 第四军医大学学报, 2001, 22(18): 1667-1670.
- [2] Computer Graphics Laboratory, Institute of Scientific Computing, ETH Zurich. Methods for Physics Based Facial Surgery Prediction[Z]. Diss. ETH No. 13912, 2001.
- [3] 耿国华,李小群,周明全. 交互式空间三维距离测量[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, 30(4): 245-261.
- [4] 刘力强,周明全,耿国华. 一种平行透视下的三维拾取方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2002, 32(1): 39-42.
- [5] Wright R S, Jr Michael S. OpenGL 超级宝典[M]. 潇湘工作室译. 北京:人民邮电出版社, 2001.
- [6] 孙家广. 计算机图形学(第 3 版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.