

医学图像 3 维重建模型的虚拟剖切算法

王卫红¹⁾ 秦绪佳^{1),2)} 郑红波³⁾

¹⁾(浙江工业大学软件学院,杭州 310032) ²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室,杭州 310027)

³⁾(浙江工业大学信息工程学院,杭州 310032)

摘 要 对医学图像体数据及重构几何模型进行虚拟剖切,可以方便地看到内部的组织,便于观察和诊断,可用于医疗放射治疗规划。针对医学图像重建的表面几何模型,提出了对模型进行平面剖切、立体开窗及任意交互切割的算法。平面剖切和开窗是用剖切面或剖切体对重建模型施以剖切,在剖切面上生成边序列及顶点序列;由此边序列和顶点序列生成封闭的边界轮廓,确定各轮廓的包含关系;对封闭轮廓包围的截面区域进行 Delaunay 三角剖分,得到完整的剖切后的表面模型。任意交互切割过程是交互生成切割路径,确定切割边界,并沿切割边界对表面模型进行切割。实验结果证明了本文算法的有效性。采用本文算法可得到良好的虚拟剖切效果。

关键词 医学图像 表面模型 虚拟剖切 立体剪裁

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)02-0217-07

Virtual Cutting Algorithms for 3D Surface Model Reconstructed from Medical Images

WANG Wei-hong¹⁾, QIN Xu-jia^{1),2)}, ZHENG Hong-bo³⁾

¹⁾(College of Software, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

³⁾(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

Abstract With virtual cutting operation for volume data of medical images or reconstructed geometry models from medical images, inside tissues can be observed easily, which can aid doctors to diagnose. The methods can also been used in surgery planning of radiotherapy. In this paper, new methods of plane cutting, stereo clipping and arbitrary cutting operations of 3D surface model reconstructed from medical images are presented. In plane cutting and stereo clipping methods, the 3D model is cut by plane or polyhedron. Lists of edge and vertex in every cut plane are established. From these lists the boundary contours are created and their embracing relationship is built. The region enclosed by the contours is triangulated using Delaunay triangulation algorithm. The procedure of arbitrary cutting operation is to create cutting path interactively at first, then build cutting boundary, and finally cut the model with the boundary. The cut model still maintains its correct topology structure. Experiments show the efficiency and stability of the methods. Good results are achieved by using the methods to cut models reconstructed from medical images.

Keywords medical image, surface model, virtual cutting, stereo clipping

1 引 言

医学图像 3 维重建是科学计算可视化的一个

重要研究和应用领域。近年来,国内外学者对计算机断层扫描(CT)数据及磁共振图像(MRI)数据的可视化做了很多研究。实现医学图像的 3 维重建,在分割的区域中提取出感兴趣的器官、组织或

基金项目:国家自然科学基金项目(60473024);浙江省自然科学基金项目(Y104341, Y105303);国家“863”高科技计划项目(2003AA132040)

收稿日期:2005-03-15;改回日期:2005-09-10

第一作者简介:王卫红(1969 -),男,副教授。1991 年毕业于南京大学大气科学系,1999 年于浙江大学计算机系获计算机应用专业硕士学位。主要研究方向为 GIS、图像处理。E-mail: wwh@zjut.edu.cn

病变体,从而实现对这些被提取出的器官、组织或病变体进行 3 维重构,达到辅助治疗与手术规划的目的。虚拟切割与手术模拟在医学图像可视化中有着重要应用和迫切需求。对外表的组织(模型)进行剖切、开窗及任意切割,可以方便地观察到内部组织或病变体的形状、大小及空间位置,以便更好地进行诊断与辅助治疗方案的制定。同时,在人体标本匮乏的情况下,虚拟切割对医学解剖教学亦有重要意义。

对于医学图像(或体数据)及重构模型的剖切,王立功等人^[1]针对医学图像体数据场提出了交互给出任意剖切路径的剖切显示算法,但该算法不适用于重构的表面模型;张绍祥等人^[2]建立了中国数字化可视人体数据的交互可视化平台,形成了数字化人体解剖学和虚拟外科手术的雏形,但该方法只能实现断面解剖,不能任意交互切割;刘晶等人^[3]对 ICT(industrial computerized tomography)切片重构模型提出了一种剖切方法,该方法利用剖切面对重构模型所在空间的立方体图像空间进行剖切,生成交点集合,并将空间剖面映射到 2 维图像平面上。该方法也只能实现平面切割;秦绪佳^[4]提出了采用平面及多面体对重构模型进行切割的立体剪裁算法,该算法可得到较好的切割效果,但不能实现任意路径的切割,也不能进行任意方位截面的剖切,其切割平面只能平行于某一坐标平面。

本文提出了一种对重建模型实施任意交互切割的算法,并对文献[4]的平面剖切、立体开窗操作进行了改进,克服了原算法中切割平面只能平行于某一坐标平面的缺点。平面剖切及开窗的算法是先用剖切面或剖切体对原模型进行切割,在各剖切面上生成边界边表及顶点表,然后检测出各封闭边界轮廓及各轮廓间的包含关系,最后对封闭边界轮廓区域进行 Delaunay 三角剖分生成剖切截面。任意虚拟切割是采用交互生成切割路径来对模型施以切割。改进的平面剖切及立体开窗的算法使剖切更加灵活。该任意交互剖切算法可模拟解剖手术,使对重建模型进行虚拟剖切更方便,更具实用性。

2 表面模型的构建与记录

医学图像 3 维表面重建方法中最有影响的是

Loresen 等人 1987 年提出的移动立方体(marching cubes, MC)算法^[5]。MC 算法的基本思想是把 3 维图像相邻层上的各 4 个像素组成立方体的 8 个顶点,逐个处理 3 维图像中的立方体,分类出与等值面相交的立方体,插值计算出等值面与立方体边的交点。根据立方体每一顶点与等值面的相对位置,将等值面与立方体的边的交点按一定方式连接生成等值面,作为等值面在该立方体内的一个逼近表示。

由于 MC 算法构建的 3 维表面模型包含的三角面片数量巨大,在满足视觉效果及医学应用的前提下提高实时交互能力,以 Hoppe 的边收缩算法^[6-8]为基础对重建的模型进行了网格简化。

表面模型的几何信息主要由三角面片链表和顶点链表表达,每个面片结点包含指向下一个三角面片结点的指针及该三角面片的 3 个顶点的 3 个指针,每个顶点结点包含指向下一个顶点结点的指针,以及该顶点的 3 维坐标及法向量值。三角面片链表和顶点链表的数据结构如下:

```
Class Triangle {
    int m_nTriID;
    Vertex * m_pVert[3];
    Triangle * m_pNext;
    ...
}
Class Vertex {
    int m_nVertID;
    double x, y, z;
    Vertex * m_pNext;
    ...
}
```

3 模型的平面剖切处理

3.1 模型三角面片序列的剖切

设平面方程为 $ax + by + cz + d = 0$, 则平面的法向量为 $n(a, b, c)$, 平面将 3 维空间分割为两个半空间 A 和 B , 其中, 半空间 A 处在平面的正法向方向。定义空间一点 $P(x, y, z)$, 并定义“距离”:

$$D = ax + by + cz + d$$

则有:

- (1) 若 $D > 0$, P 点处在 A 半空间;
- (2) 若 $D = 0$, P 点处在平面上;
- (3) 若 $D < 0$, P 点处在 B 半空间。

由“距离”值 D 可以判定 P 点处在平面上、平面的正法向一侧还是负法向一侧。

检测3维模型每个三角面片的3个顶点的“距离”值 D , 若 D 值均大于0或均小于0, 则三角面片与剖切平面无交, 否则有交。若某一三角面片的边与剖切平面有交, 即其边上两个顶点的 D 值, 有一个大于0, 另一个小于0。由该边的两顶点 $P_1(X_1, Y_1, Z_1), P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 确定的直线方程与平面联立即可求得交点 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 。

对表面模型的剖切, 保留的是处于剖切平面正法向一侧的部分, 即处在半空间 A 中的部分, 而处在负法向一侧的部分则被剖切掉。

对模型进行剖切时, 模型与剖切面求交会产生一个边界, 这个边界可能会存在多个封闭的内环和外环, 这些内环和外环所包围的区域即为切面。为记录下边界的几何元素, 以便生成切面, 按以下方法构造了切割生成的边界的边表及顶点表。

遍历被剖切几何模型的所有三角面片,

(1) 若三角面3个顶点的“距离”值 D 均大于0, 则该三角片保留在原模型中;

(2) 若三角面3个顶点的“距离”值 D 均小于0, 或者三角面片两个顶点“距离”值 $D < 0$, 而另一个顶点 $D = 0$, 则该三角片从原模型中清除;

(3) 若三角面片两个顶点“距离”值 $D = 0$, 而另一个顶点 $D > 0$, 则该三角片保留在原模型中, 并将等于0的两点及其所在边写入边表及顶点表中;

(4) 对于三角面片顶点既有 $D > 0$, 又有 $D < 0$ 的情况处理如下:

①对于三角面片的3个顶点中, 1个顶点 $D = 0$, 1个顶点 $D > 0$, 1个顶点 $D < 0$, 如图1中 $\Delta 012$, 求出交点5的3维坐标, 将顶点0、5和边界边05写入顶点链表及边链表。原模型中的 $\Delta 012$ 替换成 $\Delta 052$, 顶点1替换成5;

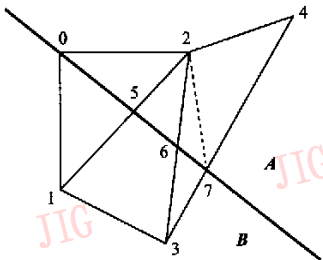


图1 切面与三角面片的交

Fig. 1 Intersection between cut plane and triangle facets

②对于三角面片两顶点 $D < 0$, 另一顶点 $D > 0$, 如图1中 $\Delta 123$, 求出两交点5、6的3维坐标, 将顶点5、6和边界边56写入顶点链表及边链表。原模型中的 $\Delta 123$ 替换成 $\Delta 526$, 顶点1、3分别替换成5、6;

③对于三角面片两顶点 $D > 0$, 另一顶点 $D < 0$, 如图1中 $\Delta 243$, 求出两交点6、7的3维坐标, 将顶点6、7和边界边67写入顶点链表及边链表。原模型中的 $\Delta 243$ 变为四边形2674, 需将此四边形剖分成两个三角形, 如剖分成 $\Delta 267$ 和 $\Delta 274$, 或者 $\Delta 264$ 和 $\Delta 674$ 。

遍历模型的所有三角面片, 进行上述操作, 即生成剖切后的模型并且生成剖切面边界的边表及顶点表。由边表及顶点表去构建剖切截面。

3.2 封闭边界轮廓的检出

以对模型施加剖切生成的边表为原始边表检测出所有封闭环, 以确定剖切截面区域。封闭环检出算法如下:

(1) $i = 0$ 。

(2) 从原始边表中取出表头的边, 建立第 i 号轮廓边表, 记其起点为 V_0 , 终点为 V_1 , 在新建边表中写入该边, 并从原始边表中删除该边。

(3) 从原始边表的第1条边起向后遍历此表, 用 V_1 比较每条边的两个端点, 如果 V_1 与某一边的其中一个端点坐标相同, 置 V_1 等于该边另一个端点, 转下一步; 否则在原始边表中向后遍历。

(4) 将该边写入第 i 号轮廓边表, 并从原始边表中删除该边。比较 V_0 是否等于 V_1 , 如果 V_0 等于 V_1 , 转下一步; 否则, 转第3步。

(5) 检测原始边表是否为空, 如已空, 结束; 否则, $i = i + 1$, 转第2步。

判断顶点是否相等采用检测指向顶点的指针是否相等, 这样可以避免两点在空间上非常接近时误判为相等。

3.3 轮廓包含关系的确定

对剖切面的边进行封闭环检出后, 还必须检测各封闭轮廓间的包含关系, 从而确定由封闭轮廓包围的区域是截面还是空洞。

检测的方法是: (1) 检测序列的第1个环, 检测此环是否包含其他环, 如果没有包含其他环, 再检测此环是否被其他环包含, 如果不被其他环包含, 则此环标记为一独立外环, 并从序列中取出。

(2) 若某一环不被其他环包含, 但它包含其他

环,则该环为一外环。将此环及其包含的所有内环从原序列中取出,生成一子序列,然后对子序列中的内环进一步检测。若某内环不被其他内环所包含,则此内环为取出外环的一个内环,若某内环被另一个内环所包含,则此环转变为外环,将此环及其包含的所有内环从子序列中取出生成新的子序列。重复地检测,确定子序列中各环的包含关系。

重复上述两步,可确定切面上所有环的包含关系。

以图 2 为例,说明封闭环包含关系的检测。假设由 3.2 节方法检测出的封闭环序列为:0-1-2-3-4。2 为独立外环,4 为含有内环的外环,取出 4 及其内环 0、1、3 生成子序列 4-0-1-3,3 被内环 0 包含且 3 不含其他环,则 3 转为独立外环,0、1 为外环 4 的内环。

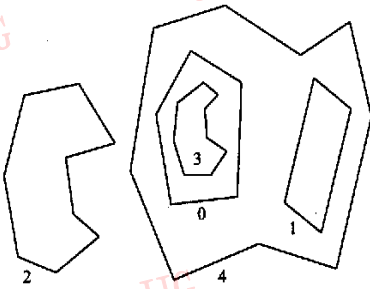


图 2 轮廓包含关系的确定

Fig. 2 Build embraces relationship of contours

由于环是无相交的,如果环上的一条边的一个端点在另一环之内,则可以判定此环在另一环之内。所以采用夹角之和检测法^[9]检测点是否在多边形之内来确定环的包含关系。

3.4 剖切截面的生成

由于 3 维重建的表面模型是由三角面片表示的,所以要表达剖切后的模型,必须对剖切面进行三角剖分,即对上面检出的截面区域进行三角剖分。Delaunay 三角剖分是对任意平面多边形(包括含有内孔的平面多边形)进行三角剖分的有效方法^[10,11]。这里基于此方法进行剖切截面的三角剖分。

任意多边形 Delaunay 三角剖分算法实现步骤参见文献[12]。图 3 为图 2 对应轮廓的 Delaunay 三角剖分。

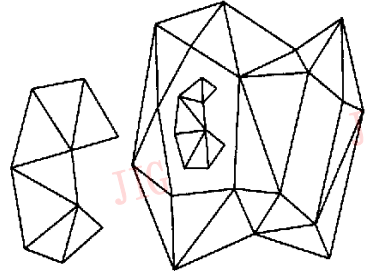


图 3 图 2 对应轮廓的三角剖分

Fig. 3 Triangulation of contours in fig. 2

4 开窗处理

开窗操作一般是用立方体或棱柱对重建模型进行切割,模型处于剖切体之内的部分被切割掉,之外的部分被保留下来。切割的方法是遍历模型的每个三角面片,检测其在剖切体之内、之外还是相交,处在剖切体之内的三角面片被去除,处在剖切体之外的三角面片保留在模型中,相交的面片将进行切割运算。三角面片与剖切体的面求交与前述的求交方法相同,只不过要考虑切面的边界,剖切体与模型有交的每个面上都生成一个边表和顶点表,然后对每个切面的边表进行轮廓检出、包含关系确定及三角剖分生成剖切截面。若模型的某一三角片与剖切体的多个面有交时,该三角片将会被切割成多边形,然后需将此多边形进行三角剖分,加入到模型中。

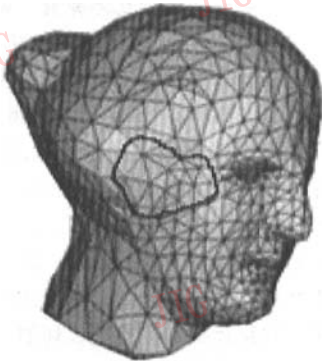
5 任意切割

5.1 切割曲线交互生成

平面剖切及开窗处理都存在一定的局限性,平面剖切是以平面去切割模型,切面单一;开窗处理是以多面体(如立方体、棱柱体等)去切割重构模型,可获得较好的表现效果,但这两种方法都缺乏灵活性,不能实现任意交互的虚拟切割。

下面给出一种任意剖切的方法。首先用鼠标(虚拟手术刀)交互地在模型表面画一条封闭的任意曲线,以此作为切割线来对模型任意切割。光标在模型上画线时,即是在模型的三角面片上画出一系列的点,这些点都在网格模型的某些三角形上。由于这些点序列连接成的空间多边形即为切割曲

线。如图 4(a)中的深黑色曲线。凡是有切割曲线(折线)上的点在模型三角形内、边界上或顶点上的这些三角形,形成一个三角形带,如图 4(b)中加粗的三角形带。由于网格模型和曲线多边形都是 3 维的,曲线多边形与网格三角形的边上不一定有交(交点可能在三角形内),不能用曲线多边形与模型三角面片直接求交来确定切割边界。



(a) 交互生成的切割曲线及包含切割曲线的三角形带

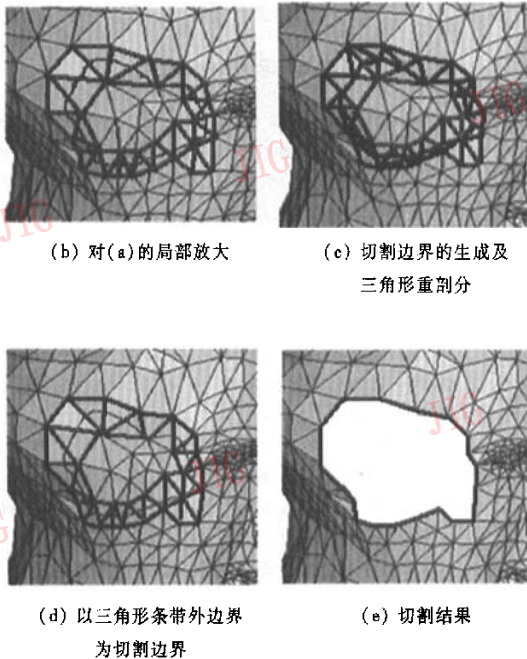


图 4 切割边界的确定

Fig.4 Build cutting boundary

5.2 切割边界的确定

方法 1 采用平面参数化方法将三角形带展开到平面上,同时曲线多边形也相应地展开到平面上,

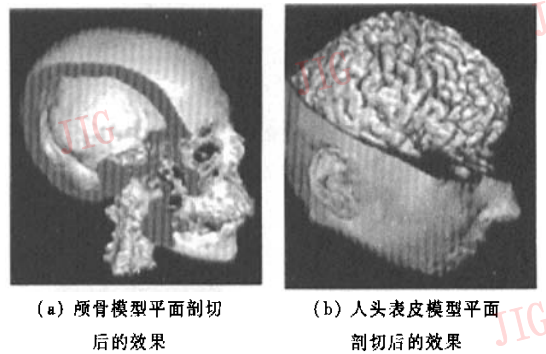
然后对平面上曲线多边形与三角形带上三角形的边进行求交计算,计算出交点,将这些交点映射回 3 维空间,得到 3 维交点序列。目前,已有许多优秀的网格平面参数化方法^[13-16]。本文采用了文献[15]的方法来实现编辑区域的平面参数化。将 3 维交点序列形成的空间多边形作为模型的切割边界。最后用 3.1 节的方法对切割的三角形重剖分,得到拓扑一致的网格模型,如图 4(c)所示。

方法 2 使用方法 1 需要对三角形带进行平面参数化、线段求交和三角形重剖分等复杂计算,特别是当网格模型较密、曲线边形的顶点较多时,计算量大。为简便起见,可采用三角形带的外边界(或内边界)作为模型的切割边界,免去复杂的计算。如图 4(d)的粗线外边界。

事实上,当模型网格较粗时,可用方法 1 处理。当模型网格较密时,切割曲线与三角形的内外边界不会相差太大,完全可以满足需要。

6 实验结果

图 5 为平面剖切操作结果,图 5(a)为 128 × 128 × 113 CT 图像颅骨重建模型施以剖切操作;图 5(b)为 256 × 256 × 109 MRI 图像大脑及人头表皮重建模型,并对表皮施以剖切的结果。



(a) 颅骨模型平面剖切后的效果

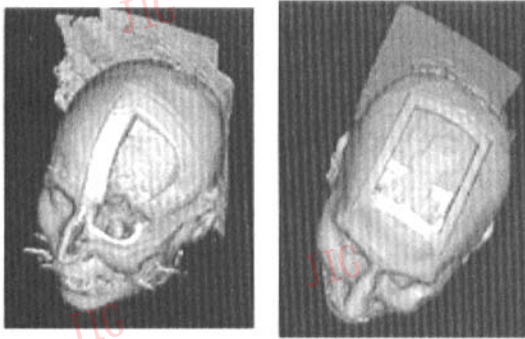
(b) 人头表皮模型平面剖切后的效果

图 5 重建模型的平面剖切

Fig.5 Plane cut for reconstructed models

图 6 为 128 × 128 × 113 CT 图像重建,并对表皮及颅骨模型用立方体去切割,从而可以观察到颅内组织。

图 7 和图 8 是任意交互虚拟切割的结果,对表皮任意交互切割后可观察到内部骨骼。



(a) 人头模型立方体
剖切效果 1

(b) 人头模型立方体
剖切效果 2

图 6 重建模型的立体剪裁

Fig. 6 Stereo clip for reconstructed models



(a) 脚的重建模型

(b) 脚表皮虚拟切割
后的效果

图 7 脚模型的任意切割

Fig. 7 Arbitrary cut for foot model



(a) 人头的重建模型

(b) 人头表皮虚拟切割
后的效果

图 8 人头模型的任意切割

Fig. 8 Arbitrary cut for head model

7 结 论

基于医学图像的 3 维重建是医学图像可视化和医疗放射治疗规划的基础。在人体多组织器官的重建及可视化中,为对重建组织的截面形状进行分析,观察内部组织的结构及空间位置,需要对重建模型施以剖切及对外表模型进行立体剪裁。本文针对医学图像重建的表面模型,提出了平面剖切、立体开窗及任意交互切割的算法。该算法首先对模型的三角面片序列求交,生成剖切边界的边表及顶点表,然后由边表及顶点表检测出所有封闭轮廓,用夹角和判别法确定各边界轮廓的包含关系,最后对封闭轮廓对应的截面区域进行 Delaunay 三角剖分,截面的三角面片加入到切割后的模型中,使切割后的模型仍然是满足拓扑一致的表面模型。任意虚拟切割是采用交互生成切割路径来对模型施以切割。

对模型施以剖切操作,可以分析截面大小及形状;开窗操作或任意虚拟切割,能方便观察内部组织结构,可用于医学解剖教学和手术规划。

参考文献 (References)

- 1 Wang Li-gong, Yu Yong-hua, Luo Li-min. The section display method for medical image volume dataset[J]. *Journal of Image and Graphics(A)*, 2003, 8(7):769 ~ 774. [王立功, 于甬华, 罗立民. 医学图像体数据场的剖切显示方法[J]. *中国图象图形学报(A版)*, 2003, 8(7):769 ~ 774.]
- 2 Zhong Shao-xiang, Wang Ping-an, Liu Zheng-jin, et al. Visualization of the first Chinese visible human male and female[J]. *Journal of Third Military Medical University*, 2003, 25(7):563 ~ 565. [张绍祥, 王平安, 刘正津等. 首套中国男、女数字化可视人体结构数据的可视化研究[J]. *第三军医大学学报*, 2003, 25(7):563 ~ 565.]
- 3 Liu Jing, Zhang Ding-hua, Zhao Xin-bo, et al. Cutting and application of ICT slice reconstructed model[J]. *CT Theory and Applications*, 2004, 13(4):60 ~ 63. [刘晶, 张定华, 赵歆波等. ICT切片重构模型的剖切及应用[J]. *CT理论与应用研究*, 2004, 13(4):60 ~ 63.]
- 4 Qin Xu-jia. Research on the techniques for 3D reconstruction and visualization of medical images[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. [秦绪佳. 医学图像三维重建及可视化技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2001.]
- 5 Lorensen W F, Cline H E. Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4):163 ~ 169.
- 6 Hoppe H, DeRose T. Mesh optimization[A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH'93[C]*, Anaheim, USA, 1993:19 ~ 26.

- 7 Hoppe H. Progressive meshes[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'96[C], New Orleans, LA, USA, 1996:99~108.
- 8 Peng Qun-sheng, Bao Hu-jun, Jin Xiao-gang. Foundation Algorithms of Realistic Computer ImageSynthesis[M]. Beijing: Science Press, 1999; 377~380. [彭群生, 鲍虎军, 金小刚著. 计算机真实感图形的算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1999; 377~380.]
- 9 Sun Jia-guang, Yang Chang-gui. Computer Graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995:390~391. [孙家广, 杨长贵著. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995:390~391.]
- 10 Lo S H. Delaunay triangulation of non-convex planar domains[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1989, 28(11):2695~2707.
- 11 Ding Yong-xiang, Xia Ju-chen, Wang ying, *et al.* Delaunay triangulation of arbitrary polygons[J]. Chinese Journal of Computer, 1994, 17(4):270~275. [丁永祥, 夏巨谌, 王英等. 任意多边形的 Delaunay 三角剖分[J]. 计算机学报, 1994, 17(4):270~275.]
- 12 Qin Xu-jia, Ou Zhong-ying, Hou Jian-hua. Cutting and stereo clipping of 3D surface model reconstructed from medical images[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(3):275~279. [秦绪佳, 欧宗瑛, 侯建华. 医学图像三维重建模型的立体视窗剪裁[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(3):275~279.]
- 13 Floater M S. Parameterization and smooth approximation of surface triangulations[J]. Computer Aided Geometric Design (CAGD), 1997, 14(3):231~250.
- 14 Sheffer A, de Sturler E. Surface parameterization for meshing by triangulation flattening [A]. In: Proceedings of 9th International Meshing Roundtable [C], New Orleans, L A, USA, 2000:161~172.
- 15 Sheffer A, de Sturler E. Parameterization of faceted surfaces for meshing using angle-based flattening [J]. Engineering with Computers, 2001, 17(3):326~337.
- 16 Biermann H, Martin I, Bernardini F, *et al.* Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'02[C], San Antonio, USA. 2002:312~321.