

面向颅骨损伤修补的缺损重建算法

姚 远, 杨红飞, 胡庆夕

(上海大学 快速制造工程中心, 上海 200444)

摘要: 提出一种针对颅骨缺损重建模型的孔洞修复算法, 根据孔洞特征自动提取缺损边缘。通过双环采样, 投影构建代理曲面; 通过合并环间区域及引入边缘约束的平滑, 得到缺失实体孔洞的上下缝合面。在此基础上, 搜索出上下边界环之间的三角网格区域, 利用几何约束条件重建缺失实体。算法能最大限度的减少人工交互步骤, 符合需要的修补结果。

关键词: 颅骨补缺; 孔洞修复; 轮廓环扩展; 映射平滑; 缝合面

中图分类号: TP391.4; R683

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)01-0041-06

Missing Entity Hole Repairing Algorithm of 3D Closed Triangle Mesh

Yao Yuan, Yang Hongfei, Hu Qingxi

(Engineering Center for Rapid Manufacturing, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: A hole repair algorithm for skull defect repair is put forward. From the input of a set of guide points, the upper boundary ring for the hole is searched according to edge features and the position of the objective point. The expanded ring is obtained by the expansion of the upper ring along the gradient direction. And the boundaries of objective regions are recognized, while the region between this two rings is obtained. Based on two samples rings, the lower boundary ring is constructed by the inward expansion of the upper ring, and the region between the upper and lower rings is identified. Then the lower patching surface is constructed by using geometric constraints. The repair entity is constructed by stitching the upper patching surface, lower patching surface, and the region between the upper ring and lower ring. The algorithm can minimize the manual interaction steps and produce a satisfied repair result.

Key words: skull repair; hole repair; boundary ring expansion; mapping smoothing; patching surface

0 引言

世界范围内颅骨损伤的高发生率使发展临床快速骨缺损修复技术成为迫切的要求。传统的异种骨种植移植和特种金属修补的方法在生物学和力学性能上往往不能满足要求, 并会产生各种风险^[1]。新兴的组织工程技术为临床骨补缺治疗提供了可行的替代骨制造方法, 它利用多孔材料作为组织再生的构架, 将体外培

养的细胞植入, 并于细胞增殖后植入体内, 引导所需的骨组织重新生长, 而原骨支架则可逐步降解排出, 有效地避免了传统技术的弊端^[2]。基于组织工程中的骨缺损修复过程中, 首先需要有一个与患部结构一致的骨支架作为细胞培养的载体, 这涉及到一个缺损骨组织轮廓重建的问题。三维重建后的颅骨模型颅骨可表示为封闭的三维三角 Mesh 模型。几乎所有的颅骨创伤都表现为其图形结构中的孔洞, 而对于缺损部位进

收稿日期: 2007-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60703029), 上海市优秀青年科研专项基金资助项目(B.37-0109-07-011)

作者简介: 姚 远(1978-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 上海大学讲师, 博士, 主要研究方向为图形图像, 虚拟现实, 网络应用;
杨红飞(1983-), 男, 河南洛阳人, 上海大学硕士研究生, 主要研究方向为图形图像;
胡庆夕(1959-), 男, 河南焦作人, 上海大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为快速成型, 图形图像处理, 生物材料。

行修补的过程则可定义为对于 Mesh 模型的孔洞修复问题。

常用的孔洞修补算法可以分为体素方法和几何方法,其中体素方法采用有向距离函数差分^[3]或体素滤波^[4],以及在此基础上使用多种偏微分方程进行优化的方法,消除重建三维结构中因采样问题产生的孔洞^[5]。基于体素方法存在两方面的问题,首先,它针对的是点云数据,不能直接应用于 Mesh 模型;其次它是一种物理方法,通常只能修复重建物体表面的小孔洞,并容易带来几何形变。几何法修补方法能够保留原始图形的细微特征,包括 Blanz 等人^[6]使用的模版匹配方法,它依靠对预定义物体的变形实现补缺,但对未知的缺损形态无能为力。Ramamoorthi 等人^[7]利用参数化样条曲面,拟合从扫描数据中恢复的曲面消除孔洞, Peter^[8]将 Mesh 孔洞的修补分为 3 个阶段,分别利用改进的孔洞三角化算法、网格细化和平滑算法,实现 Mesh 表面的孔洞修补过程。以上两种方法均只能解决 Mesh 表面的缺失重建,并不能识别和处理具有厚度的封闭的 Mesh 三维孔洞。

解决颅骨缺损修补问题的传统方法依赖于 UG、Solidwork 等 CAD 系统,通过手工重构孔洞部分,这些工具缺少面向特定领域的操作方法,交互步骤复杂,需要专业人员参与,制作周期长,严重影响临床治疗的成功率。在 Mimic^[9]系统和文献^[10]中,先后提出针对对称缺损的镜像修复方法,分别采用几何镜像方法和二维图像的镜像后再加以重建的修复方法,但不能满足诸如颅顶创伤等非对称缺损修复的要求。

针对以上问题,本文提出一种新的几何修复方法,以包含缺损结构的三维重建 Mesh 模型为操作对象,根据交互输入的引导点,通过三角面片的边特征及目标点位置搜索并向外扩展出孔洞上边界环,得到目标问题区域边界,其中内环为孔洞边界,此区域内的所有三角面片为目标问题区域;通过双环采样,投影构建代理面,结合代理面对内环的三角化细化,三角面进行基于代理曲线的 Freeform 变形,然后在微分域进行保持边缘细节特征的平滑操作,得到缺失实体孔洞的上缝合面;通过向颅骨厚度方向扩展,得到孔洞下边界轮廓,并搜索出上下边界环之间的三角网格区域;通过上缝合面的构建方法,得到缺失实体孔洞的下缝合面;最后,连接上下缝合面以及两个边界轮廓环之间的三角网格区域,获取修复实体。

1 问题描述

孔洞修复算法处理的对象为基于 CT 图像重建的三维封闭三角网格模型,如 STL (Stereo Lithography) 格式的三角 Mesh 模型。缺损孔洞修复过程由 3 个子问题组成:

1) 孔洞边界搜索,这是基于引导点的特征匹配问题,然后通过扩展边界得到代理曲面作为问题的定义空间。

2) 对缺陷模型中的孔洞修补,使填充模型与缺陷模型(图 1)在边缘完好吻合。填充后实体模型表面曲率差分和实现最小化,以保证填充模型和周围表面平滑过度,可表示为曲线优化和曲面优化问题:

$$\arg \min \left\{ \sum_{i \in C} \| D(v_i) - R_i \delta_i \|^2 + \sum_{i \in C} \| R_i - R_i \|^2 \right\},$$

其中: C 为缺失实体指模型上丢失的部分;

$D(\cdot)$ 为差分算子;

v_i 为曲线控制节点;

R_i 为局部曲线线段的旋转量;

δ_i 为旋转量的差分坐标^[11]。

上式以代理曲面作为边界条件,通过最小化局部曲线线段间的坐标差分与旋转量差分的变化,重建平滑的代理曲线。

3) 基于曲线的曲面生成与优化,包括基于曲线的三角化、曲面优化过程和曲面缝合过程。



图 1 不同观察角度的缺陷模型示意图

Figure 1 The defects model observed from different perspectives

2 缺损重建算法

算法流程从初始引导点的输入开始,经过各个步骤后,得到的上缝合面、下缝合面和边界环间区域,对此 3 个面进行缝合,即可得到缺失实体的填充实体。其中设计三角剖分及细化操作的部分包括构造上、下面轮廓环,共 2 个;环间区域识别包括:上表面轮廓环和其扩展环、下表面轮廓环和其扩展环,以及上下表面轮廓环之间的区域识别,共 3 个;代理曲面构建包括针对两对轮廓环,共 2 个。此 3 个过程可同时在边界轮廓扩展之后并行进行。

2.1 边界环搜索及环扩展

2.1.1 边界环搜索

设 $GPS = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, GPS 为初始导引点集合, n 为初始引导点个数。根据三角片边的特征^[6]以及导向点的位置进行搜索,算法根据以下规则进行:从某个导引点出发的一条边如果满足以下 3 个条件:1) 该边的方向与导向矢量最为符合;2) 该边的 2 个相邻

三角面片的方向量夹角最小; 3) 边长最短。那么, 该边即为轮廓环上的一条边。其中, 这3条规则的优先级依次降低(如图2)。

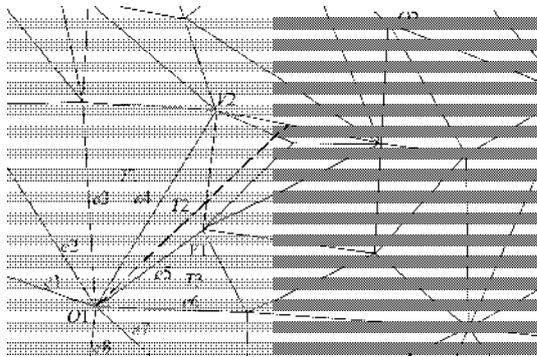


图2 边界搜索示意图

Figure 2 Boundary searching path

搜索算法的目的是搜索出导引点 $G_1G_2, G_2G_3, \dots, G_nG_1$ 之间的所有边, 使之连成一个环, 即得到边界环 BC 。边界搜索算法(Boundary Search)过程如下:

For($i = 0; i < n; i++$) {

 令 $begin = G_i, end = G(i+1) \% n$;

 a) 如果 $begin \neq end$, 计算导向向量 $N = Vecotr(begin, end)$; 否则算法结束退出;

 b) 计算从 $begin$ 出发的所有边, 求出符合算法规则的边 G_iD ; 记录搜索点 $D \rightarrow$ 边界点集合 BC ; 令 $begin = D$, 返回 a);

}

2.1.2 环扩展

设环扩展的目的是根据搜索到的孔洞上面边界环向外扩展得到扩展环, 向内扩展, 得到孔洞下面边界环, 进而对下面扩展环继续向内扩展, 得到下面扩展环。本文基于 Level Set 思想进行轮廓环的扩展, 二维空间上其基本思想是将平面闭合曲线隐含地表达为二维曲面函数的水平集, 即具有相同函数值的点集, 通过 Level Set 函数曲面的进化, 隐含地求解曲线的运动。扩展到三维, 通过定义三维空间上点和时间的平滑函数 ϕ , 类似于文献[7], Level Set 函数的演化满足如下的基本方程:

$$\phi(x, y, z, t) = 0. \quad (1)$$

假设边界环上各点运动速度为 F , 限定曲面各点运动方向为沿曲线法线方向, 则曲面演化可表示如下:

$$\phi_t - F|\nabla\phi| = 0, \quad (2)$$

实际应用中, 一般取 $t = 0$ 时, (x, y, z) 到曲面的距离为 d :

$$\phi(x, y, z, t = 0) = \pm d. \quad (3)$$

针对本文轮廓搜索及扩展的特点, 对曲面演化进行简化, 以适应轮廓扩展: 限定轮廓线为在模型表面

的演化, 即沿模型表面轮廓线的梯度方向进行演化推进, 水平集函数定义为与本次扩展的平均距离差值, 取值根据实际模型精度定义, 时间步长定义为模型顶点的一次 1-Ring 访问。

由此, 算法根据搜索得到的孔洞上面有向封闭边界环 $BC = \{D_1, D_2, \dots, D_{n_{bc}}\}$, 对其中的每个点进行向外扩展来得到扩展点, 扩展方向为过被扩展点的相邻面且与扩展点切氏垂直方向(图3)。

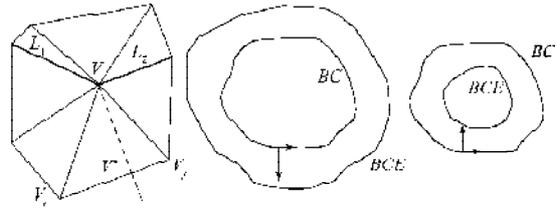


图3 环间区域识别: 环间区域及单点搜索到的三角片

Figure 3 Boundary expanding path

环扩展算法(RinExpand)过程如下:

a) 设定迭代次数 iteration, 指定扩展精度 d ;

b) while (iteration--) {

 for ($i = 0; i < n_{bc}; i++$) {

 b1) 求切矢 $N = Vector(D_i D_{i+1} \% n)$;

 b2) 对点 D_i 遍历其相邻点, 求与 D_i 构成的且向外/内与 N 垂直的边的另一端点; 若没有则求出与 N 方向最为垂直的2个点, 插值计算该点; 将求得点 O_i 存入临时集合 tmpSet 中;

 }

b3) 求平均扩展边长: $ad = \frac{\sum_{i=0}^{n_{bc}-1} |D_i O_i|}{n_{bc}}$,

 for ($k=0; k < n_{bc}; k++$) {

 if ($|D_k O_k - ad| < d$), 则存储该点并根据该点进行拓扑结构更新;

 else 扩展点为上次扩展结果。

 }

}

c) 根据点的扩展结果进行边界环搜索, 连接扩展后的点, 获取扩展封闭环。

图3为环扩展示意图, 其中左图中的 L_1, L_2 是边界环上的边, V' 是扩展结果, 为 V_i, V_j 的插值; 中图为向外扩展示意图; 右图为向内扩展示意图。 BC 为被扩展环, BCE 为扩展后。设环逆时针为正向, 则实现时向外扩展即垂直方向在切矢右侧, 向内扩展在左侧。为实现方便, 在向内扩展时只需将轮廓环集合内的点首尾逆序即可。

2.2 三角剖分及细化

针对上下面边界环进行三角剖分及细化, 为保持剖分后获取的平面具有不变的边界, 则剖分得到的三

角片必须在沿轮廓正方向（顺时针）的左手方向，否则将会在轮廓区域外部形成三角片。本文采用文献[8]的剖分方法，其引入了新的权值计算方法，以解决开垛口的问题，即权值 $\Omega \text{ angle}(v_i, v_m, v_k) = (\mu(v_i, v_m, v_k), \Omega \text{ area}(v_i, v_m, v_k))$ ，其中 μ 用以计算三角形 $v_i v_m v_k$ 与其周围存在的相邻三角片之间的最大二面角， Ω 仍是三角形的面积，其中 μ 优先于 Ω 。例如，若 μ 小于 Ω ，则对应的权值比较为小于，若 μ 等于 Ω ，则再根据 Ω 大小进行判断。这实际上即处理三角剖分的内部约束问题，采用二面角能够保证三角划分时形成的三角片落入轮廓区域内。经过剖分之后对剖分的三角片进行细分，以进行下一步的平滑处理。同样，为保证边界的不变性，本文采用简单易实现的面裂变方式，即对于一个三角片取其质心，形成新的三角片，经若干次迭代以达到足够数量的点。

2.3 环间区域识别

识别算法将针对给定 2 个环 R_1 和 R_2 即由边组成的有向封闭环之间的全部三角片。将平面复连通区域的定义向三维曲面上进行扩展，有如下环间区域定义：在一个三维曲面上，若区域 R 内任一闭曲线所围区域仍属于 R ，则称 R 为单连通区域，否则 R 为复连通区域。

设 R_1 为内环， R_2 为外环，逆时针方向为环的方向，则环之间的区域在沿 R_1 正向时右手侧，且在沿 R_2 正向时左手侧的区域。针对 R_1 内的各点，搜索紧邻 R_1 右侧三角片，针对 R_2 内的各点，搜索紧邻 R_2 左侧三角片，然后根据新加入的三角片的边，搜索其它剩余三角片（见图 4）。

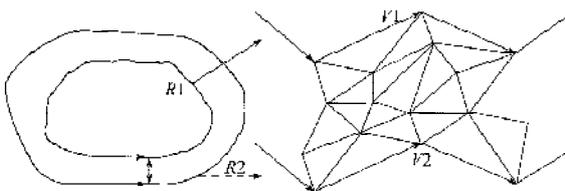


图 4 环扩展示意图

Figure 4 Region recognition between two rings

环间区域识别算法 RinTrisSearch 如下：

a) 对 R_1 中所有点 $RP1i$ ，前向边 $ep1 = \text{edge}(RP1i-1, RP1i)$ ，后向边 $en1 = \text{edge}(RP1i, RP1i+1)$ ；从 $ep1$ 开始逆序搜索到 $en1$ 结束之间的三角片，存入三角面片集合 $Tris$ 中；

b) 对 R_2 中所有点 $RP2i$ ，前向边 $ep2 = \text{edge}(RP2i-1, RP2i)$ ，后向边 $en2 = \text{edge}(RP2i, RP2i+1)$ ；从 $ep2$ 开始逆序搜索到 $en2$ 结束之间的三角片，存入集合 $Tris$ 中；

c) 对集合 $Tris$ 中的三角片进行遍历，找出不包含在 R_1 及 R_2 内的边所在的三角片，直到集合 $Tris$ 中的三角片个数不再变化。

2.4 曲面变形及平滑

文献[8]采用反复平滑细分曲面得到最后的修复面，然而在本文解决的问题中，平滑操作不能从上一部直接进行，这是由于第一步得到的并非目标拟合修复曲面。因而采用构造拟合面，然后平滑的方法。基于曲面的 Freeform 变形方法，通过定义映射函数将待变形曲面进行映射到目标曲面。这种方法的缺点是变形过程中不能很好地保存曲面的细节特征。常用解决方法有两种，分别是基于多分辨率的变形方法和基于微分域的变形。前者通过把曲面分解为不同频率的部分，额外保存高频率的曲面细节特征；而后者在保持曲面细节特征的同时，可以避免显式的分解。但对于缺损表面重建问题，采用这两种方式成本高，而且已无细节保持的必要。对于孔洞边缘和拟合曲面的连接部分，可直接采用引入边界约束的 Taubin 平滑算法。

2.4.1 基于代理曲面 Freeform 变形

传统的 Freeform 方法需要大量介入用户的交互操作，效率低，一般的表示形式如下^[3]：

$$S' = \{p + d(p) \mid p \in S\}, \quad (4)$$

$$d(p_i) = d_i, \forall p_i \in C, \quad (5)$$

其中： S' 为结果曲面；

p 为曲面 S 上的点；

$d(p)$ 为点的位移；

C 为约束点，代表 S 中需要变形的点。

本文在前面算法的基础上进行自动的基于曲线的 Freeform 曲面变形，不需要进行人工干预，基于搜索构建代理曲线的 Freeform 变形：

$$S' = \{r(p_i, c_i) \mid p_i \in S, c_i \in M\}, \quad (6)$$

其中： S' 为结果曲面； S 为待处理曲面；

M 为代理曲面； p_i 为 S 上的点；

c_i 为 M 上的点； r 为期望变形函数。

M, r 构造如下：

1) 代理面构造

设环 R_1 的扩展环为 R_2 ，则首先在 R_1 上采样，采样点的个数 $N1 = \text{length}(R1) / d$ ，其中 $\text{length}(R1)$ 得到环 $R1$ 的周长， d 为采样间隔。检测 $N1$ ，若不是偶数，需将 $N1$ 减去 1。设采样点集合为 $RS1$ ，然后在 $R1$ 上取等间隔的 3 点，以构造平面 F ，用来作为映射点基础参考面。

之后，将 $RS1$ 以及 $R2$ 中的点投影到平面 F 上，得到集合 $RS1'$ 和 $R2'$ ，对 $RS1'$ 中的 2 点，有直线 L ，求直线 L 与 $R2'$ 的交点，得到另外 2 个点，则此 4 个点组成一组控制点，构造一条三次曲线。这里采用样条曲线，类似 Cardinal 曲线的边界，取 Hermite 插值的 2 个端点斜率如下：

$$P(0) = p_k; \quad (7)$$

$$P(1) = p_{k+1}; \quad (8)$$

$$P'(0) = s(p_k - p_{k-1}); \quad (9)$$

$$P'(1) = s(p_{k+2} - p_{k+1}). \quad (10)$$

其中: p_{k-1} 、 p_k 、 p_{k+1} 、 p_{k+2} 为 4 个控制点;

$P'(0)$ 、 $P'(1)$ 分别表示第二、第三控制点处的斜率, 以此在轮廓环上进行曲率的模拟;

s 为张量参数。

这里将 $(1-t)/2$ 表示为单独变量 s , 有利于参数调节和初始高度设置, 插值曲线最高点到第二、第三控制点直线的距离取 4 控制点映射到前 3 控制点形成平面后组成三角形的重心到底边的距离, 据此, 取 $u = 0.5$ 时, 由 Hermite 混合函数表达式反算出 s 如下:

$$s = \frac{8Hr}{Pr_k + Pr_{k-1} - Pr_{k-1} - Pr_{k+2}}, \quad (11)$$

其中: Hr 为重心到底线距离;

Pr 为 P 在前 3 点平面上的投影点。

计算时, 取对应项沿 x 、 y 、 z 方向增量的平方和的平方根, 以此对颅骨顶部及后部中间曲率规律的缺损部位进行修复重建, 其它部位的修复可由式 (11) 计算后, 根据实际效果对 s 值进行修正, 得到满足要求的重建结果。

同样, 对 $RS1'$ 中其它点对组成的直线与 $R2'$ 求交点, 最终得到一系列控制点。由这些控制点序列, 生成较为稀疏的曲面, 即代理曲面 M 。需要注意的是, $RS1'$ 以及 $R2'$ 中的点是投影到平面 F 上的, 在获取控制点时需要记录映射前的相应点, 见图 5。

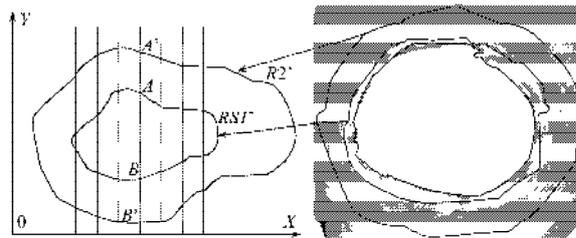


图 5 控制点获取

Figure 5 Control points access

图 5 中, 左图: A' 和 B' 为直线 AB 与 $R2'$ 的交点, 控制点为 $A'ABB'$; 右图: 搜索, 即扩展的轮廓环。

2) 期望变形函数构造

仍以上一步中基准平面 F 为参考平面, 将表示补缺面以及代理曲面的三角片投影到平面 F 上, 然后根据投影后代理曲面中的三角片的点和补缺面三角片的点在 F 中的位置关系来进行点的映射。

关系 r 构建如下: S 在 F 上的投影点 P_i' 在投影集合 S_F 中进行搜索, 若有对应点, 则将目标点对应的映射前坐标赋予 P_i , 否则点落在三角片内或三角片边上, 求出从 P_i' 出发垂直于平面 F 的直线与落入三角片或边的交点, 将该交点赋予 P_i 作为映射坐标值, 如图 6 所示, 搜索到 $V1'$ 的映射点直接为 $M1$, $V2'$ 的映射点

通过与三角形 ABC 求交点为 $M2$ 。

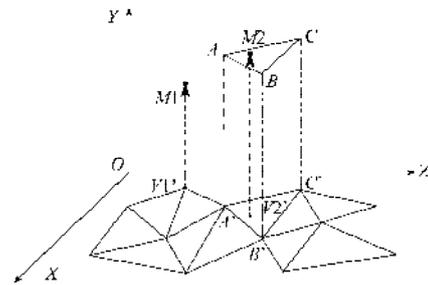


图 6 搜索计算映射点

Figure 6 Point mapping process

2.4.2 曲面平滑

Taubin 的平滑方法^[9-10]表示如下:

$$\Delta P_i = \sum_{j \in i^*} W_{ij} (v_j - v_i), \quad \sum_{j \in i^*} W_{ij} = 1, \quad (12)$$

$$P_i' = (1 + \lambda \Delta)(1 + \mu \Delta) P_i, \quad (13)$$

$$K_{PB} = 1/\lambda + 1/\mu. \quad (14)$$

其中: W_{ij} 是权重;

i^* 是点 v_i 的相邻点集合;

P' 是平滑后的点;

P 是平滑前的点;

λ 是 0~1 之间的权重;

μ 负收缩因子, 且 $\mu < -\lambda$;

K_{PB} 是截止频率, 其值在 0.01~0.1 时效果较好^[8]。

为保持缝合面边界形状的同时获得良好的平滑效果, 本文对 Taubin 平滑算法的应用范围进行了改造:

1) 加入平滑范围因素, 对轮廓环及其扩展环之间的区域与缝合面合并后进行平滑; 2) 对边界环上的点加以约束, 以保持边界形状。

假设 S_{RRe} 为边界环 R 及其扩展环 R_e 之间的区域 (通过环间区域搜索算法得到), S_p 为变形后得到的曲面, S_{Taubin} 为平滑算法, 则最终平滑结果 S_p 如下:

$$S_p' = \{S_{Taubin}(S_p \cup S_{RRe}), p_i' = p_i\}, \quad \forall p_i \in C. \quad (15)$$

算法实现时, 可将 S_p 结果单独存储, 从而完成缝合面的构造, S_{RRe} 在平滑操作完成之后将被舍弃。

2.5 填充实体构造

由于细化时遵守边界不变, 所以上下缝合面以及上下轮廓环间面有相同的边界, 则由 3 个面中的三角片信息即可构造一闭合的三角网格实体模型。

3 实验结果

图 7 展示了利用本算法对颅顶缺损模型进行修复中分步提取的重要步骤的中间结果, 其中图 7 a) 为经三维重建后的待修复颅骨模型缺损部位情况; 图 7 b) 为修复后得到的上缝合面; 图 7 c) 为修复后得到的下缝合面; 图 7 d) 为算法搜索提取上下边界环之间的三

角网格区域;图7e)为图7b)、c)、d)缝合结果;图7f)为与缺损颅骨(部分截取)对比显示图。

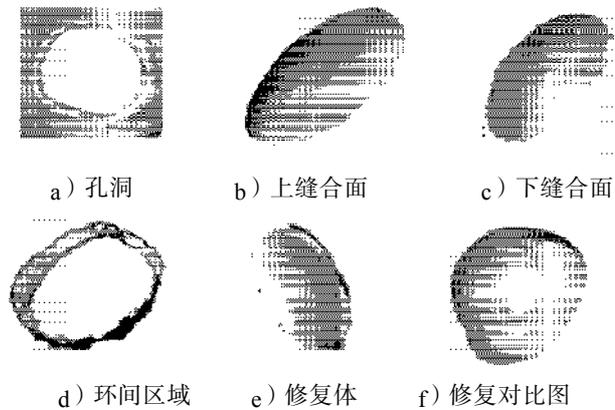


图7 利用本文算法实验结果图示

Figure 7 Experiment result

实验结果符合预期目标,在边缘处获取的上下环间三角网格区域完好地保持了缺损部位和待修复模型的接触面信息,最终缝合后的实体模型和缺损部位完好结合,较好地保持了和周围曲面的曲率一致。

4 结论与展望

本文针对三维封闭三角网格模型的缺失实体孔洞修复问题提出一种新的修复重建缺失实体算法,从交互输入初始导引点出发,自动完成边界环搜索和缺损修补过程。基于曲线代理重建方法能够得到平滑的上下补缺面,通过基于环的搜索得到边界环间区域,最后由3个面缝合得到缺损实体。算法对于颅骨顶部及后部中间部位的修复具有良好的效果,采用曲线代理方法,生成重建区域的平滑效果很大程度上依赖于缺损部位临域的几何特征,但对于曲率变化剧烈的部位,诸如处理靠近耳、面部的缺损,不能获取满意的补缺效果。针对这些问题,下一步的研究将关注于保持边界不变的高质量三角片细化方法,更为合理有效的代理曲面构造方法,以提高处理复杂特征区域的缺损修复问题的能力。

参考文献:

- [1] Laurencin C T, El-Amin S F, Ibim S E, et al. A highly porous 3-dimensional polyphosphazene polymer matrix for skeletal tissue regeneration[J]. J Biomed Mater Res, 1996, 25: 223.
- [2] 方丽茹,翁文剑,沈 鸽,等.骨组织工程支架及生物材料研究[J].生物医学工程杂志,2003,20(1):148-152.
- [3] Hoppe H, Deroose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[C]//In Proceedings of SIGGRAPH '92. [s.l.]: [s.n.], 1992: 71-78.
- [4] Davis J, Marschner S, Garr M, et al. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion[C]//In First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission Padua, Italy: [s.n.], 2002: 428-861.
- [5] Verdera J, Caselles V, Bertalmio M, et al. Inpainting surface holes[C]//In Proceedings of International Conference on Image Processing 2003. [s.l.]: [s.n.], 2003: 14-17.
- [6] Blanz V, Mehl A, Vetter T, et al. A statistical method for robust 3d surface reconstruction from sparse data[C]//In Proceedings of 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. [s.l.]: [s.n.], 2004: 293-300.
- [7] Ramamoorthi R, Arvo J. Creating generative models from range images[C]//In Proceedings of SIGGRAPH '99. Los Angeles: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999: 195-204.
- [8] Peter L. Filling holes in meshes[C]// Proceedings of the 2003 eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on geometry processing. Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2003: 200-206.
- [9] Materialise NV. Mimics Software[EB/OL].[日期不详] <http://www.materialise.com>.
- [10] Liu Hanqiang, Hu Qingxi, Li Limin, et al. A Study of the Method of Reconstructing the Bionic Scaffold for Repairing Defective Bone Based on Tissue Engineering[C]//IFIP TC 5 International Conference, PROLAMAT 2006. Shanghai: Springer Boston, 2006: 650-657.
- [11] Olga S. Differential Representations for Mesh Processing[J]. Computer Graphics Forum, 2006, 25(4): 789-807.

(责任编辑:张亦静)