

保持特征的网格修补

钱归平¹⁾ 潘瑞芳¹⁾ 童若锋²⁾

¹⁾ (浙江传媒学院动画学院, 杭州 310018) ²⁾ (浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要 提出了一种恢复缺失尖锐特征的网格修补算法。首先对网格顶点建立自适应的八叉树, 采用分段二次多项式对网格空洞周围顶点进行拟合。而在尖锐特征处周围, 则采用两个或者多个系数不同的二次多项式函数, 分别进行拟合, 从而获取原始网格所在曲面的尖锐特征边和角。利用扩展的 Marching Cube 方法获得空洞处的三角网格面片, 并和原始网格模型缝合。最后, 对于空洞处的网格面片, 进行增强特征处理, 消除锯齿状网格, 获得清晰的尖锐特征。实验结果表明, 该方法达到了预期的良好效果。

关键词 网格重建 网格修补 曲面拟合

中图分类号: TP 391.7 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)02-0334-06

Feature-preserving Mesh Completion

QIAN Guiping¹⁾, PAN Ruifang¹⁾, TONG Ruofeng²⁾

¹⁾ (College of Animation, Zhejiang University of Media and Communication, Hangzhou 310018)

²⁾ (College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract A feature-preserving mesh completion algorithm is proposed. Firstly, the octree-based subdivision of mesh vertices is created. Piecewise quadratic polynomial functions are used to fit the mesh vertices near the hole. Around the sharp features, two or more quadratic functions with different coefficients are used so as to capture sharp features such as edges or corners. The extended Marching Cube algorithm extracts the triangle mesh patch which is stitched to the hole boundary of the original model to complete the polygon mesh. Finally, a feature enhancement process is applied to eliminate the aliasing artifacts to obtain fine sharp features. The results of experimental tests show that excellent hole repairing mesh can be achieved.

Keywords mesh reconstruction, mesh completion, surface fitting

0 引言

在 3 维扫描体的曲面重建过程中, 网格化是一种重要手段。当物体被各个方向扫描后, 得到多张不完整的离散点云采样曲面, 经过叠加配准后, 形成通常带有缺失数据的数字化点云模型。由于存在缺

失数据, 容易导致重建后的网格无法形成封闭模型, 或者空洞处网格失去物体原本特征。

这些空洞不仅使得模型无法正确实现可视化, 也会影响模型后续处理, 如对实物进行有限元网格分析时, 空洞的出现会导致分析不准确; 在 3 维 CAD 造型中, CAD 模型通常存在着尖锐特征边和角。对这些尖锐特征处数据的缺少, 其修补尤其显

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10901147); 国家科技支撑计划项目 (2007BAH11B04); 浙江省教育厅项目 (200907390)

收稿日期: 2008-09-04 改回日期: 2009-01-04

第一作者简介: 钱归平 (1975—), 男。2008 年于浙江大学获计算机科学与技术博士学位。主要研究方向为计算机图形学, CAD。

Email: qianguiping@163.com

得关键重要。网格空洞修补的方法有多种, 主要分成两大类:

1) 空洞处网格曲面光滑过渡, 这是较为简单直接的修补方法。Davis 等人利用体数据场扩散修补空洞^[1], 使用 Marching Cube 算法显示整个网格模型。Liepa 对空洞多边形的边界直接用三角片进行相连^[2], 然后采用细分和网格光顺的方法, 使得空洞网格和周围边界网格区域实现光滑连接。这两种方法都改变了原来完好部分的网格分布及形状。国内如杜佶, 王宏涛等人使用基于径向基函数 (RBF) 的修补方法^[3-4], 其主要的一个缺点就是仅仅实现了网格模型的封闭和连接, 没有考虑到空洞与周围区域的形状特征过渡保持一致, 对于缺失的特征无法有效恢复。

2) 恢复缺失特征的网格修补。Sharf 等人寻找空洞邻域周围的曲面进行特征匹配^[5], 寻找最相似的区域进行粘连。其主要缺点就是计算量大, 而且不相关的特征往往会被用来填补空洞。Chen 等人使用径向基函数逼近缺失网格数据产生三角形^[6], 并对尖锐特征处区域进行增强特征处理。由于径向基函数提取的隐式曲面为全局光滑连续, 即使进行法向的迭代处理, 仍然很难正确恢复边角特征。

针对这种情况, 本文提出了保持尖锐特征的网格空洞修补方法, 能够对缺失的边和角等尖锐特征实现正确提取。首先对带空洞的模型网格顶点, 创建自适应的八叉树细分。利用分段二次多项式函数局部光滑可微的特性, 采用分段二次多项式对网格空洞周围顶点进行拟合, 获取原始网格所在曲面的尖锐特征边和角, 而不像径向基函数方法^[7]、快速傅里叶变换方法^[8]和支持向量机方法^[9]在空洞处产生光滑过渡的曲面。随后利用扩展的 Marching Cube 方法获得空洞处的三角网格面片, 并和原始网格模型进行缝合。最后, 对于空洞处的网格面片, 进行增强特征处理, 消除锯齿状网格, 获得清晰的尖锐特征。接下来, 将对几种主要的曲面拟合方法做一比较。

1 隐式曲面拟合方法

在进行网格空洞填补前, 需要利用隐函数对空洞周围的网格顶点进行插值或逼近, 从而获取空洞处网格片, 并进行修补。拟合散乱点的隐函数方法有多种, 为了更好提取尖锐特征, 本文采用分段二次

多项式隐式曲面方法。以图 1(a)带空洞网格为例, 分析比较 RBF、FFT (fast fourier transform) 和分段二次多项式这 3 种拟合方法。

RBF 方法, 即径向基函数方法。图 1(b)是对带空洞的 Fandisk 点云模型, 使用多层紧支撑径向基函数^[7]进行曲面网格重建的例子。

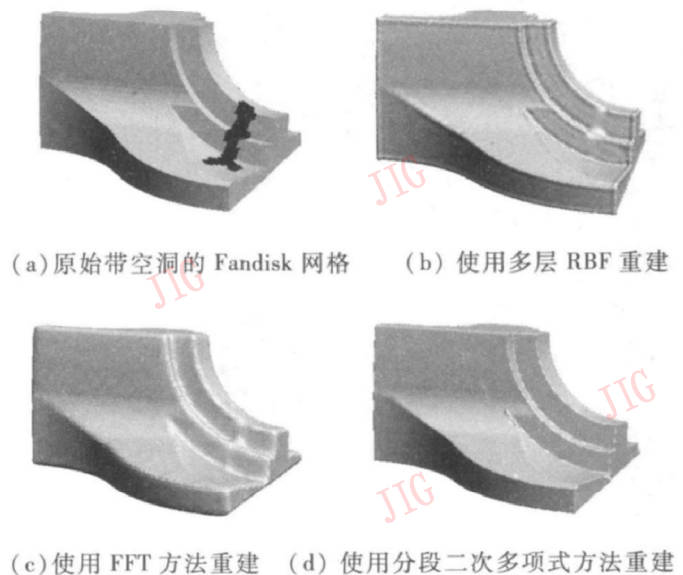


图 1 带空洞的点云网格重建比较

Fig. 1 Mesh reconstruction comparison of point cloud with hole

FFT 方法^[8], Kazhdan 首先利用快速傅里叶变换对空间散乱点进行曲面重建, 取得了良好的效果。图 1(c)是对带空洞的 Fandisk 点云模型, 使用基于快速傅里叶变换的网格重建的例子。

分段二次多项式方法, 该方法最具代表的算法为 Ohtake 等人的多层单位分解隐式曲面方法 (multilevel partition of unity, MPU)^[10], 图 1(d)是对带空洞的 Fandisk 点云模型, 使用分段二次多项式方法进行曲面重建的例子。

从图 1 中各种不同的点云拟合方法比较, 可以看出 RBF 和 FFT 这两类方法, 对于网格顶点进行曲面重建时, 空洞处为光滑连续过渡, 尖锐特征完全缺失, 如果从该处获取三角形面片填补网格空洞, 很难恢复缺失的特征。而使用分段二次多项式方法, 空洞处的尖锐特征则被良好获取。接下来, 将对分段二次多项式隐式曲面重建方法进行分析, 并使之能够应用于本文的网格空洞填补算法。

2 分段二次多项式拟合算法

由于分段二次多项式能够对点云进行自适应的

逼近, 在设定的某个误差容许范围内, 使用二次多项式函数尽可能逼近每个局部的点云区域, 再将这些逼近分片粘合, 从而形成函数的全局逼近。

为了描述方便, 本文假设网格中只存在一个空洞, 标记网格顶点为 $\{p_i\}_{i=1}^N$, 该空洞的边界顶点构成边界环绕 Γ 。以空洞界为中心周围不断向外扩展, 采集其相邻周围邻域的几层三角片的顶点作为逼近约束点, 如果不严格考虑算法效率, 则可以将整个网格顶点进行逼近。

2.1 分段二次多项式隐函数

对顶点 $\{p_i\}_{i=1}^N$ 建立正方体包围盒和 KD (K-Dimensional) 树, 并和全局坐标系轴对齐, 参考 Ohtake 的 MPU 方法^[10], 对正方体包围盒应用自适应的八叉树细分。在细分过程中, 每个小立方体单元的中心标记为 c , 主对角线长度为 L 。在细分过程中, 采用如下类似高斯的权函数:

$$G_R(\delta) = \begin{cases} \exp(-4(\delta/R)^2) & \delta \leq R \\ 0 & \delta > R \end{cases} \quad (1)$$

其中包围球的半径为 R , 球心为 c , 球内的点集标记为 P' 。在细分过程中, 一个二次多项式函数 $f(u, v, w)$ 逼近小单元内的局部邻域点云, 如图 2 所示。如果单元内没有顶点, 则不需要细分。半径 R 的初始值设定为 $R = 0.75L$ 。如果单元附属的包围球内点的数目少于 12 个, 则适当增加球半径 R 直到包含的顶点不少于 12 个为止。

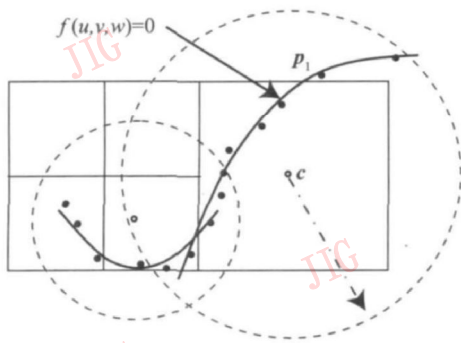


图 2 自适应最小二乘逼近 (2 维)

Fig 2 Adaptive least squares approximation (2D)

该二次多项式函数 $f(u, v, w)$ 表示为

$$f(u, v, w) = w - (Au^2 + 2Buv + Cv^2 + Du + Ev + F) \quad (2)$$

式中, 局部坐标系 (u, v, w) 以点 c 为原点, w 和包围球内所有点的平均法向 \bar{n} 重合。其中的 6 个系数 A, B, C, D, E, F 则通过最小化如下公式求得:

$$\sum_i [G_R(p_i - c)f(p_i)]^2 \quad (3)$$

然后根据 Taubin 距离^[11] 计算包围球内顶点和的最大逼近误差:

$$\varepsilon = \frac{\max |f(p_i)|}{|\nabla f(p_i)|} \quad (4)$$

式中, $\nabla f(p_i)$ 是 $f(p_i)$ 的梯度。

设定误差阈值 ε_0 , 如果给定的二次多项式逼近产生的误差 $\varepsilon > \varepsilon_0$, 则对小单元进行进一步细分, 见图 2 中左边被细分的小立方体。

当原始网格中存在明显的尖锐特征时, 用 Kobbelt^[12] 扩展 Marching Cube 方法, 进行处理使得隐式曲面网格化能够提取尖锐特征, 本文也采用这种方法。在进行二次多项式拟合前, 先考虑包围球内点云的法向关系, 如果判断存在特征边, 则该包围球内点云使用两个系数不同的二次多项式函数, 如果存在角, 则采用三个系数不同的二次多项式函数分别拟合相关点云。

2.2 空洞曲面网格化

逼近点云的分段二次多项式函数进行分片粘合, 从而构成一张隐式曲面。扩展 Marching Cube 算法^[12] 在计算网格点时, 利用网格顶点和法向估计尖锐特征边缘, 产生新的网格顶点, 但是, 从图 3 的例子看到, 估计出来的网格尖锐特征顶点, 并不能形成一条连贯的特征边。对一个存在明显尖锐特征边的网格模型, 边周围的两部分的网格法向通常趋于一致。因此, 可以通过迭代调整尖锐特征周围的法向使得顶点移动, 从而获得显著的尖锐特征边缘。

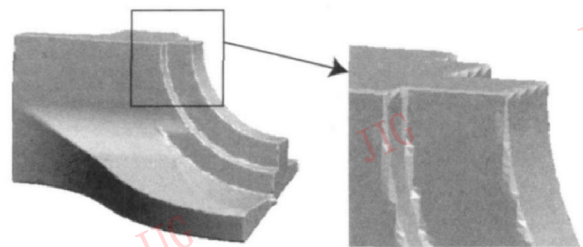


图 3 Kobbelt 的方法并不完美

Fig 3 Kobbelt's method is not ideal

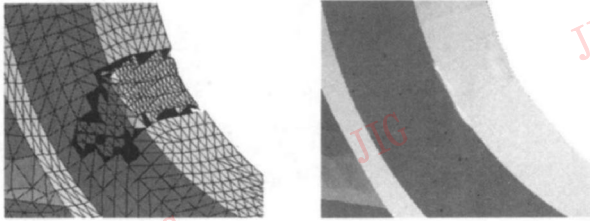
3 网格特征提取

经过分段多项式逼近获得空洞处的网格面片, 标记为 Λ , 但是该网格面片无法直接用来填补原始

网格模型, 必须通过裁剪、缝合和特征增强使得 Λ 和原始带空洞网格缝合自然。

3.1 网格面片裁剪

首先搜索两部分的网格, 获取原始网格模型 T 的边界 Γ 和裁剪网格面片的边界。由于被裁剪网格面片 Λ 不一定在原始网格模型所在曲面上, 但是距离一定非常接近。基于这一点, 沿着边界 Γ 构造出一个划分平面来切割裁剪网格面片。



(a) 切割得到网格片 (b) 缝合后增强尖锐特征

图 4 网格空洞修补

Fig 4 Mesh hole repairing

网格面片 Λ 的两个部分 Λ_1 和 Λ_2 , 其中只有一个适合用来填补空洞。通过判断选择其中一个, 比如 Λ_1 , 图 4(a) 是拟合得到的网格面片被切割后用来修补的示例。

3.2 网格面片缝合

考虑边界环绕 Γ , 其顶点为 p_1, p_2, \dots, p_i , 裁剪后的网格面片 Λ_1 , 其外边界顶点为 $p_n, p_{n+1}, \dots, p_{n+j}$, 这些边界顶点需要进行连接并构造三角形。如图 5 所示, 从第 1 条边 $p_1 p_2$ 开始, 搜寻整个边界顶点, 按照既定的规则, 选择最合适的顶点构造三角形。

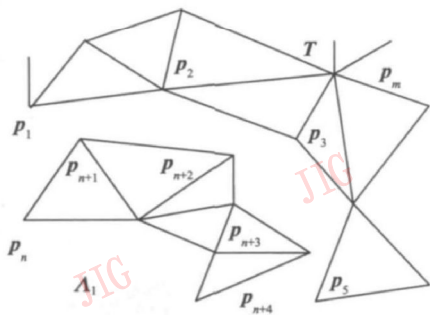


图 5 网格缝合边界

Fig 5 Boundary of mesh stitching

确定最合适的顶点。假如对某条边 $p_i p_j$, 寻找新的边界顶点 p_n , 通过如下公式确定其最佳

$$\arg \min_{p_n} [(\text{ctg} \alpha_n) \cdot (\|p_i p_j\| + \|p_j p_n\| + \|p_n p_i\|)] \quad (5)$$

式中, α_n 是 $p_i p_n$ 和 $p_n p_j$ 的夹角。该公式在确定一

个新的三角形顶点时, 类似于度量扭曲最小化标准^[13]方法。在本文中, 度量扭曲指三角形的纵横比以及网格的边长。这里最佳顶点的选择标准, 被看作是对 Delaunay 优化准则的一种逼近。在构造过程中, 满足式 (5) 的同时, 新构造的三角形必须检测是否和网格模型中已有的三角形存在交叉, 如果交叉, 则放弃该点, 进行重新选择。如图 4(b) 是缝合后的 Fandisk 网格图。

3.3 尖锐特征增强

本文所指网格尖锐特征增强, 本质上是一种网格滤波方法。在缝合后的网格中, 裁剪后的网格 Λ_1 加上用于缝合的新增三角形, 重新标记为 T' 。接下来主要针对 T' 处理就可以了。

T' 中每个三角形记为 T_k , 其法向为 n_k 。计算每个三角形 T_k 的重心为 C_k , T_k 的邻域三角形集合为 N_k , 指除 T_k 外, 该三角形 T_k 的三个顶点的 1 环邻域所组合而成的所有三角形。通过一个类似均值滤波的迭代方法, 获得尖锐特征的增强:

1) T_k 的迭代初始法向设定为 $n_k^0 = n_k$, 重心 $C_k^0 = C_k$, 邻域三角形 N_k 中的每个三角形初始法向设定为 $n_i^0 = n_i$ 。

2) 比较 n_k^m 和邻域三角形中的每个三角形法向 n_i^m , 如果 $\|n_k^m \cdot n_i^m\| \geq 0.8$ 则权值 $w_{ki}^m = \exp(\|n_k^m \cdot n_i^m\|^2)$, 如 $\|n_k^m \cdot n_i^m\| < 0.8$ 则 $w_{ki}^m = 1 - \exp(-\|n_k^m \cdot n_i^m\|^2)$ 。对于和三角形 T_k 法向偏离小的三角形, 赋予较高的权值, 而法向偏离大的三角形, 权值就很小, 几乎为 0。

3) 升级 T_k 中的每个顶点 p_k ,

$$p_k^{m+1} = p_k^m + \frac{1}{\sum_i w_{ki}^m} \sum_i w_{ki}^m (p_k^m - p_i^m) n_i^m \quad (6)$$

4) 升级重心 C_k^m 和新法向 n_k^{m+1} , 通过对邻近三角形法向 n_i^m 的权值平均获得

$$n_k^{m+1} = \frac{1}{\sum_i w_{ki}^m} \sum_i w_{ki}^m n_i^m \quad (7)$$

5) 如果 $\|p_k^{m+1} - p_k^m\| < 10^{-5} L$ (L 是整个网格的包围盒对角线长), 停止迭代, 否则返回至第 2 步, 重新迭代。

实验中, 第 2 步的法向权值 w_{ki} 特别重要, w_{ki} 使得三角形法向调整时, 尽量和周围法向偏差小的法向逼近, 忽略法向偏差大的三角形。

4 实验分析与比较

整个网格空洞修补算法使用 Visual C++ 实现,

在带有 512M 内存的 Pentium4 2.8 PC 机, Windows XP 操作系统上运行。

表 1 是使用本文的算法对不同空洞网格模型进行修补所统计的数据, 其中新增三角形是修补后的模型三角形总数减去原始模型三角形数量, 计算时间是指从原始网格读入内存显示完开始, 到修补结束所耗费的时间。表中原始网格模型 Fandisk ①, Fandisk ②, Fandisk ③ 分别指图 1(a), 图 6(d), 图 7(a) 中所示 Fandisk 空洞模型。Cube 模型指图 7(d) 所示模型。Torus ① 为图 6(a) 空洞网格模型。

表 1 网格修补数据统计
Tab 1 Data statistics of mesh completion

原始网格	三角形数	新增三角形 (K)	逼近误差	计算时间 /s
Fandisk ①	12 769	531	0.005	13.8
Fandisk ②	1 277	446	0.005	12.5
Fandisk ③	1 287	312	0.005	12.2
Cube	4 645	1 650	0.005	5.2
Torus ①	3 067	1 288	0.005	17.3
Torus ②	3 147	337	0.005	19.7

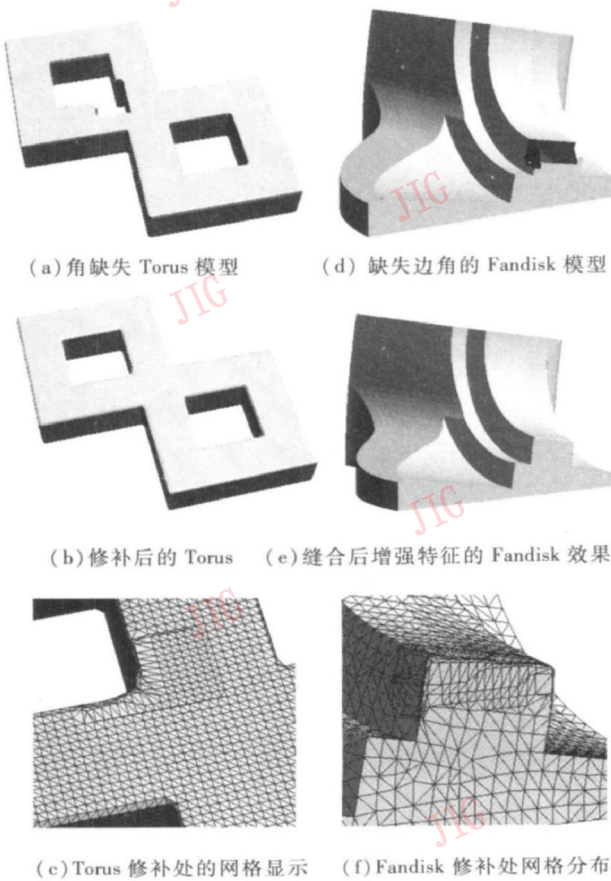


图 6 Torus, Fandisk 模型缺失边角的修补

Fig. 6 Repair the deficient Torus and Fandisk model

图 4 图 6 是使用本文的算法修补网格缺失边角的效果图。在图 6 中, 不论 Torus 模型还是 Fandisk 模型, 边角特征部分的缺失, 得到相当好的修补。图 6(c)、图 6(f) 显示了修补后的三角形和原始网格模型拓扑结构连接, 新增加的三角形和原始网格三角形缝合后过渡自然, 融合效果良好。

图 7(c)、图 7(f) 显示和 Chen 等人的空洞网格缺失尖锐特征修补方法的比较^[6], 其中图 7(a)、图 7(b)、图 7(d)、图 7(e) 4 网格模型由 Chen 提供。对同样的空洞网格模型, 恢复其尖锐特征, 本文的算法显示更好的效果。由于 Chen 对原始网格模型点云采用全局光滑的径向基函数插值, 从而无法正确寻找尖锐角点, 导致无法有效恢复缺失特征, 这可以从图 7(b) 和图 7(e) 看出。两条虚线交界点处应为尖锐角点, Chen 的方法无法实现虚线交界点和尖锐角点的重合, 而本文的算法很好地弥补了该缺点。

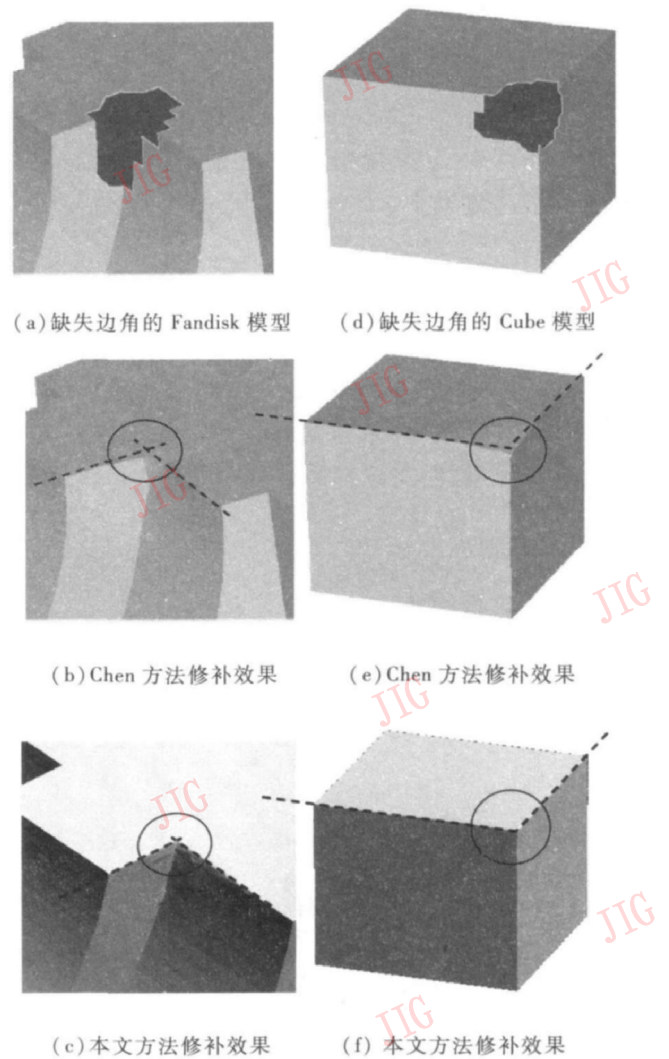


图 7 和 Chen 方法^[6] 的比较

Fig. 7 Comparison with Chen's method^[6]

5 结 论

本文提出了保持尖锐特征的网格空洞修补方法, 能够生成封闭的网格模型, 对缺失的边和角等尖锐特征实现正确提取, 而且融合效果相当好。对空洞周围的三角网格, 建立自适应的八叉树细分, 使用分段的二次多项式隐式曲面来拟合局部网格顶点。提取空洞处的网格后, 使用 KD 树结合区域增长式方法, 将新的网格块和原始不完整网格缝合。对于新的网格块及周围区域, 进行增强特征的网格滤波处理, 使得修补后的网格能够和周围区域连接自然。

由于空间扫描点云容易存在缺失数据, 导致重建后网格失去物体原本特征, 如何更好地修补网格是一个不断值得研究的课题。在未来的研究中, 将进一步考虑利用网格空洞处周围的分布特征和上下文关系, 来修补其细节特征的缺失。

参考文献 (References)

- [1] Davis J, Marschner S R, Garr M, et al. Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion [C] // Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Padua Italy 2002 428-438 [s. n.] <http://graphics.stanford.edu/papers/holefill-3dpt02/>.
- [2] Liepa P. Filling holes in meshes [A]. In: Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Processing [C], Aachen, Germany: ACM Press, 2003: 200-205.
- [3] Du Ji, Zhang Liryan, Wang Hong-tao, et al. Hole repairing in triangular meshes based on radial basis function [J], Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(9): 1976-1982. [杜佶, 张丽艳, 王宏涛等. 基于径向基函数的三角网格曲面孔洞修补算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1976-1982.]
- [4] Wang Hong-tao, Zhang Liryan, Li Zhong-wen, et al. Repairing holes in triangular meshes based on radial basis function neural network [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(23): 2072-2079. [王宏涛, 张丽艳, 李忠文等. 基于 RBF 神经网络的三角网格曲面孔洞修补 [J]. 中国机械工程, 2005, 16(23): 2072-2079.]
- [5] Sharf A, Alexa M, Cohen-Or D. Context-based surface completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 878-887.
- [6] Chen C Y, Cheng K Y, Liao H Y M. A sharpness dependent approach to 3D polygon mesh hole filling [C] // Proceedings of Eurographics Trinity College, Dublin, Ireland: Blackwell Press, 2005: 13-16.
- [7] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H P. A multi-scale approach to 3D scattered data interpolation with compactly supported basis functions [C] // Proceedings of the Shape Modeling International Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2003: 153-161.
- [8] Kazhdan M. Reconstruction of solid models from oriented point sets [C] // Proceedings of the 3th Eurographics Symposium on Geometry Processing Switzerland: Eurographics Association, Ireland: Avonville, 2005: 73-82.
- [9] Steinke F, Schölkopf B, Blanz V. Support vector machines for 3D shape processing [J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 285-294.
- [10] Ohtake Y, Belyaev A, Alexa M, et al. Multilevel partition of unity implicits [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 463-470.
- [11] Taubin G. Estimation of planar curves, surfaces and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(11): 1115-1138.
- [12] Kobbelt L P, Botsch M, Schwanecke U, et al. Feature sensitive surface extraction from volume data [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH [C], Los Angeles, CA, ACM Press, 2001: 57-66.
- [13] Lin Hongwei, Tai Chiaw-lan, Wang Guo-jin. A mesh reconstruction algorithm driven by an intrinsic property of a point cloud [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(1): 1-9.