

复杂形态孔洞的网格模型修复

袁天然¹ 程筱胜² 孙全平¹

1. 淮阴工学院江苏省先进制造技术重点实验室, 淮安, 223003

2. 南京航空航天大学, 南京, 210016

摘要:为了满足实际工程应用对复杂形态孔洞修复的需要,模拟拉链闭合原理,并基于局部最优化的权值规则和曲面最小能量值特性的 k 阶离散欧拉-拉格朗日方程,提出了一种具有 $C^0 \sim C^2$ 连续的网格模型修复架构。实验结果表明,该孔洞修复架构能有效地对复杂孔洞边界进行 $C^0 \sim C^2$ 连续修复。

关键词:三角网格;孔洞修复;复杂孔洞剖分;孔洞修补

中图分类号:TP391.72;R783.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.12.019

Mesh Model Restoration for Complex Holes

Yuan Tianran¹ Cheng Xiaosheng² Sun Quanping¹

1. Key Lab of Advanced Manufacturing Technology of Jiangsu Province,

Huaiyin Institute of Technology, Huaian, Jiangsu, 223003

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: In order to meet the practical engineering application needs of complex hole restoration, this paper proposed a robust mesh model restoration architecture with $C^0 \sim C^2$ continuity based on zipper closure principle and the k order discrete Euler-Lagrange equation derived from minimizer of the surface energy functional. The final experimental results show that the proposed hole restoration method can deal with complex holes efficiently and correctly.

Key words: triangular mesh; hole restoration; complex hole boundary triangulation; hole repairing

0 引言

随着三维测量技术的发展,三角网格模型逐渐成为最常用的几何模型表示形式,广泛应用于计算机图形学、几何建模等领域。由于被测实体表面复杂、局部形态缺失、测量设备受限制等原因,有时无法直接测量获取模型表面的全部三维数据,从而导致生成的网格模型出现孔洞。带有孔洞的网格模型在很多应用领域会导致不良后果,需要对模型孔洞按满足原始模型自然连续属性的方法进行修复^[1]。很多学者针对三角网格模型的孔洞修复进行了研究,主要分为非几何方

法^[2-5]和几何方法^[6-11]:①非几何方法主要根据模型孔洞边界顶点及 N 环邻域顶点的几何属性,构造描述孔洞对应缺失区域的场函数^[2]或隐式曲面^[3],并采用等值面抽取的方法进行网格化^[4],生成对应的修复曲面片。非几何方法生成的修复曲面片具有唯一性,不能根据实际需要实现给定连续性的模型修复,且算法的总体效率较低。②几何方法中比较具有代表性的是采用基于映射平面^[9]或者空间的网格化方法^[7]对孔洞边界进行三角化剖分,然后对三角化剖分网格进行细分、优化^[10]及Reshape调整得到均匀连续的修复曲面片^[8,12]。该类算法的关键是对孔洞边界的三角化剖分和后续的Reshape处理。基于映射平面的剖分方法在处理形状简单的孔洞边界时,具有较好的效果,但在处理曲率变化剧烈、形态复杂的孔洞

收稿日期:2014-05-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075173);江苏省自然科学基金资助项目(BK2010288)

[7] Shin Sehyun, Chang Hyuk Jae, Athavale Mahesh. Numerical Investigation of the Pump Flow in an Automotive Torque Converter [C]//International Congress & Exposition, Detroit, 1999; 1999-01-1056.

[8] Kammerer S, Mayer J F, Stetter H, et al. Development of a Three-dimensional Geometry Optimization Method for Turbomachinery Applications[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2004, 10(5):373-385.

[9] 马文星. 液力传动理论与设计[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[10] 罗邦杰. 液力机械传动[M]. 北京:人民交通出版社,1983. (编辑 张 洋)

作者简介:刘宗其,男,1963年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授级工程师、博士。获省部级科技进步奖二等奖1项,发明专利3项。发表论文10篇。李志远,男,1949年生。合肥工业大学教授、博士研究生导师。刘海林,男,1976年生。安徽叉车集团工程师。

时,投影后产生的自相交使剖分结果出现剧烈“凹陷”。常用的空间三角化剖分方法^[7]为 NP complete 问题,具有 $O(N^3)$ 的复杂度,不适合处理顶点较多的模型边界。同时,现有的对修复曲面片 Reshape 调整的方法通常基于径向基函数^[6]、最小化能量函数^[13]和光顺算法^[8,11]等,难以取得指定连续性的修复结果,对复杂形态孔洞修复的效果较差。

针对现有孔洞修复方法效率低、修复结果单一、不能有效处理复杂形态孔洞的问题,本文深入研究分析了在对孔洞边界进行空间三角化剖分时的各种影响因素后,基于局部最优化的权值规则和曲面最小能量值特性的 k 阶离散欧拉-拉格朗日方程,提出了一种能有效地对复杂孔洞边界进行 C^{k-1} ($k=1,2,3$) 连续的三角网格模型修复算法。本文所提出的修复算法主要由封闭孔洞边界的三角化剖分、剖分网格的细分优化以及后续的 C^{k-1} 连续变形调整三个步骤组成。

1 孔洞修复算法及其实现

1.1 符号定义

对网格模型中的任意顶点 v_i ,用 $N_{V,1}(i)$ 表示顶点 v_i 的一环邻域顶点集合, $N_{T,1}(i)$ 表示顶点 v_i 的一环邻域三角形集合。 $|N_{V,1}(i)|$ 表示集合中顶点的个数, $|N_{T,1}(i)|$ 表示集合中三角形的个数。 $N_{T,1}(i)$ 中的三角形在顶点 v_i 处对应的内角称为 v_i 的邻接内角(图 1 中的 A_j, A_k),定义 $A(v_i)$ 为 $N_{T,1}(i)$ 在 v_i 处的邻接内角之和:

$$A(v_i) = \sum_{j \in N_{T,1}(i)} A_j \quad (1)$$

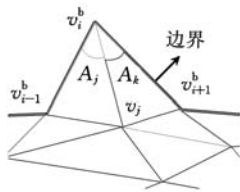


图 1 尖锐棱角对应的初始边界

孔洞边界由 $B_H = \{v_1^b, v_2^b, \dots, v_n^b\}$ 表示, v_i^b 为孔洞边界的顶点, $e_{i,j}$ 表示由顶点 v_i^b, v_j^b 组成的边界边,由边界 B_H 中前后相邻的 3 个顶点 $v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b$ 所组成三角形表示为 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 。定义权值函数 $\Omega: B_H^3 \rightarrow L$, 三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 对应的权值 $L_i = \Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b)$, $L_i \in L$, 其中, L 为三角形对应的权值集合。

对网格模型进行孔洞修复时,相应符号定义如下:孔洞边界三角化剖分生成的网格用 M_C 表示; M_C 细分、优化后生成的网格用 M_{R0} 表示; M_{R0}

进行 Reshape 调整后生成的最终修复网格用 M_F 表示。

1.2 孔洞边界的三角化剖分

对网格模型孔洞边界进行三角化剖分时,首先计算三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 的权值 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b)$, 然后,根据三角形权值的大小,迭代删除其对应的空间多边形顶点,实现对孔洞边界的快速网格化。孔洞边界三角化剖分的结果,对模型修复效果起着至关重要的作用。权值函数应满足以下条件。

(1) 新增三角形后,待删除顶点及其一环邻域顶点组成的多面体,应与周边网格近似连续过渡,避免形成尖锐的棱角,使新增的网格表面出现凹凸不平和褶皱。

(2) 剖分过程中,应避免同一边界顶点包含过多的邻接三角形,使剖分结果产生扭曲。

(3) 生成的剖分网格中的边,应均匀地分布在孔洞边界上。

因此,根据以上条件,权值函数 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b)$ 应根据孔洞边界顶点 v_i 的邻接内角之和 $A(v_i)$ 、一环邻域三角形的个数 $|N_{T,1}(i)|$ 及新增三角形的边长等因素综合决定。

1.2.1 顶点一环邻域内角因素

当顶点 v_i 为网格模型内部任意顶点时, $A(v_i)$ 的大小表示网格模型在该点处的“平坦”程度, $A(v_i)$ 越大,当前顶点与其一环邻域顶点共面度越大,网格模型内部的连续性越好; $A(v_i)$ 较小的顶点,在模型表面会形成粗糙的特征,不仅影响后续的模型处理,而且对视觉效果有着不良影响。 $A(v_i) \approx 2\pi$ 时,顶点 v_i 的邻接内角 $\exists j \in N_{T,1}(i); A_j \approx \pi$ 时,曲面的连续性发生剧烈变化。因此应避免生成 $A(v_i)$ 较小及存在邻接内角接近于 π 的新增三角形。

经实验分析,当边界顶点 v_i^b 的邻接内角之和 $A(v_i^b) \in (0, \alpha\pi)$, α 接近 1 时,对孔洞边界进行剖

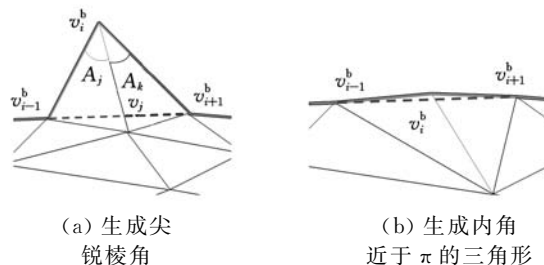


图 2 新增三角形后生成的非“平坦”情况

分,新增三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 后,会产生图 2 所示的两种情况。因此,当 $0 < A(v_i^b) < \alpha\pi$ 时,使三角形

$\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 具有较低的候选优先级, 赋给一个较小的权值 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) = l_{less}$ 。经过实验分析, $\alpha = 1.2$ 时, 能有效地避免剖分后形成尖锐棱角和内角接近于 π 的三角形, 如图 2 所示。

1.2.2 顶点一环邻域三角形因素

通常, 网格顶点 v_i 的一环邻域三角形个数 $|N_{T,1}(i)|$ 为 6 ~ 8 时较优。为了避免同一边界顶点在剖分后生成过多的邻域三角形, 使得剖分结果“汇聚”于一点, 产生扭曲, 需对边界顶点在剖分过程中的 $|N_{T,1}(i)|$ 进行限制。因此, 根据流形网络的属性, 当 $|N_{T,1}(i)| > 8$ 时, 应使顶点 v_i^b 优先删除, 即候选三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 应具有较高的优先级, 赋给一个较大的权值 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) = l_{bigger}$ 。 $0 < A(v_i^b) < \alpha\pi$ 且 $|N_{T,1}(i)| > 8$ 时, 应避免使得剖分结果产生扭曲为优先条件, 候选三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 应赋给一个较大的权值, 即 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) = l_{bigger}$ 。

流形网格中, 顶点 v_i 的一环邻域三角形投影到顶点 v_i 处的切平面时, 投影后三角形的边除在顶点 v_i 处应无相交产生。剖分过程中, 新增候选三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 在 3 个顶点 $v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b$ 处均应满足投影后无相交产生的条件。若投影后产生相交, 则应避免顶点 v_i^b 优先删除, 即候选三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 应具有 0 优先级, 赋给一个无穷小值, 即 $\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) = -\infty$ 。

1.2.3 三角形边长因素

当顶点 v_i^b 满足 $|N_{T,1}(i)| \leq 8, A(v_i^b) > \alpha\pi$ 时, 其在剖分过程中为“正常”的顶点, 候选三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 的权值应根据三角形的属性(边长、面积、内角等)进行确定。为使剖分后的曲面能张紧覆盖在孔洞边界上, 且内部变化平缓, 剖分后的曲面片中的边应成“帘幕”状均布在孔洞边界上。此时, 剖分曲面片中的三角形顶点在空间上应该是位置相对且距离较近的顶点。因此, 三角形的权值应根据其对应的边长进行计算, 三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 的三条边长总和越小, 即周长越小, 候选优先级应越高, 对应的权值计算方式为

$$\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) = -(|e_{i-1,i}| + |e_{i,i+1}| + |e_{i+1,i-1}|)$$

式中, $e_{i-1,i}, e_{i,i+1}, e_{i+1,i-1}$ 分别为三角形 $\Delta U_{i-1}^b U_i^b U_{i+1}^b$ 的三条边。

1.2.4 权值及三角化剖分算法

经对孔洞边界三角化剖分时可能产生影响的因素进行综合分析以及实际的编程验证后, 权值 Ω 及 l_{less}, l_{bigger} 相应的计算公式如下:

$$\Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b) =$$

$$\begin{cases} -(|e_{i-1,i}| + |e_{i,i+1}| + |e_{i+1,i-1}|) & |N_{T,1}(i)| \leq 8, A(v_i^b) > \alpha\pi \\ l_{less} & |N_{T,1}(i)| \leq 8, 0 < A(v_i^b) < \alpha\pi \\ l_{bigger} & |N_{T,1}(i)| > 8 \\ -\infty & \text{投影到切平面, 产生相交} \end{cases} \quad (2)$$

$$l_{less} = -\frac{\pi R_C}{A(v_i^b)} \quad l_{bigger} = |N_{T,1}(i)| \frac{R_C}{8}$$

式中, R_C 为模型的包围球半径。

三角化剖分算法描述如下:

(1) 计算孔洞边界中, 所有前后相邻的 3 个顶点组成的三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 的权值 L_i , 并将其插入到 L 。其中, $v_{n+1}^b = v_1^b, v_{n+2}^b = v_2^b$ 。

(2) 从权值集 L 中取出最大的权值 L_{max} , 并把其对应的三角形 $\Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 添加到 M_C , 把包含顶点 v_i^b 的三角形所对应的权值 $\Omega(v_{i-2}^b, v_{i-1}^b, v_i^b), \Omega(v_{i-1}^b, v_i^b, v_{i+1}^b), \Omega(v_i^b, v_{i+1}^b, v_{i+2}^b)$ 从 L 中删除掉; 从 B_H 中删除顶点 v_i^b , 此时, $B_H = \{v_1^b, v_2^b, \dots, v_{i-1}^b, v_{i+1}^b, v_{i+2}^b, \dots, v_n^b\}$; 计算三角形 $\Delta v_{i-2}^b v_{i-1}^b v_i^b, \Delta v_{i-1}^b v_i^b v_{i+1}^b$ 的权值 $\Omega(v_{i-2}^b, v_{i-1}^b, v_i^b), \Omega(v_{i-2}^b, v_{i-1}^b, v_{i+1}^b)$ 并插入到 L 中。迭代操作直到 B_H 中顶点个数小于 3 为止, 得到三角化剖分网格 M_C 。

1.3 三角化剖分网格的细分及优化

由于三角化剖分网格 M_C 中的边由 B_H 中的顶点直接连接而成, 故需对 M_C 进行细分、优化, 得到与原始网格模型网格密度相近的曲面片。网格模型的密度通常是由三角形的平均边长度量的, 因此本文采用 1-3“面分裂”方法, 将边长较大的三角形 $\Delta v_i v_j v_k$ 按图 3a 所示的方式进行分裂, 新增顶点为三角形的质心坐标 v_c , 并采用边交换的方法进行优化调整, 得到边长均匀且近似符合 Delaunay 划分准则的曲面片 M_{RO} ^[10](见图 3b、图 3c)。

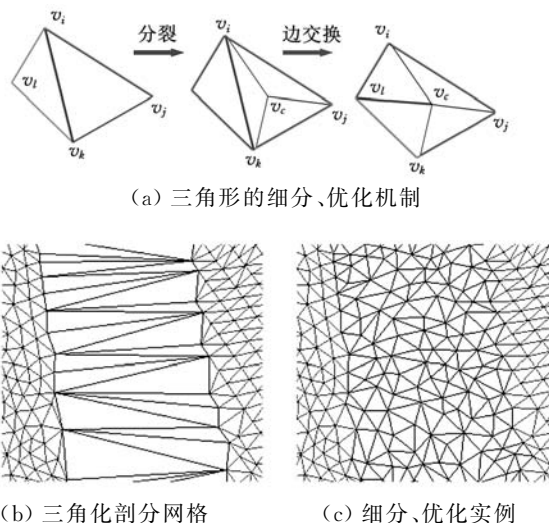


图 3 三角化剖分网格的细分、优化

1.4 C^{k-1} 连续的形状恢复

M_C 经过细分、优化后得到的网格 M_{RO} 仍为边界和内部均为 C^0 连续的曲面片。为得到在边界和内部符合 C^{k-1} 连续性约束的曲面片,图形学领域中,在给定边界信息和边界约束条件的情况下,通常采用最小能量定律来实现曲面片的 C^{k-1} 连续 Reshape 调整^[12-13]。因用二次函数表示的能量函数在求解时有着较高的效率和较好的稳定性,故本文基于二次能量函数的通用表示方式,设计了一种能实现 C^{k-1} 连续的 Reshape 调整框架,框架的设计过程如下:

设 $S: \Psi \rightarrow R^3$ 为三角网格模型 M 对应的连续曲面, $S_{u \dots u}$ 表示曲面的 k 阶偏导数, δ_Ψ 为曲面的边界。其对应的二次能量函数为

$$E_k(S) = \int_S F_k(S_{u \dots u}, S_{u \dots uv}, \dots, S_{v \dots v}) \quad (3)$$

通常应用变分的方法对等式(3)进行求解,以得出对应最小能量值特性的欧拉-拉格朗日方程:

$$\begin{cases} \Delta^k S(x) = 0 & x \in \psi \setminus \delta_\psi \\ \Delta^j S(x) = b_j(x) & x \in \delta_\psi, j < k \end{cases} \quad (4)$$

其中, Δ 为拉普拉斯算子; b_j 为具有 j ($j < k$) 阶连续性的边界约束。为保证算法的效率和稳定性,通常限定 $k=1, 2, 3$ 。 $k=1$ 时,方程所表示的曲面为面积最小的薄膜曲面; $k=2$ 时,为弯曲度最小的薄板曲面; $k=3$ 时,为曲率变化最小的曲面。曲面 M 在经基于式(4)的 Reshape 调整变形后,将在边界处具有 C^{k-1} 和内部具有 C^k 的最优连续性,从而实现模型整体 C^{k-1} 连续的恢复。

当用三角网格曲面取代连续曲面时,式(4)中的拉普拉斯算子对应离散为

$$\Delta(v_i) = \frac{2}{S(v_i)} \sum_{j \in N_{v_i}^{(i)}} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij})(v_i - v_j) \quad (5)$$

其中, $S(v_i)$ 为顶点一环邻域三角形的面积之和; α_{ij}, β_{ij} 为边 e_{ij} 的对角。 k 阶的拉普拉斯算子通过迭代定义求出:

$$\bar{\Delta}^k(v) = \Delta(\bar{\Delta}^{k-1}(v)) \quad (6)$$

对拉普拉斯算子进行离散后,式(4)转化为带有稀疏矩阵的线性方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Delta}^k \\ 0 | \mathbf{I}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{P} = [v_{p,1} \ v_{p,2} \ \dots \ v_{p,n}]^T$ 表示网格模型 M 的内部的自由顶点; $\mathbf{B} = [v_{b,1} \ v_{b,2} \ \dots \ v_{b,m}]^T$ 表示具有 C^{k-1} 边界连续的约束顶点,对应为边界顶点的 $k-1$ 环邻域顶点集合(包含边界顶点); n, m 为对应顶点个数。根据设计的变形框架,对优化细分网格 M_{RO} 中的顶点,按照给定的边界连续性约束进行调整后得到 M_F 。

2 实验分析

2.1 剖分算法工作机理分析

采用第 1 节中的权值规则对孔洞边界进行剖分时,在剖分过程的起始阶段,由于边界顶点的邻接三角形较少,剖分规则主要根据邻接内角和三角形周长规则进行。如图 4a、图 4b 所示,初始的剖分过程,亦是一消除“锯齿”、平滑边界的过程,使得边界顶点 v_i^b 的邻接内角之和 $A(v_i^b)$ 在 $0 \sim \alpha\pi$ 之间,处于较低的候选优先级状态。随着剖分过程的进行,剖分规则会选择边界“角落”处具有较高候选优先级的顶点。剖分后,与新生成边相连的边界顶点通常要比其余边界顶点具有更高的优先级,因此,会驱动剖分继续沿新生成的边界处向前推进,直至形成“帘幕”状的剖分结果(图 4c、图 4d)。

图 4e 所示为不考虑邻接内角约束时,对图 4a 中孔洞剖分的结果,图 4f 所示为不考虑邻接三角形个数约束时,对图 4a 中孔洞剖分的结果。由剖分结果可知,邻接内角约束主要影响剖分生成的三角片大小,邻接三角形个数约束主要影响剖分结果在孔洞边界上的均布性。

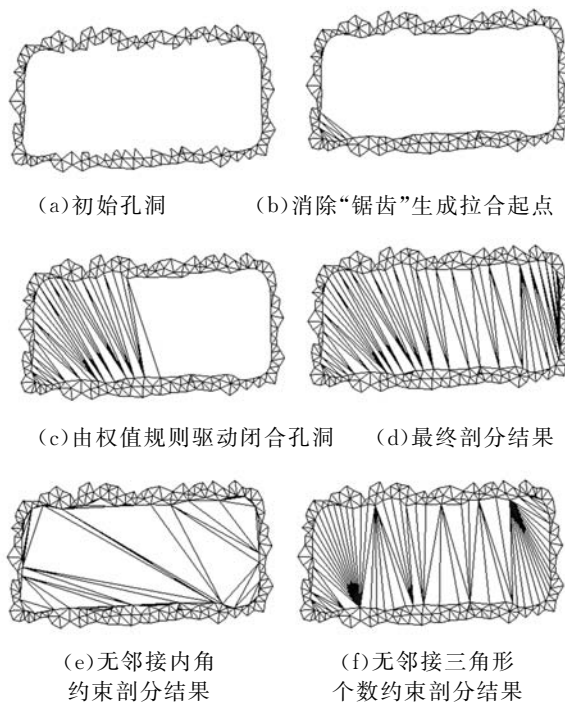


图 4 孔洞剖分机理分析

孔洞剖分过程中,剖分算法会在多个分支的“交汇处”生成较大的三角形,对多个分支进行闭合。

本文所提的权值规则使剖分过程近似分为边界平滑和边界“拉合”的过程,使得剖分结果能张紧在孔洞边界,得到均匀、自然和无扭曲的剖分。

2.2 算法效率分析

由于对孔洞边界采用局部最优化的权值规则,基于迭代删除顶点的方法进行三角化剖分,三角化剖分阶段对应的时间复杂度为线性 $O(N)$ (N 为边界顶点个数)。对三角化剖分网格 M_C 的细分、优化,以得到与原始网格模型密度相近的网格 M_{RO} ,其对应的时间复杂度为线性 $O(M)$ (M 为优化细分后得到的三角形的个数)。在对矩阵的求解阶段,本文采用增量最小二乘求解矩阵的方

法,基于 CPU(P4 2.4 GHz)的速率可达每秒 5 万个顶点。因此,本文所提的模型修复算法,具有较高的效率,且算法的鲁棒性较好。

表 1 显示了本文算法在对网格模型修复过程中,生成 M_C 、 M_{RO} 和 M_F 各步骤所用时间,并与文献[7-8]的剖分算法进行了对比。表 1 数据表明,利用本文的剖分算法对模型进行修复时,剖分效率为每毫秒 200~300 个顶点,修复效率为每秒 3000~5000 个顶点,适合应用于修复地形、文物

表 1 对模型修复过程中各步骤所需时间,新生成的顶点(V)/三角形(T)的个数

模型	边界点数	孔洞边界剖分生成 M_C 所需时间(s)		生成 M_{RO} 所需时间(s)	生成 M_F 所需时间(s)
		文献[7-8], $O(N^3)$ 时间复杂度	本文算法, $O(N)$ 时间复杂度		
带孔洞的球模型	341	91.40 (341V/339T)	0.015 (341/339)	0.297 (4581V/8826T)	1.00 (5264V/10 182T)
牙颌模型底部孔洞	437	191.844 (437V/435T)	0.016 (437V/435T)	0.392 (6031V/11 636T)	1.232 (6844V/12 962T)
复杂兔子孔洞模型	587	1408.14 (857V/855T)	0.031 (857V/855T)	0.173 (2663V/4628T)	0.877 (2733V/4828T)
复杂 Pulley 孔洞模型	1769	12 762.3 (1769V/1767T)	0.062 (1769V/1767T)	0.328 (4559V/7342T)	1.104 (4743V/7986T)

等包含海量级数据的大尺寸三维模型。

2.3 应用举例

本节对带有大面积缺失的球模型(图 5a)、牙颌模型(图 5b、图 5c)、兔子模型(图 5d、图 5e)、

Pulley 上的孔洞(图 5f、图 5g),进行了实验分析。

图 6a 显示,采用映射平面剖分时,由于孔洞边界曲率变化剧烈,模型缺失面积较大,投影后的边界会产生自交。图 6b 为基于映射平面法所生成的修复结果,其并不能满足实际需要。

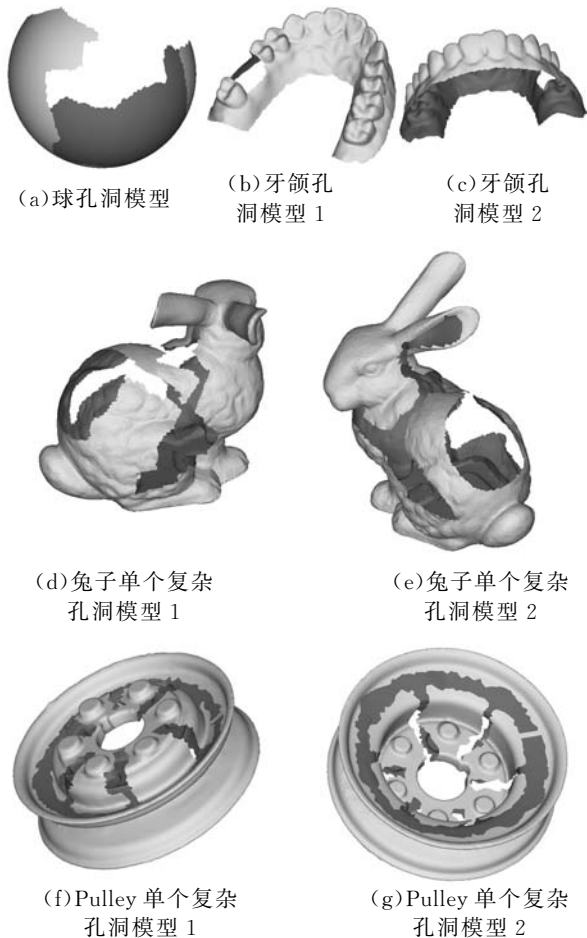


图 5 孔洞模型

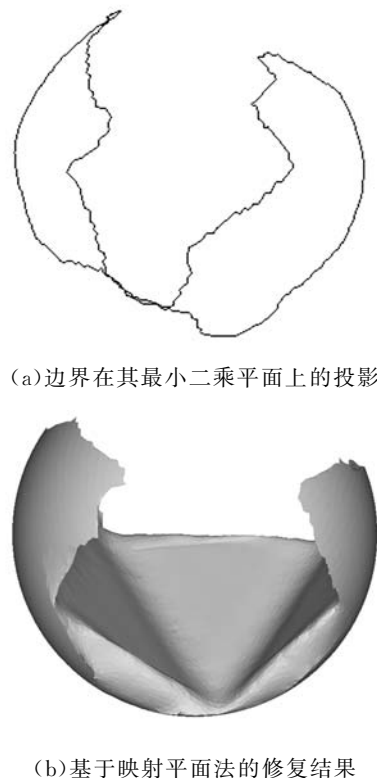
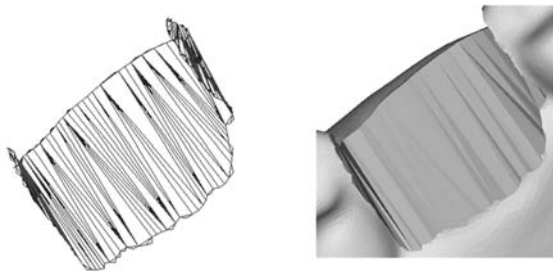


图 6 平面映射平面部分的结果

图 7a、图 7b、图 7c 显示,在利用本文算法对孔洞边界进行三角化剖分时,能得到均布在孔洞



(a) 齿间孔洞



(b) 底部孔洞



(c) 兔子孔洞

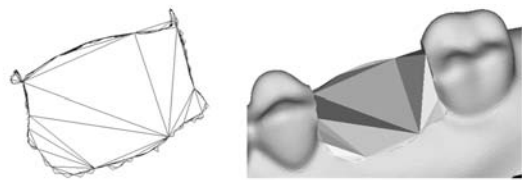
图 7 本文算法所得剖分结果

边界上的剖分结果。

图 8a、图 8b、图 8c 为采用文献[7-8]面积最小化的剖分结果,剖分过程中没有对顶点的邻接三角形个数和邻接内角进行限制,这使得剖分结果会产生扭曲和生成内角接近于 π 的三角形。

由于对相同的孔洞边界无论采用何种剖分方法,总会得到具有相同三角形个数的剖分结果,因此,对空间孔洞边界的剖分好坏的判断标准,即为剖分后生成的边在孔洞边界上的均布性。由图 7a、图 7b、图 7c 可知,本文算法剖分得出的三角形更为均匀合理。

图 9 显示了利用本文算法,对模型进行具有不同边界连续性和内部连续性的修复结果。图 10、图 11 显示,本文算法可以处理带有大面积缺失的复杂孔洞模型,对孔洞的修复结果均匀自然。由实例分析可知,本文算法能实现对模型不同连续性的修复,修复后的网格密度与原始网格密度相近,能满足实际工程的需要。



(a) 齿间孔洞



(b) 底部孔洞

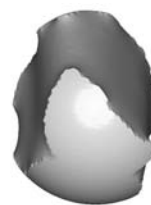


(c) 兔子孔洞

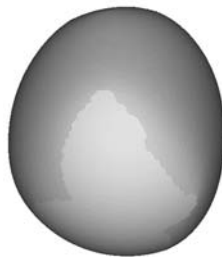
图 8 文献[7-8]算法所得剖分结果



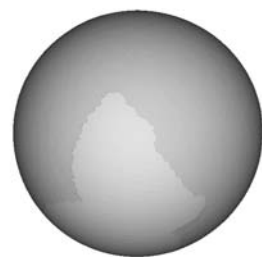
(a) 优化细分结果



(b) 边界 C^0 连续



(c) 边界 C^1 连续



(d) 边界 C^2 连续

图 9 球模型的孔洞修复



(a) 剖分后的光照模型



(b) 边界 C^0 连续



(c) 边界 C^1 连续

图 10 复杂兔子孔洞修复结果



图 11 复杂 Pulley 孔洞模型边界 C^1 连续修复结果

3 结语

本文深入分析了对三角网格模型孔洞边界进行剖分时的各种影响因素,根据二维流形网格模型的特性,对剖分过程中由边界顶点组成的候选三角形进行加权,使得对空间孔洞边界的剖分转化为边界平滑和边界“拉合”的过程,得到成“帘幕”状均布在孔洞边界上的三角化剖分网格。对三角化剖分网格进行细分、优化后操作后,采用基于能量最小化定律的方法进行 Reshape 调整,从而实现具有 C^{k-1} 连续的模型修复。由最终的修复模型可知,本文算法能根据模型的部分信息来恢复网格模型,可用于网格模型的压缩。本文算法简单、易于理解,能处理形状复杂、大面积缺失的网格模型孔洞,具有较好的工程应用价值。

参考文献:

[1] Attene M, Campen M, Kobbelt L. Polygon Mesh Repairing: an Application Perspective [J]. ACM Computing Surveys, 2013, 45(2): 1-37.

[2] Davis J, Marschner S R, Garr M, et al. Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion [C]//First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission, Padua, Italy, 2002: 428-441.

[3] Wu X J, Wang M Y, Han B. An Automatic Hole-filling Algorithm for Polygon Meshes [J]. Computer-aided Design and Applications, 2008, 5(6): 889-899.

[4] Zhou K, Gong M, Huang X, et al. Data-parallel Octrees for Surface Reconstruction [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(5): 669-681.

[5] Marchandise E, Piret C, Remacle J F. CAD and

Mesh Repair with Radial Basis Functions [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(5): 2376-2387.

[6] 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.

Du Ji, Zhang Liyan, Wang Hongtao, 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.

[7] Barequet G, Sharir M. Filling Gaps in the Boundary of a Polyhedron [J]. Computer Aided Geometric Design, 1995, 12(2): 207-229.

[8] Liepa P. Filling Holes in Meshes [C]//Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, Aire-la-Ville, Switzerland, 2003: 200-205.

[9] Li G, Ye X Z, Zhang S Y. An Algorithm for Filling Complex Holes in Reverse Engineering [J]. Engineering with Computers, 2008, 24(2): 119-125.

[10] Pfeifle R, Seidel H P. Triangular B-splines for Blending and Filling of Polygonal Holes [C]//Proceedings of the Conference on Graphics Interface, Ontario, Canada, 1996: 186-193.

[11] 韦争亮, 钟约先, 袁朝龙, 等. 三角网格大面积孔洞光顺修补算法的研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(8): 949-954.

Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong. Research on Smooth Filling Algorithm of Large Holes in Triangular Mesh Model [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 949-954.

[12] Botsch M, Kobbelt L. An Intuitive Framework for Real-time Freeform Modeling [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(3): 630-634.

[13] Bobenko A I, Schröder P. Discrete Willmore Flow [C]//Eurographics Symposium on Geometry Processing, Aire-la-Ville, Switzerland, 2005: 101-110.

(编辑 张洋)

作者简介:袁天然,男,1982年生。淮阴工学院机械工程学院讲师、博士。主要研究方向为逆向工程、数字口腔医疗装备。发表论文10余篇。程筱胜,男,1964年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。孙全平,男,1969年生。淮阴工学院机械工程学院教授。