

面向 CAE 的网格模型特征简化与重建^①

陈志杨, 韩春雷

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

摘要: 针对 CAE 工程分析中网格模型的特点, 提出了一种符合 CAE 特点的网格模型特征重建方法。鉴于 CAD 模型中的设计细节在 CAE 分析中可以忽略的特点, 对 CAD 模型中的小圆角、倒角、小凸台等非结构性设计特征, 采用基于面片法矢迭代滤波方法进行识别和滤除。算法首先识别出这些特征区域, 然后根据非特征区域面片法矢调整特征区域法矢并更新顶点坐标, 进行特征重建, 最终得到符合 CAE 要求的网格模型。

关键词: 网格特征重建; 网格特征简化; 网格处理; FEA

Simplification and Reconstruction of Mesh Model in CAE

CHEN Zhi-Yang, HAN Chun-Lei

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Based on the analysis of CAE used mesh model, this paper puts forward an algorithm of the characteristics of CAE method mesh features. In view of the design details of the CAD model can be ignored in the CAE analysis of the characteristics of CAD models in this paper, a small fillet, chamfer, roller and other non-structural design features, vector-based Facet iterative filtering method was used to identified and removed. Firstly, identify the characteristics of the region, and then non-characteristic area under the patch normal vector adjustment feature regions vertex normal vector and update the coordinates of the feature reconstruction, the final grid which meets the requirements model of CAE.

Keywords: mesh feature reconstruction; mesh simplification; mesh processing; FEA

1 引言

工程分析是产品设计过程中评价设计正确性的重要步骤。通常我们利用 CAE 软件(如 NASTRN, ANSYS 等)对来自 CAD 软件的产品模型进行分析计算从而确定设计、强度、应力等指标是否符合设计要求。一般来讲, CAE 软件只提供比较简单的建模功能, 绝大多数分析计算都是直接利用 CAD 软件中的数字模型, 通过对其进行网格划分以及设置解算条件等步骤完成分析的。众所周知, 目前 CAD 软件采用的是基于历史的参数化造型技术, 对产品设计来讲, 这种做法可以通过追溯历史了解产品的设计步骤。但是不同的 CAD 软件采用不同的数据结构描述特征, 因此对 CAE 软件来讲, 无法从不同 CAD 系统中读入特征信

息并利用。与 CAD 用户比较, CAE 用户更关注产品模型的结构、形状, 而不是设计过程和产品细节。在 CAE 前处理中, 对于 CAD 模型中细小的设计细节, 如孔、圆角以及建模过程中形成的小曲面等, 往往需要忽略。这些细节往往不是基于结构的考虑, 保留这些细节, 会加大网格划分的难度, 增加单元数量, 甚至会掩盖问题的主要矛盾, 对求解计算和分析结果造成负面影响; 再者, 导入的模型中的一些几何和拓扑错误也可能导致网格划分失败或不准确; 另外, 在导入的过程中有时还会出现缝隙和丢面的现象。本文针对 CAE 分析中的这些特点, 通过对三角网格模型中面片法矢和顶点的调整, 有效地将圆角、斜面转化为倒角等尖锐特征, 生成适合 CAE 分析需要的网格模型。

① 基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(2007AA04Z1A5)

收稿时间:2010-08-21;收到修改稿时间:2010-09-19

目前对于网格模型处理(优化)的研究很多,国内对网格细分^[1]、网格光顺^[2,3]及特征提取^[4]研究较多,而对尖锐特征的重建研究较少。国外学者已经提出很多网格锐化的方法,Wang^[5]提出一种将倒角和圆角特征重建成尖锐特征方法;Sun^[6]等提出一种基于面片法矢迭代滤波算法;Taubin^[7]提出了加权拉普拉斯网格锐化算法,但上述方法有一个共同缺点,即对非特征区域进行相同的迭代操作,易造成原始模型特征的退化丧失,给原始模型平坦处带来一定的扰动。本文中作者将 Attene M^[8]的算法思想用到 CAE 分析软件的前处理中,对从 CAD 系统产生的网格模型进行特征提取和重建。根据网格特征识别出特征区域,再根据非特征区域的面片法矢计算出特征区域的面片新法矢,最后根据调整的新法矢重建网格顶点的坐标。该算法的特征面片是由其相邻面片决定,不用计算相邻面片区域,算法相对简单,除了对圆角处理之外,对斜面的处理也有一定的效果。

2 算法描述

网格重建在本质上是调整特征区域三角面片顶点坐标,本文算法通过以下几个步骤实现网格特征识别与重构:1)特征区域的识别;2)特征区域三角面片法矢调整;3)特征区域三角面片顶点调整。

2.1 特征区域的识别

为了网格锐化方法描述的方便,对后文中出现的数学符号做以下定义: T 是三角网格 $T=(V,E,F,X)$; 其中 $V = \{i | i=1,2,3 \dots n\}$ 是点的集合、 $E = \{(i,j) | (i,j) \in V^2\}$ 是边的集合、 $F = \{(i,j,k) | (i,j),(i,k),(j,k) \in E\}$ 是面的集合、 $X = \{x_i | x_i \in R^2 \ i \in V\}$ 是坐标的集合。F 中的第 i 个面是 f_i 其法矢是 n_i ,用 c_i 表示其中心, $N_F(f_i)$ 表示与 f_i 共享边和点的三角面片集合,如图 1 所示。另外顶点 v_i 所在的三角面片集合设为 $N_F(v_i)$ 。

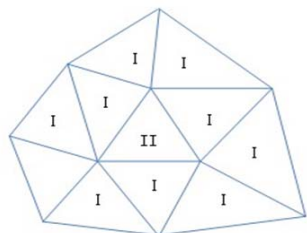


图 1 三角形 I 属于 $N_F(f_{II})$

遍历计算 f_i 的 $N_F(f_i)$, 当 $d(c_i, f_k) < \rho$, $d(c_i, f_k)$ 是中心

点到三角面片 f_k 的距离, ρ 是特征宽度,一般由用户自己设定)且 $n_i \cdot n_k > \lambda$ (λ 是锐边阈值,本文中 λ 一律是 0,表示二面角大于直角时停止该方向的搜索),如果 f_k 满足以上条件则将其加入 $N_F(f_i)$ 。

当 f_i 的 $N_F(f_i)$ 确定后,用下式判断其是否是特征面片:

$$S(f_i) = \min(n_j \cdot n_k) \quad f_i, f_k \in N_F(f_i) \quad (1)$$

若 $S(f_i) < \beta$ 则 f_i 是特征面片,否则就不是,其中 β 的值由用户指定,范围是 $0 < \beta < 1$ 。

与 SHEN^[9]相比,在几何特征识别和特征面片选取中,从表 1 中可以看出,本文算法时间效率已经优化很多,其中图 2 给出了一个特征识别的实例。

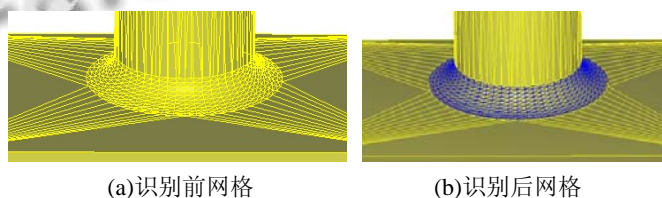


图 2 特征识别

2.2 特征面片的法矢重建

由于本文处理的网格对象不含有噪音,因此不需要做光顺等预处理。法矢重建的算法思想是由与特征面片相邻的非特征面片的法矢决定的,法矢调整的公式如下:

$$n'_i = \text{normalise} \left(\sum_{j \in N_F(f_i)} h_j n_j \right)$$

其中 h_j 是权值函数定义如下:

$$h_j = \begin{cases} f(n_i \cdot n_j - T) & \text{if } n_i \cdot n_j > T \\ 0 & \text{if } n_i \cdot n_j \leq T \end{cases}$$

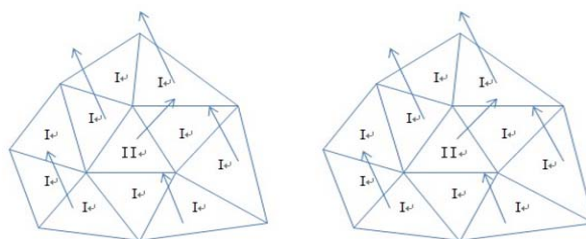


图 3 网格面片法矢调整示意图

三角网格中的每个三角面片法矢的调整都要综合考虑与该三角面片相邻的所有三角面片的法矢,调整

后的结果总是使得三角网格出现微小差异的三角面片法矢和周围三角面片法矢确定的平均法矢趋于一致。上述公式利用误差最小原则，与 sun^[6]相比，不需要迭代即能取得很好的效果。法矢调整原理的具体描述聂军洪^[10]已在其论文中给出，图 3 给出其示意图。

2.3 网格顶点坐标更新

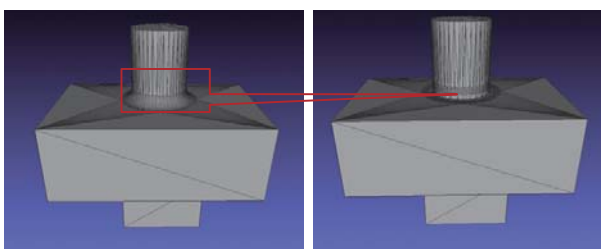
为了得到目标网格模型，我们要根据调整后的法矢对网格顶点作调整，三角网格模型任一顶点 x_i 位置的更新公式为

$$x'_i = x_i + \frac{1}{|N_F(V_i)|} \sum_{k \in N_F(V_i)} n'_k (n'_k \cdot (c_k - x_i)) \quad (4)$$

其中， $N_F(V_i)$ 表示顶点 V_i 所在的三角面片集合， $|N_F(V_i)|$ 表示三角形个数； c_k ， n'_k ， x_i ， x'_i 分别表示中心坐标，新法矢坐标，原顶点坐标和新顶点坐标。顶点调整后使得差异处新生成三角面片的法矢向调整后法矢的方向靠近，经过法矢和顶点调整的多次迭代后，新生成三角面片的法矢和 n'_k 充分接近，就形成光滑的网格表面。而在模型的棱边等特征处，由于调整法矢能够自动检测到夹角接近于直角的相邻三角面片，将网格顶点沿着调整后法矢方向 n'_k 移动后。随着新生成三角片的法矢逐步接近 n'_k ，模型的特征线(如倒角)也就更加清晰突出,三角网格特征因此得到重建。

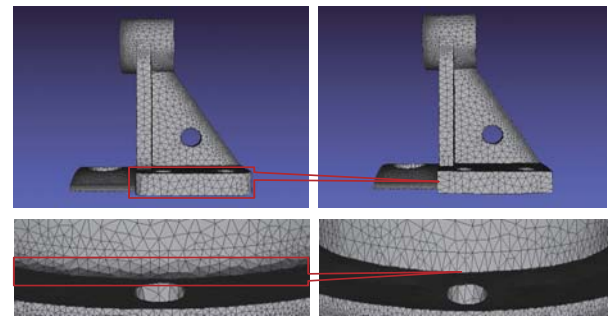
3 结果与分析

本文算法经 VC++语言在 PC 机上已经实现，以下是部分实验结果。从图中可以看出，本文算法不仅能重建特征边和点，而且还能处理一定的斜面。图 4 是圆柱体和长方体相交的模型，经处理后恢复了原有形状。图 5 中分别对特征点和特征边做出了相应的处理，从图 6 的结果中可以看到，本文算法也能锐化小斜面，使之成为适合 CAE 分析的网格模型。



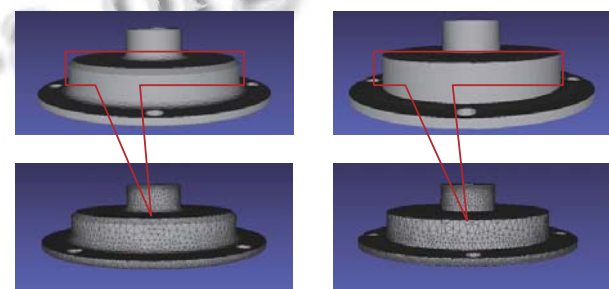
(a)原网格 (b)处理后网格

图 4 相交部分处理



(a) 原网格 (b) 处理后网格

图 5 特征点和特征面处理



(a) 原网格 (b) 处理后网格

图 6 斜面处理

表 1 计算时间比较 单位：秒

	面片数	相邻区域识别时间	特征面片识别时间	法矢更新时间	坐标更新时间
图 4	1668	0.094	0.031	0.094	0.115
SHEN ^[9]	1668	0.157	0.062	0.109	0.125
图 5	36700	2.063	1.156	69.523	2.422
SHEN ^[9]	36700	3.542	1.155	72.526	2.463
图 6	31482	1.75	0.953	56.938	2.266
SHEN ^[9]	31482	3.024	0.975	62.512	2.362

4 结论

本文提出了面向 CAE 工程应用的网格模型特征提取和重建算法。与以往算法相比，由于本文算法处理的对象是无噪音的三角网格，所以不用光顺。同时在寻找特征区域时只需要确定每个三角面片的相邻面而不是邻近面片集合。法矢的调整是重点，它决定了三角网格最终的优化结果，通过对网格中三角面片法矢和网格顶点进行依次调整，不仅保证了新生成网格从特征线外部向内部逐渐更新，而且使调整后的网格

特征更加突出,这对于网格后续的特征提取、有限元分析等操作都十分有利。本文算法局限性是常数 ρ 和 β 的选择,现在还不能根据原始网格的特征自动设置,只能依靠计算结果做相应调整。但是根据实验结果,我们发现 β 取值于0到1之间时可以获得相对满意的结果,当 β 越大时,特征区域越平整,这时只对原始网格中细小的边界进行修复,相反,当 β 逐步减小时,模型中主要的边界也得到了修复。所以根据原始模型的大小、形状和网格特征等信息自动确定常数 ρ 和 β 的值将通过进一步的研究给出。

参考文献

- 1 王金生,韩臻,施寅.几种经典网格细分算法的比较.计算机应用研究,2004,(6):139-141.
- 2 聂磊,朱松.基于双边过滤的网格光顺法.计算机工程与设计,2008,9(2):451-453.
- 3 刘胜兰,周儒荣,聂军洪,周来水.主曲率均匀的网格光顺.2004,27(1):80-84.
- 4 刘胜兰,周儒荣,张丽艳.三角网格模型的特征线提取.计算机辅助设计与图形学报,2003,15(4):444-448.
- 5 Wang CCL. Incremental reconstruction of sharp edges on mesh surfaces. Computer Aided Design, 2006,38(6):689-702.
- 6 Sun XF, Rosin PL, Martin RR, et al. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007,13(5):925-938.
- 7 Taubin G. A Signal Processing Approach to Fair Surface Design. Proc. of the SIGGRAPH'95, Los Angeles, 1995. 351-358.
- 8 Attene M, Falcidieno B, Rossignac J, et al. Edge-sharpener: Recovering Sharp Features in Triangulations of Non-adaptively Re-meshed Surfaces. Proc. of the Eurographics Symposium on Geometry Processing. Aachen, Germany, 2003:62-71.
- 9 Shen JG, Chen ZY. Mesh sharpening via normal filtering. Zhejiang Univ Sci A, 2009,10(4):546-553.
- 10 聂军洪,周来水,刘胜兰.基于特征修复的网格模型光顺算法研究.机械科学与技术,2004,23(1):110-112.

(上接第209页)

息含有较多的噪声以及对边缘线型连接程度一般(见图7),而采用非线性滤波平滑后提取的边缘信息,显著的减少了噪声,如图8。在非线性滤波的基础上,改用 3×3 邻域计算梯度幅值和最大类间方差法选取阈值,在去除噪声、定位精度、边缘信息保存方面效果更好,如图9。

5 结论

本研究通过对传统Canny算子进行改进,采用了非线性扩散滤波和 3×3 邻域的梯度幅值计算以及最大类间方差法选取阈值,实验表明改进算法在群体米样图像边缘提取中,解决了传统Canny边缘检测算法存在的问题,既有效抑制了图像中的噪声,又很好地保护了边缘细节,优于传统Canny算法的性能。

参考文献

- 1 Liang LR, Looney CG. Competitive fuzzy edge detection. Applied Soft Computing, 2003,2:123-137.
- 2 Canny JA. Computational approach to edge detection. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,6:679-698.
- 3 Bao P, Zhang L. Canny edge detection enhancement by scale multiplication. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005,9:1485-1490.
- 4 张小洪,杨丹等.基于Canny算子的改进型边缘检测算法.计算机工程与应用,2003,3(7):113-114.
- 5 张宇伟,王耀明,等.基于小波变换的算子边缘检测算法.上海师范大学学报,2006,3(7):35-38.
- 6 余洪山,王耀南,等.一种改进型Canny边缘检测算法.计算机工程与应用,2004,20(3):27-29.
- 7 韦海萍,赵保军,唐林波,等.Canny算法的改进及其硬件的实现.光学技术,2006,32(2):263-266.
- 8 任宪忠,马小愚.农产品粒形识别研究进展及其在工程中的应用现状.农业工程学报,2004,20(3):276-280.
- 9 Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990,7:629-639.
- 10 Gilboa G, Zeevi YY, Sochen NA. Forward and backward diffusion processes for adaptive image enhancement denoising. IEEE Trans. on Image Processing, 2002,7:689-703.