

三维非规则碎片的分块算法研究

朱延娟¹, 周来水²

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 提出一种动态增长的平均法矢准则, 采用宽度优先搜索的方法, 对三维非规则碎片分块. 首先, 随机地选取碎片几何模型上任意一个三角片作为种子网格, 通过法矢比较, 将法矢方向一致的三角片加入到当前的种子网格; 计算经过增长了的种子网格的平均法矢并继续上述的比较过程, 得到碎片模型的初步划分结果; 然后, 对初步划分得到的相互混杂的大小区域分类、融合, 进一步优化分块结果. 应用实例证明了算法的有效性和可靠性.

关键词: 碎片; 分块; 几何模型; 块融合; 法矢

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

A Segmentation Algorithm for Irregular Three Dimensional Objects Fragments

ZHU Yanjuan¹, ZHOU Laishui²

(1. College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Center of CAD/CAM Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The rule of dynamic average normal vector is proposed to segment irregular three dimensional object fragments by breadth first. Any triangle is chosen at random from geometric model of fragment as a seed mesh. Through the comparison, the triangle, whose normal vector is coincident to the seed mesh, will be added in. The average normal vector is calculated for the increased seed mesh and the comparing process is continued until the primary segmentation is obtained. The interrelated regions are classified and amalgamated to farther optimize the results of segmentation. Experimental results demonstrate the algorithm is efficient and robust.

Key words: fragment; segmentation; geometrical model; amalgamation; normal vector

三维非规则碎片的分块, 是将由光学扫描仪测得的碎片整体数据划分成代表不同曲面类型的数据域, 使同一区域的数据点有相似的几何特性, 为后续碎片断裂面(待匹配面)的识别、碎片匹配提供方便.

目前对三维物体的分块有着许多相关的研究工作, 但主要针对深度图像^[1]和三维点云数据^[2]. Besl 利用高斯曲率和平均曲率的符号组合, 将点附近的曲面类型分为八种, 实现对深度图像点集数据的分块^[3]. Sapidis 用二次函数曲面和区域生长法, 研究深度图像的分块和拟合^[4]. 但是, 广泛用于表示数字化几何模型的三角网格曲面分块的研究却比较少^[5]. Garland 所采用的面聚类方法较适合于辐射着色或简化^[6]; Benko 通过分层次的检验来识别逆向工程中一些常规的结构件(如拉伸件、旋转面)^[7]; 文献^[8]将由三角片所构成的空间多边形作为生长点来分块网格曲面; Huang 将散乱测量点构造成三角网格, 通过曲率计算实现网格模型的数据划分^[9].

对于三维非规则碎片的匹配而言, 其过程是断裂面之间的拼合, 因而分块的关键是要能够识别出完整的断裂面. 而上述的研究工作均难以方便、准确地获得断裂面的完整信息. 笔者在上述研究基础上, 提出一种动态的平均法矢准则, 采用宽度优先搜索, 对任意形状物体的网格模型进行分块.

1 非规则碎片的几何特性计算

通过光学扫描仪测量获得的三维非规则碎片的几何模型, 一般包括断裂面在内的三角网格模型, 法矢是其主要的几何特性之一. 设 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 为网格曲面中任意一个三角片的三个顶点, $P_1P_2 = \{x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1\}$ 和 $P_1P_3 = \{x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1\}$ 为两个

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(60273097); 教育部博士点基金新教师基金

第一作者: 朱延娟(1970—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为 CAD/CAM、逆向工程、计算机辅助几何设计.

E-mail: zhu_yj@tongji.edu.cn

相应的边矢量,则该三角片所在平面的法矢 \mathbf{n} 可由下式计算:

$$\mathbf{n} = \mathbf{P}_1\mathbf{P}_2 \times \mathbf{P}_1\mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{J} & \mathbf{K} \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & (z_3 - z_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

为使得网格曲面中各三角片的法矢均指向曲面的同一侧,三角片顶点的排列顺序与法矢之间需遵循右手法则.因此,三角片 $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ 面积加权的平均法矢 \mathbf{N} 为

$$\mathbf{N} = (S_{\Delta P_1 P_2 P_3} \mathbf{n}) / (\| S_{\Delta P_1 P_2 P_3} \mathbf{n} \|) \quad (2)$$

2 三维非规则碎片的分块

在获得被测物体的法矢几何特性后,可根据这些几何不变量对碎片的三维模型进行分块.将三角片 $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ 作为种子网格,根据 \mathbf{N} 对与种子网格相邻的所有三角片进行宽度优先搜索.若某个三角片的法矢 \mathbf{n}_j 与 \mathbf{N} 满足下式的关系,则该三角片加入到当前的种子网格:

$$\mathbf{n}_j \mathbf{N} \geq \xi \quad (3)$$

其中, ξ 的值可根据网格曲面的曲率变化来定.通过分析一系列的相关实验,取 $\xi = 0.6 \sim 0.9$, 可以获得良好的分块结果.

加入新的三角片后,种子网络的平均法矢要相应地改变

$$\mathbf{N}_{\text{ave}} = \left(\sum_{i=1}^t S_{\Delta i} \mathbf{n}_i \right) / \left(\left\| \sum_{i=1}^t S_{\Delta i} \mathbf{n}_i \right\| \right) \quad (4)$$

式中: \mathbf{N}_{ave} 为增长后种子网络的平均法矢; t 为种子网格上的三角片数; $S_{\Delta i}$, \mathbf{n}_i 分别为第 i 个三角片的面积和法矢.然后,再在其相邻的三角片中搜索法矢方向与新的平均法矢相一致的三角片.因为采取的是宽度优先搜索,所以仅有一个三角片的法矢不满足一致性要求并不终止当前的种子网格增长,只有当其相邻的所有三角片都不满足这一要求时,才结束种子网格的增长.这时的种子网格是具有相似法矢方向的三角片的集合,成为一个块.块的边界可以是任意复杂的多边形.所以,该分块方法对任意拓扑的网格模型均可实施,适应性好.

当一个种子网格的生长过程结束后,再选择一个新的种子网格作为生长点,重复上述的计算平均法矢、搜索法矢方向一致的三角片、将三角片加入种子网格这一系列过程,当网格曲面上所有的三角片都属于某一种子网格时,分块过程结束.在算法具体实现时,采用队列的结构来对数据组织和存储.

由于三维非规则碎片形状的任意性,相应网格曲面的变化情况多样,阈值 ξ 一般比较大,所以初次划分得到的块很多,小块和大块相互混杂,需要融合不同的块.首先,将划分所得的块按照面积分类:

① 大区域块.块内包含的三角片多,块面积 $S_a > k_1 S_w$. k_1 为系数, S_w 为网格曲面的表面积.

② 中区域块.块内包含的三角片较少, $k_2 S < S_a < k_1 S_w$. k_2 为系数.

③ 小区域块.块内只包含少量的三角片,有可能只包含一个三角片, $S_a < k_2 S_w$.

根据块类型的不同而采用不同的融合方法.对小区域块,将其融合到邻近大块 S_j 中,如图 1a 所示.对中区域块,将其平均法矢分别和相邻区域的平均法矢作点积运算,若与相邻区域 S_j 的平均法矢满足式(3),则将该块融合到邻近块 S_j 中(图 1b).这样可以避免将一些碎片中面积相对较小的块被错误地融入到邻近的法矢方向相差很大的块中.大区域块作为一个独立的块而存在,不进行块融合.通过对相关实验的分析比较, $k_2 \leq 0.02$, $0.02 < k_1 \leq 0.045$, 可以获得良好的块融合效果.

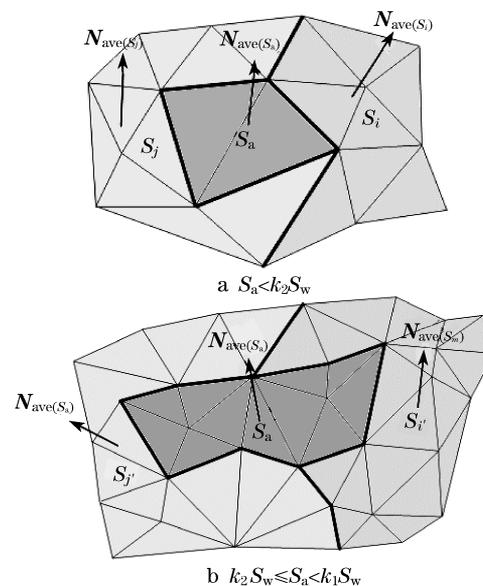


图 1 区域划分后的小块融合
Fig.1 Amalgamation of small segments after regions being classified

算法描述如下:

步骤一, 任选碎片三维模型的一个三角片 $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ 作为种子网格, 计算其平均法矢 \mathbf{N} .

步骤二, 对与种子网格相邻的所有三角片进行宽度优先搜索, 若某个三角片的 \mathbf{n}_j 与 \mathbf{N} 满足式(3), 则该三角片被加入到当前的种子网格, 并重新计算其平均法矢; 若不满足, 则不加入, 继续搜索.

步骤三,当与种子网格相邻的所有三角片均不满足式(3)时,结束种子网格的增长.这时的种子网格是具有相似法矢方向的三角片的集合,为一个块.

步骤四,选择一个新的种子网格作为生长点,重复步骤一、二、三.

步骤五,当网格曲面上所有的三角片都属于某一种子网格时,分块结束.

步骤六,计算各个块的面积,并分类、融合,提取块的边界.

对三维模型的分块时间与模型的三角片数目 α 成线性关系,因此,分块算法的复杂度为 $O(\alpha)$.

3 实验结果及分析

应用本算法进行一系列的相关实验.图 2a 为清朝砖瓦碎片的实物图,在用光学扫描系统 Atos II 测得实物模型后,经孔洞修补、网格简化等预处理,得到碎片的三角网格模型(图 2b).

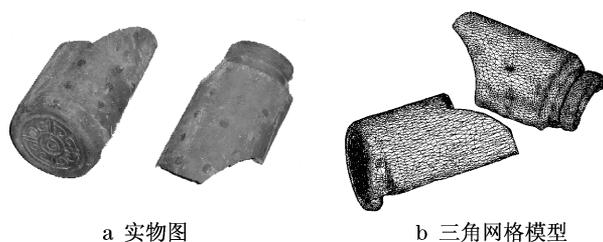


图 2 清朝砖瓦碎片

Fig.2 Brick fragments in Qing dynasty

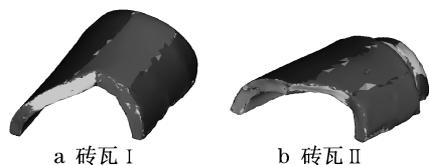


图 3 清朝砖瓦碎片初次分块结果

Fig.3 First segmentation results for brick fragments in Qing dynasty

图 3a 是根据本算法对砖瓦碎片 I 的几何模型初次分块的结果,每一个块用一种颜色显示,共 1162 块.可以看出,初次分块后,大小块混杂.图 3b 是对另一个清朝砖瓦碎片模型初次分块的结果.

图 4 是将面积较小的块融合到邻近区域后,砖瓦碎片模型的分块结果,其中砖瓦 I 经块融合后,块数减为 10 个;砖瓦 II 经块融合后,块数减为 9 个.

图 5 为整体融合后各个块的边界,其中砖瓦断裂面的边界基本沿着断裂面的特征线.

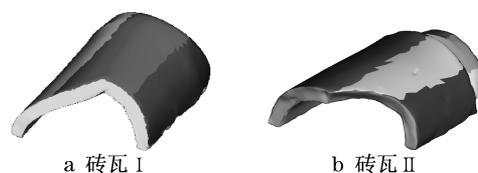


图 4 清朝砖瓦碎片初次分块后的小块融合

Fig.4 Amalgamation of small pieces after first segmentation for brick fragments in Qing dynasty

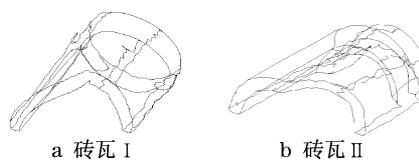


图 5 清朝砖瓦碎片分块所得的块边界

Fig.5 Fragment boundaries obtained by segmentation for brick fragments in Qing dynasty

图 6 为两个纪念碑块的实物图及其三角网格模型.图 7a,b,c 分别为两个纪念碑块的几何模型经过分块、块融合后得到的分块结果.这些实物图片和三角网格模型数据由希腊雅典大学 Georgios Papaioannou 博士提供.

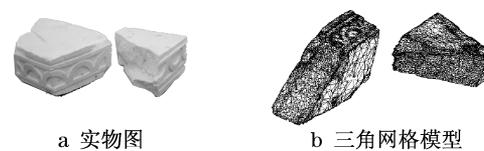


图 6 纪念碑块

Fig.6 Memorial Fragments

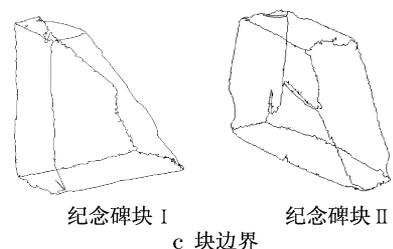
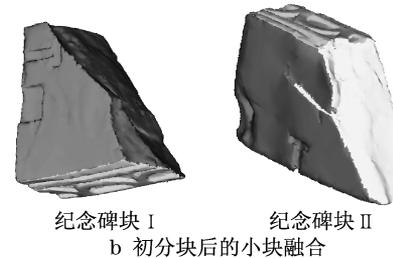
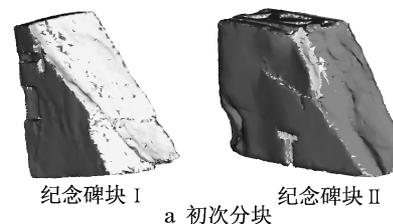


图 7 纪念碑块的分块结果

Fig.7 Segmentation results for memorial fragments

4 结语

三维非规则碎片的分块是碎片的断裂面识别以及后续匹配过程的基础. 提出了一种动态增长的平均法矢准则, 通过法矢比较, 将碎片的网格模型分割成不同的数据区域, 然后根据区域面积的大小对区域进行分类、融合, 实现了对任意形状的非规则碎片的分块. 该算法对碎片的三角网格模型没有限制, 块的边界处于碎片的结构形状发生变化的地方, 因此能够保证获得碎片断裂面的完整信息.

参考文献:

- [1] Leonardis A, Jaklic A, Solina F. Superquadrics for segmenting and modeling range data[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(11):1289.
- [2] Chevalier L, Jaillet F, Baskurt A. A segmentation superquadric modelling of 3D objects[J]. WSCG, Plzen-Bory, Czech Republic 2003, 11(2):232.
- [3] Besl P J, Jain R C. Segmentation through variable-order surface fitting[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(2):167.
- [4] Sapidis N S, Besl P J. Direct construction of polynomial surfaces from dense range images through region growing [J]. ACM Trans on Graphics, 1995, 14(2):171.
- [5] Guillaume Lavoue, Florent Dupont, Atilla Baskurt. A new CAD mesh segmentation method based on curvature tensor analysis [J]. Computer Aided Design, 2005, 37(10):975.
- [6] Garland M, Willmott A, Heckbert P. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces [J]. ACM Symp Interactive 3D Graph, 2001(1):49.
- [7] Benko P, Varady T. Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects[J]. Computer Aided Design, 2004, 36(6):511.
- [8] Papaioannou G, Karabassi E A, Theoharis T. Segmentation and Surface Characterization of Arbitrary 3D Meshes for Object Reconstruction and Recognition [C] // Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, [S. l.]: IEEE, 2000: 734 - 737.
- [9] Huang J, Menq C H. Automatic data segmentation for geometric feature extraction from unorganized 3-D coordinate points[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 268.
- [2] 李东勃. 焊接机器在汽车工业内的应用及其发展趋势[J]. 机械工人, 2002(9):17.
LI Dongbo. Welding robot application in automation automobile industry and development trend[J]. Machinist Metal Forming, 2002(9):17.
- [3] 陈阳. 白车身焊接机器人工位规划的仿真及优化[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2006.
CHEN Yang. Simulation and optimization of planning on the robot-station in body-in-white lines [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2004.
- [4] Dantzig G B. Solution of a large scale traveling salesman problem [J]. Operations Research, 1954, 2(4):393.
- [5] Bellman R. Dynamic programming treatment of the traveling salesman problem[J]. Journal of The Association for Computing Machinery, 1962(8):61.
- [6] Carpaneto G, Toth P. Some new branching and bounding criteria for the asymmetric traveling salesman problem [J]. Management Science, 1980(26):736.
- [7] 陈文兰, 戴树贵. 旅行商问题算法研究综述[J]. 滁州学院学报, 2006, 8(3):5.
CHEN Wenlan, DAI Shugui. The summary of traveling salesman problem algorithm [J]. Journal of Chuzhou University, 2006, 8(3):5.
- [8] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
WANG Haiying, HUANG Qiang, LI Chuantao, et al. Graph theory algorithm and realization of MATLAB [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [9] Zitar Raed Abu, Hanandeh Essam, Shehabat Essa. Genetic algorithm with neighbor solution approach for traveling salesman problem [J]. Neural Network World, 2007, 17(5):497.
- [10] Maekawa Keiji1, Mori Naoki1, Tamaki Hisashi1, et al. A Genetic solution for the traveling salesman problem by means of a thermo dynamical selection rule [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation. Nagoya: Nagoya University, 1996:529 - 534.
- [11] Chatterjee Sangit1, Carrera Cecilia1, Lynch Lucy A. Genetic algorithms and traveling salesman problems [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 93(3):490.
- [12] 梁吉元, 郁鼎文, 张玉峰, 等. CAM 系统中孔加工路径的优化处理[J]. 计算机集成制造系统, 2000, 6(1):74.
LIANG Jiyuan, YU Dingwen, ZHANG Yufeng, et al. Optimization of manufacturing path of holes in CAM system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2000, 6(1):74.
- [13] 高飞. 轿车发动机生产线平衡优化研究及应用[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2008.
GAO Fei. Optimization and application of car motor line balance [D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2008.
- [14] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
LIU Jinkun. Design of robot control system and simulation using MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

(上接第 580 页)