

## 三角网格模型体素特征分割

马元魁<sup>1</sup> 白晓亮<sup>2</sup>

(西安工业大学理学院 西安 710032)<sup>1</sup>

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 西安 710072)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对现有机制造领域网格模型分割结果缺少工程含义的现状,提出了一种三角网格模型体素特征分割方法。首先在对三角网格模型分割的基础上,对由网格分割得到的每个子网格进行曲面类型识别,然后在基本体素及典型结构显著特征表示的基础上,把识别出的曲面集合与基本体素及典型结构进行匹配,从而将分割结果分类为自由曲面、基本体素和复杂体素,实现具有工程含义的体素特征分割。该方法可以降低模型重构的难度,加快模型重构的速度。

**关键词** 三角网格模型,体素特征,匹配,子图同构

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.003

### Voxel Features Segmentation of Triangular Mesh Models

MA Yuan-kui<sup>1</sup> BAI Xiao-liang<sup>2</sup>

(School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)<sup>1</sup>

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Because the existing segmentations of models lack engineering semantics in mechanical manufacturing, the voxel features segmentation of triangular mesh models was proposed. Based on segmentation of triangular mesh models, surface type is identified for each mesh, and then the identified surface set is matched with basic voxels or typical structures represented by salient features, so that the segmentation results are classified as free surfaces, basic voxels and complex voxels. The voxel features segmentation with engineering semantics is achieved, which can make reconstruction of models easier and faster.

**Keywords** Triangular mesh models, Voxel features, Matching, Subgraph isomorphism

## 1 引言

早期的网格分割结果<sup>[1-4]</sup>往往没有明确的几何、物理或工程意义。近年来有意义网格分割的概念被提出,在不同领域网格分割的“意义”有不同的含义。基于心理学、心理物理学以及人类视觉理论的原则,很多文献认为按三维网格模型中的最小负曲率边界分割模型就是一种有意义的分割<sup>[1]</sup>。

在机械制造领域,有意义的网格分割不仅需要准确地分割出单一的曲面区域<sup>[6]</sup>,还应该根据工程需要,准确地分割出构成模型的基本造型元素(简称基本体素)以及具有一定工程语义的典型结构。对三角网格模型分割来说典型结构可统一看作由多个曲面区域组合形成的特定几何形状。

由于球面图像的三角网格模型分割方法<sup>[6]</sup>可以对不均匀的低分辨率三角网格模型进行有效分割,降低曲率等几何属性估算对分割结果的影响,不会发生过分割现象,不需进行分割的后续处理,而且独特的图像映射方式携带了曲面的几何

属性<sup>[7]</sup>,因此本文首先基于球面图像对三角网格模型进行分割。然后对网格分割得到的每个子网格进行曲面类型识别,再把识别出的曲面集合在基于基本体素及典型结构显著特征表示的基础上,与基本体素及典型结构进行匹配,从而将分割结果分类为自由曲面、基本体素和复杂体素,实现具有工程含义的体素特征分割,有助于模型的进一步重构。

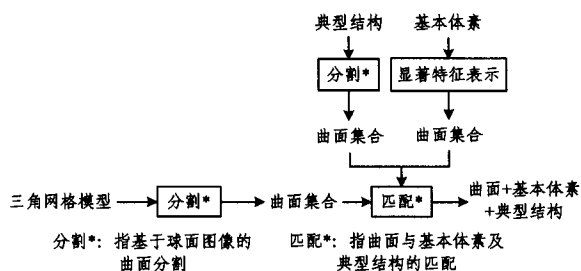


图1 三角网格模型体素特征分割

三角网格模型体素特征分割的基本流程见图1,其中包

到稿日期:2014-10-12 返修日期:2015-01-01 本文受国家自然科学基金资助项目(11201275),陕西省教育厅专项科研基金资助项目(2013JK0590)资助。

马元魁(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为CAD&CG、逆向工程,E-mail:mayuankui@xatu.edu.cn;白晓亮(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为逆向工程、三维模型检索和三维工序数模快速构建等,E-mail:bxl@gmail.com。

含基于球面图像的曲面分割方法(图1中的分割\*)、基本体素的显著特征表示方法分析(图1中的显著特征表示)、曲面与基本体素及典型结构的匹配方法(图1中的匹配\*)等3个步骤。

## 2 基于球面图像的三角网格模型分割方法

由于基于球面图像的三角网格模型分割方法把对三角网格模型的分割转化到了规则域上进行,其结果优于直接对不规则的三角网格进行分割,因此本文首先基于球面图像将三角网格模型分割为多个子网格的集合。主要算法步骤如下<sup>[6]</sup>:

- 步骤1 将三角网格模型转化为球面图像。
- 步骤2 利用图像分割的方法完成球面图像的分割。
- 步骤3 将球面图像分割结果转换为三角网格模型的分割结果。

## 3 曲面类型识别

将网格分割为多个子网格的集合以后,每个子网格为单一曲面类型。首先应进行曲面类型的识别<sup>[8]</sup>,然后基于不同类型的曲面,使用相应的曲面提取技术来反求曲面几何参数。算法采用依次试探的策略进行曲面类型的识别,由简单曲面入手,根据数据点的微分几何特性、高斯映射特性及曲面的运动特性来判别曲面类型。

算法主要思路是:对于每个子网格中的 $N$ 个数据点 $p_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ),首先依据各个数据点最大主曲率与最小主曲率是否都近似为0来判断该面片是否为平面;其次,依据各个数据点的两个主曲率是否近似相等且不为0来判断该面片是否为球面;然后,依据各个数据点最小主曲率是否近似为0、最大主曲率是否近似于一个定值来判断该面片是否为圆柱面;最后,依据各个数据点最小主曲率是否近似为0、最大主曲率是否不等来判断该面片是否为圆锥面;若该面片不是圆锥面,则进一步依据文献<sup>[9]</sup>的方法判断它是否为圆台面。算法流程见图2。

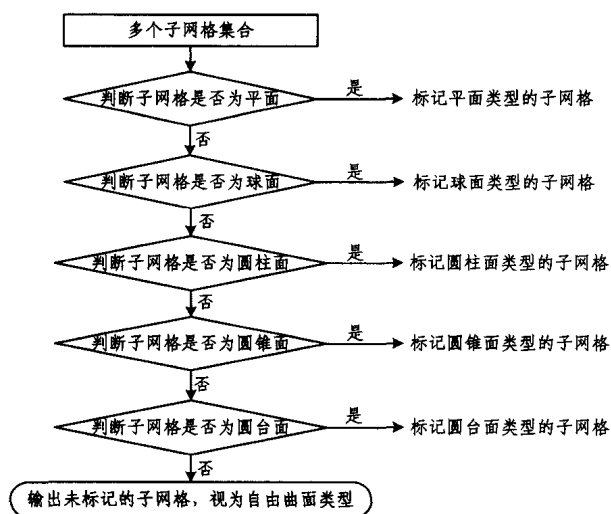


图2 曲面类型识别流程

## 4 基本体素的显著特征表示

复杂空间体往往被看作简单基本元素的组合,而其中局

部显著的元素作为形状的主体在人脑中形成的客观印象以很大的优势屏蔽了其它元素。例如汽车常常被看作一个方盒子与若干圆形轱辘的组合;圆桌被视为一个圆盘与若干方柱的组合。这里的盒子、轱辘、圆盘和方柱都是构成模型形状的主体元素,称为显著特征;除显著特征外的其他元素(例如倒角)被称为非显著特征。屏蔽非显著特征将模型分割为其显著特征的组合是三角网格模型体素特征分割的基本出发点<sup>[10]</sup>。

为了实现三角网格模型的体素特征分割,在基于球面图像将三角网格模型分割为多个子网格的集合以后,再通过与基本体素匹配将分割结果分类为曲面、基本体素和复杂体素。而基本体素的显著特征表示是子网格集合与基本体素匹配的前提。

基本体素由显著特征和非显著特征构成,非显著特征对模型的表征影响不大,因此本文分析了构成各类基本体素的显著特征,形成基本体素的显著特征集。由于基本体素的显著特征通常都是曲面,因此基本体素的显著特征集主要存放构成各类基本体素的显著特征曲面。特定基本体素的显著特征表示具有固定模式。本文分析了组成长方体、圆柱体、球体等简单体素,拉伸、放样体等常用体素的常见特定类型的曲面,以及这些曲面间的拓扑关系,为此,这里采用B-Rep模型<sup>[11]</sup>表示基本体素。

## 5 曲面与基本体素匹配

三角网格模型经过曲面分割后得到其构成的曲面集合,通过曲面类型识别方法,可标识出平面、球面、圆柱面、圆锥面等常见二次曲面和拉伸面、旋转面以及其他自由曲面。在此基础上与构成基本体素及典型结构的显著特征(即曲面)进行匹配,从曲面集合中找出符合基本体素或典型结构的曲面,从工程语义的角度体现分割的意义,便于从“体”的角度进行模型重构。匹配结束后,分割得到的曲面集合中可能存在部分无法与常见曲面、基本体素或典型结构匹配的曲面,在本文中,将这些曲面统一标识为自由曲面进行处理。

### 5.1 基本体素匹配的总思路

为实现基本体素匹配,首先将一个基本体素的B-Rep模型等价转换成一个属性邻接图。在用户输入一个基本体素后,通过提取其B-Rep信息,可构建一个小的属性邻接图,该图作为“子图”;同时,对于待匹配的曲面集合,也通过提取其B-Rep信息,可将其转换为一个大的属性邻接图,该图作为“大图”。这样,在曲面集合中检索基本体素的问题就转换为在“大图”中寻找同构“子图”的问题,可通过子图同构来解决。匹配的总思路如图3所示。

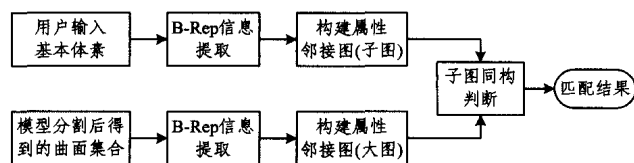


图3 基本体素匹配的总思路

### 5.2 面片邻接关系判别

由于分割后的面片之间没有任何拓扑关系,因此面片之间邻接关系判别是属性邻接图建立的关键环节。本文用边界邻域法建立面片之间的邻接关系。其基本思路是<sup>[8]</sup>:面片边界点的邻域中若包含其它面片上的点,则该面片与包含点所

在的面片相邻。为快速查找邻域,采用栅格法。首先确定数据点的长方体包围盒,将包围盒划分成若干小立方体栅格。由隶属度可确定边界点、定位边界点所在的栅格。若一个小栅格中包含了2个或3个面上的点,则这2个面或3个面相邻接。

### 5.3 构建属性邻接图

在 B-Rep 表示中,一个基本体素被看作由  $n$  个三维空间曲面包围而成,而每个曲面又由多条边围成,每条边则由顶点来确定。通过精确描述每个顶点、每条边和每个曲面,就能精确地描述整个基本体素。

通过提取基本体素的 B-Rep 信息,可将基本体素转化成一种属性邻接图。在该属性邻接图中,每一个图顶点对应模型的一个面,面的几何属性(类型、法矢、曲率、轴线、面积等)作为顶点的属性;顶点与顶点之间的关系对应模型中面与面之间的关系,常见的关系包括相邻、平行、垂直和共面等。图4展示了一个圆柱体对应的属性邻接图。

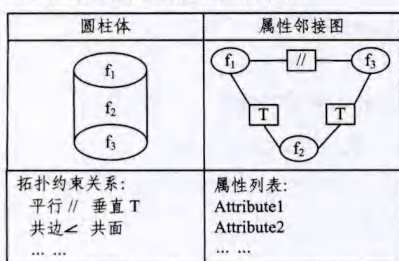


图4 圆柱体对应的属性邻接图

### 5.4 匹配算法

通过属性邻接图表示方法,基本体素与曲面集合的匹配问题被转化为子图同构问题来解决。本文利用文献[12]的方法完成子图同构的判断。其中设由基本体素转换得到的子图为  $G_a$ ,由分割后所得曲面集合转换得到的大图为  $G_b$ 。该算法首先对图的顶点进行细分以降低搜索空间的复杂度。本文利用基本体素的面的类型与边数对图的顶点进行分类。若图  $G_a$  中第  $i$  个顶点对应的基本体素的面与图  $G_b$  中的第  $j$  个顶点对应的曲面集合的面的类型或边数不同,则这两个顶点不匹配,将对应的初始化映射矩阵元素置为0,然后开始同构匹配搜索。

## 6 数值实验

图5、图6是本文对具体三角网格模型分割结果进行子图同构匹配的实例。对图5(a)所示的三角网格模型进行基于球面图像的分割,得到的分割结果如图5(b)所示,对图5(b)进行 B-Rep 信息提取以后,构建其属性邻接图如图5(c)所示,此属性邻接图作为大图,圆柱体的属性邻接图(见图4)作为子图,通过本文的子图同构匹配算法,即可得匹配结果,从分割结果中识别出两个圆柱体。

图6是对另一个三角网格模型进行体素特征分割的实例,其中图6(a)是分割结果,  $f_9$  是模型背面与  $f_7$  对称的部分,  $f_{10}$  是模型背面与  $f_{12}$  对称的部分,  $f_{14}$  是模型的最底面;图6(b)是属性邻接图。此属性邻接图作为大图,基本体素的属性邻接图作为子图,通过本文的子图同构匹配算法,即可得匹配结果,从分割结果中可识别出圆柱体、长方体等基本体素。实验结果表明,本文算法能够实现具有工程含义的体素特征分割。

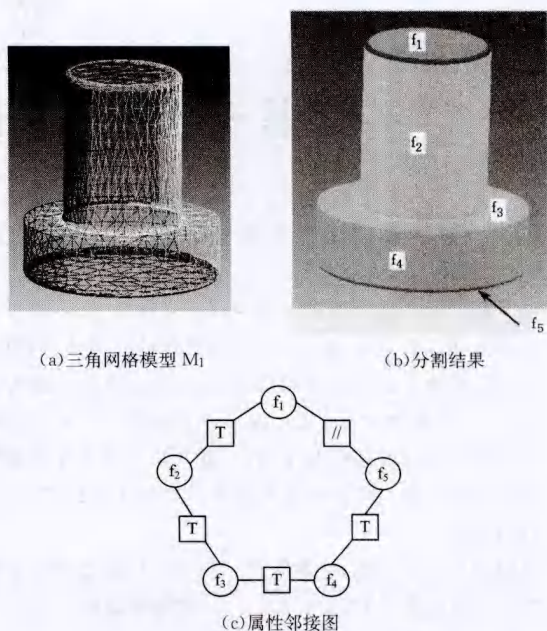


图5 三角网格模型  $M_1$  的分割结果及其属性邻接图

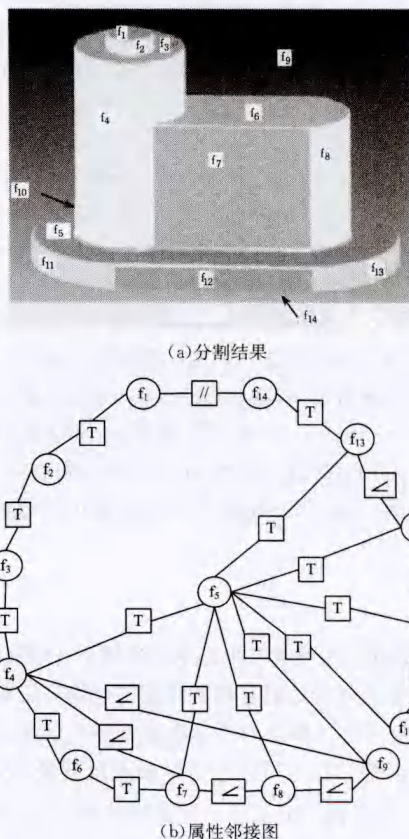


图6 三角网格模型  $M_2$  的分割结果及其属性邻接图

**结束语** 本文在基于球面图像的三角网格模型分割的基础上,实现了具有工程含义的体素特征分割。由于基于球面图像的三角网格模型分割方法把分割转化到了规则域上进行,因此分割结果明显优于直接对不规则的三角网格模型进行分割。所以在此基础之上实现的具有工程含义的体素特征分割对不含复杂自由曲面的模型准确、高效。本文主要从加工特征和基本造型特征方面体现工程含义,为基于特征的 CAD 模型重建奠定了基础。

(下转第30页)

- [6] 章伟,高博,龚敏. 基于 LabVIEW 的光电容脉搏波信号采集系统[J]. 测控技术,2011,30(12):16-19  
Zhang Wei,Gao Bo,Gong Min. A photoplethysmography signal acquisition system based on LabVIEW [J]. Measurement and Control Technology,2011,30(12):16-19
- [7] 王玲玲,张辉. 基于 LabVIEW 的计算机辅助水泵测控实验系统[J]. 仪器仪表学报,2007,28(4):230-232  
Wang Ling-ling,Zhang Hui. Computer measurement and control system for the pump based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(4):230-232
- [8] 马宏伟,王华玲,李海宁. 基于 LabVIEW 的超声检测虚拟仪器开发[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1785-1787  
Ma Hong-wei,Wang Hua-ling,Li Hai-ning. Developed of ultrasonic-testing virtual instrument based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(6):1785-1787
- [9] Reyes I,Nazeran H,Franco M. Wireless photoplethysmographic device or heart rate variability signal acquisition and analysis[C]// Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC),2012 Annual International Conference of the IEEE. San Diego,CA. IEEE Engineering,2012:2092-2095
- [10] Pradhapan P,Swaminathan M,Sriram N,et al. Identification of apnea during respiratory monitoring using support vector machine classifier:a pilot study [J]. Journal of Clinical Monitoring and Computing,2013,27(2):179-185
- [11] Gil E,Bailon R,Laguna P,et al. PTT Variability for Discrimina-
- tion of Sleep Apnea Related Decreases in the Amplitude Fluctuations of PPG Signal in Children [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,2010,57(5):1079-1088
- [12] Avci E. A new intelligent diagnosis system for the heart valve diseases by using genetic-SVM classifier [J]. Expert Systems with Applications,2009,36(7):10618-10626
- [13] Cheng Cao,Tutwiler R L,Slobounov S. Automatic Classification of Athletes With Residual Functional Deficits Following Concussion by Means of EEG Signal Using Support Vector Machine [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering,2008,16(4):327-335
- [14] Chen Fa-fa,Tang Bao-ping,Song Tao,et al. Multi-fault diagnosis study on roller bearing based on multi-kernel support vector machine with chaotic particle swarm optimization[J]. Measurement,2014,47(2):576-590
- [15] Yuan Sheng-fa, Chu Fu-lei. Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimisation by artificial immunisation algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2007,21(3):1318-1330
- [16] Feng Cai,Cherkassky V. Generalized SMO Algorithm for SVM-Based Multitask Learning [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2012,23(6):997-1003
- [17] Lopez J, Dorronsoro J R. Simple Proof of Convergence of the SMO Algorithm for Different SVM Variants [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2012, 23(7):1142-1147

(上接第 15 页)

## 参 考 文 献

- [1] 孙晓鹏,李华. 三维网格模型的分割及应用技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(8):1647-1655  
Sun Xiao-peng,Li Hua. A survey of 3D mesh model segmentation and application[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics,2005,17(8):1647-1655
- [2] Attene M,Katz S,Mortara M,et al. Mesh segmentation-a comparative study[C]// Proceedings of Shape Modeling International,2006. Washington:IEEE Computer Society Press,2006:14-25
- [3] Agathos A,Pratikakis I,Perantonis S,et al. 3D mesh segmentation methodologies for CAD applications [J]. Computer-Aided Design&Applications,2007,4(6):827-841
- [4] 董洪伟. 三角网格分割综述[J]. 中国图象图形学报,2010,15(2):181-193  
Dong Hong-wei. A review of mesh segmentation[J]. Journal of Image and Graphics,2010,15(2):181-193
- [5] Zhang Y,Paik J K,Koschan A,et al. A simple and efficient algorithm for part decomposition of 3-D triangulated models based on curvature analysis[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing,2002. Washington: IEEE Computer Society Press,2002:273-276
- [6] 马元魁,张树生,白晓亮,等. 基于球面图像的三角网格模型分割[J]. 西南交通大学学报,2012,47(3):458-464  
Ma Yuan-kui,Zhang Shu-sheng,Bai Xiao-liang,et al. Triangular mesh segmentation based on spherical images[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(3):458-464
- [7] Ma Yuan-kui, Zhang Shu-sheng, Bai Xiao-liang, et al. The Spherical Images of Triangular Mesh Surfaces[C]// The 12th International Conference on CAD/Graphics,2011. Washington: IEEE Computer Society Press,2011:119-123
- [8] 刘雪梅,张树生,崔卫卫,等. 逆向工程中基于属性邻接图的加工特征识别[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(6):1162-1167  
Liu Xue-mei,Zhang Shu-sheng,Cui Wei-wei,et al. Machined features recognition based on attributed adjacency graph in reverse engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2008,14(6):1162-1167
- [9] 马元魁,张树生,白晓亮,等. 基于形状分布的圆台体识别[J]. 中国机械工程,2009,20(9):1102-1106  
Ma Yuan-kui,Zhang Shu-sheng,Bai Xiao-liang,et al. Frustum of cone recognition based on shape distributions[J]. China Mechanical Engineering,2009,20(9):1102-1106
- [10] Benko P, Martin R P, Varaty T. Algorithms for reverse engineering boundary representation models[J]. Computer Aided Design,2001,33(11):839-851
- [11] 白晓亮. 逆向工程中混合 CSG/B-rep 模型重构技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2005  
Bai Xiao-liang. Research on hybrid CSG/B-rep model reconstruction in reverse engineering [D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2005
- [12] 王飞,张树生,白晓亮,等. 基于子图同构的三维 CAD 模型局部匹配[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2008,20(8):1078-1084  
Wang Fei,Zhang Shu-sheng,Bai Xiao-liang,et al. Local matching of 3D CAD models based on subgraph isomorphism[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics,2008, 20(8):1078-1084