

文章编号:1001-9081(2009)09-2375-03

## 基于图的三维实体模型相交特征识别

陆海山, 路 通, 杨育彬

(南京大学 计算机科学与技术系, 南京 210093)

(apple\_stone@126.com)

**摘 要:**针对相交特征自动识别较为困难的问题,提出一种新的三维实体模型相交特征识别方法。首先以属性连接图(AAG)表示简单特征的拓扑结构,以几何关系约束图(GRRG)描述简单特征组成面的几何约束关系;然后在子图匹配基础上,先识别实体模型中拓扑结构未发生变化的简单特征,修补后将其移出实体模型,再通过添加镜面操作进一步识别拓扑结构发生改变的简单特征。在此基础上,将相交特征表示为一组相连的简单特征实体,从而实现相交特征的快速、准确识别。

**关键词:**相交特征;特征识别;三维实体模型;拓扑结构;几何约束

**中图分类号:** TP391.72 **文献标志码:** A

### Intersecting feature recognition based on 3D solid model of graph

LU Hai-shan, LU Tong, YANG Yu-bin

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** As it is hard to recognize intersecting features automatically, a new method to recognize such intersecting features in 3D solid model was proposed. First, it used the Attributed Adjacent Graph (AAG) to define the topological structure among typical simple features and then used the Geometric Relation Restriction Graph (GRRG) to describe the geometric constraint relation among their faces. Second, guided by the predefined AAG and GRRG, it used subgraph matching algorithm to recognize typical simple features with their AAG not varied from the given 3D model. The recognized features were fixed and removed from the solid model for further recognition. Next, the proposed method progressively recognized those simple features whose topology varied by adding mirror face operations. Finally, the intersecting features could be denoted as a group of simpler feature entities joined together and be recognized effectively.

**Key words:** intersecting feature; feature recognition; 3D solid model; topology structure; geometric constraint

## 0 引言

实体模型中的特征识别是 CAD 领域基本问题之一。根据几何表示的不同,实体模型中的特征大体可分为简单特征及复合特征两类。其中,简单特征的几何表示相对固定,一般可通过基于规则的算法<sup>[1]</sup>识别。复合特征则相对复杂,通常由多个简单特征通过某种运算生成。由于各简单特征运算方式组合的多样性,复合特征几何表示具有不确定性,难以事先逐一与描述。

相交特征是由多个简单特征通过交运算所生成的一类复合特征。相交特征在三维实体模型中较为常见,其自动识别的困难主要在于:1)由于两个简单特征在交运算过程中,其几何组成(包括点、线、面)往往会发生改化,且随着求交位置、求交方式、简单特征大小及方向等的不同,所生成的相交特征具有多样化和不确定的特点;2)相交特征多重解释的组合爆炸问题<sup>[2]</sup>进一步增加了识别的复杂性。

本文提出一种新的相交特征识别方法,首先以属性连接图(Attributed Adjacent Graph, AAG)描述简单特征的拓扑结构,以几何关系约束图(Geometric Relation Restriction Graph, GRRG)描述简单特征的几何条件约束;然后在子图匹配基础上识别拓扑结构不变的简单特征,并通过添加镜面操作进一步识别拓扑结构发生改变的简单特征。每识别出一个特征后,将其修补为简单特征实体并移出实体模型,再进行下一个

特征查找;最后直到无法识别出新的简单特征为止。

## 1 三类典型简单特征及其拓扑结构、几何约束

### 1.1 简单特征及其拓扑结构、几何约束的表示

实体模型中,典型的简单特征包括孔、开槽和凹槽<sup>[3]</sup>。本文以这三种简单特征为例介绍相交特征的识别方法,由其他简单特征所生成的相交特征可以类似方法识别。

三类简单特征的拓扑结构由 AAG<sup>[4]</sup>描述。AAG 中的节点表示模型的面,节点之间的连线表示模型中面的相邻边;边有凹凸两种属性,属性面/边的属性分别作为节点/连线的属性来存储,面/边的属性包括面、边的类型以及边的凹凸性,面的类型包括平面、圆柱面,边的类型则包括直线边和圆弧边。

简单特征中面的几何约束可分为两类——面的几何属性约束和面的几何关系约束。

1)面的几何属性约束。孔、开槽和凹槽中包括两类面——矩形平面和圆柱面,其中矩形平面是由四个顶点标记的一个矩形平面区域,面中的边构成了这个矩形平面区域的边界。圆柱面是半个圆柱侧面,可通过中心轴,半径和四个顶点标记。

2)面的几何关系约束。按面的类型,面的几何关系约束又可分为平面与平面的几何关系约束、圆柱面与圆柱面的几何关系约束两类。平面与平面的几何关系约束主要包括三种:平行、垂直、共面;圆柱面与圆柱面的几何约束主要指共

收稿日期:2009-03-17;修回日期:2009-05-17。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60603086;60875011;60723003)。

作者简介:陆海山(1986-),男,江苏金坛人,硕士研究生,主要研究方向:三维模型检索、CAD;路通(1976-),男,江苏盐城人,副教授,博士,主要研究方向:图形识别、CAD;杨育彬(1977-),男,江西新干人,副教授,博士,主要研究方向:模型检索、知识表示、人工智能。

轴。此外,还有一种特殊的面与面之间的几何关系,即面的等价关系,其中两个面等价是指两个平面通过平移或两个圆柱面通过绕轴旋转后,其边界能完全重合。

本文提出一种新的数据结构——面的几何关系约束图来描述简单特征的面之间的几何关系约束,其中节点表示面,节点之间的连线表示面之间的几何关系,面之间的几何关系指前面提到的平行、垂直、共面、共轴、等价。

以开槽特征为例,图 1 给出其对应的 AAG、GRRG 图示,其中图 1(a) 中所所示的开槽特征由底面  $f_1$  和两个侧面  $f_2, f_3$  相连组成,  $f_1$  与  $f_2, f_3$  均为凹相连,图 1(b)、(c) 分别对应于该开槽特征的 AGG 和 GRRG 表示。

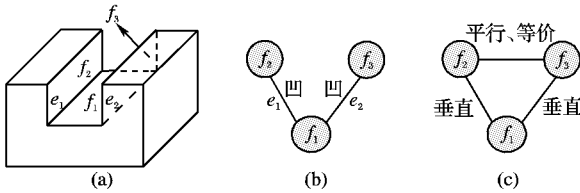


图 1 开槽特征的 AAG 及 GRRG 示例

## 1.2 相交特征中简单特征拓扑结构及几何约束的变化

简单特征通过交操作生成相交特征时,可根据其拓扑结构是否发生变化,分为拓扑结构不变、拓扑结构改变两类情况。拓扑结构不变时,根据其特征面是否满足面的几何属性约束,又可分为如下两类。

1) 拓扑结构不变,面的几何属性约束亦不变。如图 2 中的孔开在开槽特征的侧面上,该孔特征的拓扑结构、面的几何属性均未发生任何改变。

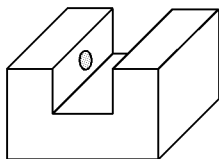


图 2 孔特征开在开槽特征的侧面上

2) 拓扑结构不变,面的几何属性约束改变。仍以图 2 为例,开孔后,开槽特征与孔特征相交的侧面多了内环,其面的几何约束改变,但该开槽特征的拓扑结构未发生变化。

相交特征中拓扑结构发生改变时,其几何约束也必然发生变化。这样的变化情况很多,且不具备统一的描述规则,难以详尽描述。本文列举出三类比较常见的情况予以描述:特征面分裂、连接边丢失以及特征面丢失。图 3 给出这三类改变的示例,其中图 3(a) 中凹槽的底面被长方体块分裂成两个平面;图 3(b) 中凹槽的底面与一个侧面之间的连接边丢失;图 3(c) 中凹槽与开槽相交,凹槽的一个侧面丢失。

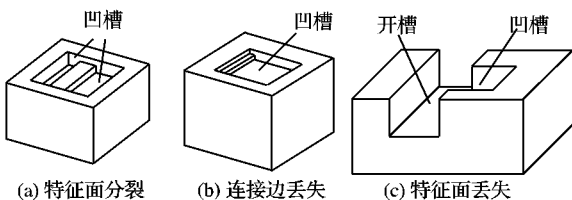


图 3 相交特征中拓扑约束发生改变的情况

## 2 基于拓扑和几何约束的相交特征识别算法

### 2.1 镜面的定义

两个面,如果满足边界相同、面方程相同、面的法向相反,称其为一对镜面,镜面中的两个面互为镜像。如图 4 中所示的面  $f_1, f_1'$  为一对镜面,其中  $f_1$  是  $f_1'$  的镜面,同时  $f_1'$  也是  $f_1$  的镜面。实体模型中镜面的添加都是成对添加的,因一对镜面

的布尔和为零,给实体模型添加一对镜面对实体模型的三维形状不会带来任何改变。

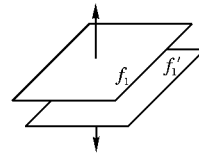


图 4 一对镜面示例

### 2.2 相交特征的识别

在上述分析的基础上,本文对相交特征识别的思路是:

在基于子图匹配的基础上,应用 AAG 和 GRRG 首先识别生成相交特征过程中拓扑结构未发生变化的简单特征,再识别生成相交特征过程中拓扑结构发生变化的简单特征。每识别出一个简单特征后,将其修补成相应的简单特征实体并从实体模型中移出,再进行下一个特征的识别。直至最后无新的简单特征可识别。

#### 2.2.1 拓扑约束未发生改变的简单特征的识别

对于生成相交特征过程中拓扑约束未发生改变的简单特征,其识别步骤如下:

1) 通过 AAG 子图匹配算法,在实体模型中进行拓扑约束查找,寻找在相交特征生成过程中,拓扑约束未发生改变的简单特征;

2) 对查找到的子图进行面的几何约束验证与修补;

3) 通过添加镜面操作,将其修补为对应于该类简单特征的完整的特征实体;

4) 将该特征实体从实体模型中移除。

步骤 1 拓扑约束查找。

根据前述三类简单特征所对应 AAG,依次在实体模型 AAG 中查找匹配的子图,记为  $G$ 。子图匹配算法可参考<sup>[5-6]</sup>,子图匹配查找时,先查找凹槽特征,后查找开槽特征。

步骤 2 面的几何约束验证与修补。

对于找到的子图  $G$ ,需对其进行几何属性约束的验证与修补,确保该子图在实体模型中表示简单特征。

① 几何关系约束的验证。直接舍弃不满足面的几何关系约束的子图  $G$ 。

a) 将子图  $G$  所对应的 GRRG 子图与相应简单特征的 GRRG 比较以进行验证。

b) 满足简单特征 GRRG 的子图  $G$  进入下一步操作,否则舍弃不满足简单特征 GRRG 的  $G$ 。

② 几何属性约束的验证与修补。将子图  $G$  进行面的几何属性约束的验证与修补。对  $G$  中的每一个面  $f_i$  执行下列操作。

a) 检查  $f_i$  的类型,添加镜面将  $f_i$  转化为标准面  $f_i'$  转化为标准面后,其部分边可能丢失,影响  $G$  的拓扑约束。

b) 对  $G$  进行拓扑约束验证,若满足简单特征的拓扑约束,则对  $G$  中的下一个面进行处理;否则舍弃  $G$ 。

步骤 3 简单特征实体的生成。

采用添加镜面的方法将简单特征构成简单特征实体,孔特征的特征实体为一圆柱体,开槽与凹槽的特征实体均为长方体,三类简单特征实体的构造方法如下。

① 孔特征。如图 5 所示,为孔添加两对镜面  $f_1$  与  $f_1', f_2$  与  $f_2'$ 。其中,面  $f_1', f_2'$  与孔特征组成了一个封闭的圆柱体,该圆柱体中的面的朝向都朝内。

② 开槽特征。为开槽添加 3 对镜面,图 6 中所示的  $f_1, f_1', f_2, f_2', f_3, f_3'$ 。其中面  $f_1', f_2', f_3'$  与开槽特征组成了一个封闭的长方体,该长方体中的面的朝向都朝内。

③ 凹槽特征。如图 7 所示,为凹槽特征添加一对镜面  $f_1$ 、 $f_1'$ 。其中面  $f_1'$  与凹槽特征组成一个封闭的长方体。

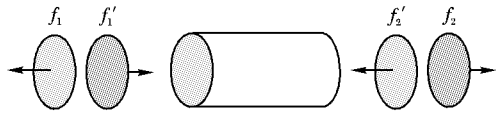


图 5 孔特征实体的生成

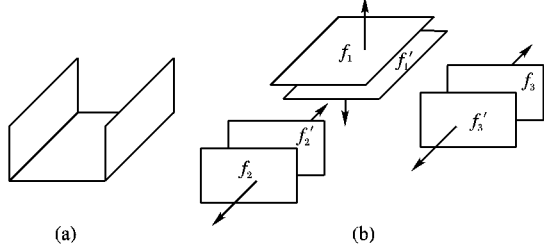


图 6 开槽特征实体的生成

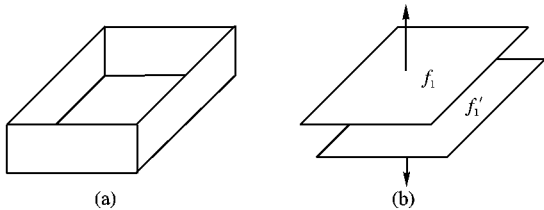


图 7 凹槽特征实体的生成

简单特征实体的构造操作通过实体模型 AAG 中节点的添加与合并完成。每添加一对镜面,相当于在实体模型的 AAG 中增加两个节点,这两个节点表示添加的镜面,镜面之间具有镜像关系;根据镜面的边界,将其连入 AAG,检查镜面与其相邻的面是否能合并,能则进行合并,合并后的新面与原镜面之间的镜像关系会保留。

步骤 4 简单特征实体的移除。

在实体模型 AAG 中移除生成的简单特征实体 AAG 子图,放到已识别出的简单特征子图集合中,用于生成相交特征,每一次的特征实体移除都会简化实体模型的复杂程度。

2.2.2 拓扑约束发生改变的简单特征的识别

拓扑约束发生改变的简单特征的识别,其思路是根据简单特征拓扑约束的改变类型,采用不同的方法进行识别及修复,下面分类说明发生各类拓扑约束改变的简单特征的识别。

1) 特征面分裂的识别。

在 GRRG 中查找共面的面,在实体模型的 AAG 添加镜面合并这些面。从合并后的新面出发,看能否找到拓扑约束不变的简单特征,能则问题转为拓扑约束不变的简单特征的识别;否则取消这次添加镜面操作。

2) 连接边丢失的识别。

特征的连接边丢失,其 AAG 发生变化而 GRRG 没有改变(这里假设简单特征发生连接边丢失时,特征面的个数并未减少),通过在实体模型中进行 GRRG 子图查找,然后在 AAG 进行对应的查找修复即可。具体实现如下。

①在实体模型 GRRG 中查找满足简单特征几何关系约束的 GRRG 子图。这样的子图可能很多,通过定义图的度数来给减少查找的复杂度。图的度数是指图中任意两个节点之间最短路径的最大值,相邻节点之间的距离为 1。图的度数可由实体模型 AAG 计算出,可以设定图的最大度数来减少查找次数,比如设定图的最大度数为 4。

②找到 GRRG 子图在实体模型 AAG 中对应的子图,对照简单特征 AAG 图,对两个丢失连接的面分别添加镜面使其面延伸相交,从而将其转化拓扑约束不变的简单特征的识别。注意,延伸面不能与实体模型中已经存在的面相交,否则这次

面的延伸不可取。

3) 特征面丢失的识别。

特征面作为图表示中的节点,特征面丢失即为图中节点的丢失,直接通过添加节点来恢复丢失面的方法比较繁琐。实际应用中,丢失的特征面基本上都可通过对发生其他类型变化的简单特征的识别来间接修复。

3 相交特征的生成

检查移出的简单特征实体之间的连接关系。定义了两类简单特征实体之间的连接方式——面相连和体相交。简单特征实体面相连是指两个简单特征实体有特征面具有镜像关系。图 8(a)中的圆柱体底面在长方体的顶面上,圆柱体与长方体面相连。简单特征实体体相连是指两个简单特征实体发生相交,在体积上发生重叠。图 8(b)即为两个长方体体相交。

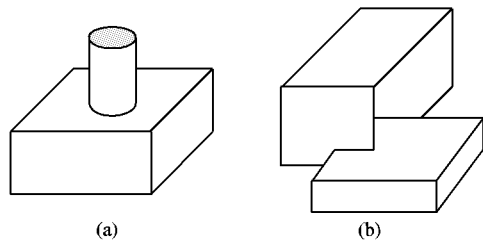


图 8 简单特征实体相连

相交特征中简单特征实体之间的相连方式很容易通过镜面判断。如果特征实体 A 中存在一个面  $f_a$  与特征实体 B 中的一个面  $f_b$  具有镜像关系,则称实体 A 与实体 B 面相连;如果特征实体 A 与特征实体 B 所表示的子图在实体模型 AAG 中原来具有相连关系,而其特征实体的面之间不具有镜像关系,则实体 A 与实体 B 体相交。这样识别出所有相连的简单特征实体,这些特征实体组合成相交特征。

4 结语

本文提出基于拓扑约束和几何约束的三维实体模型相交特征识别方法,该方法综合利用特征的几何和拓扑信息,通过相交特征中的简单特征的变化分类,识别出发生各类改变的简单特征并构成简单特征实体,然后以简单特征实体相连的方式表示来表示相交特征。进一步的工作包括由更多类型简单特征的生成的相交特征识别,及其他相交方式的进一步分析与识别。

参考文献:

[1] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. 计算机学报, 1998, 21(3): 281-288.  
 [2] HAN J H. Survey of feature research, IRIS-96-346 [R]. Los Angeles: University of Southern California, 1996.  
 [3] BOJAN B, NENAD N, ZORAN M. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition [J]. Computers in Industry, 2008, 59 (4): 321-337.  
 [4] JOSHI S, CHANG T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from 3-D solid model [J]. Computer-Aided Design, 1988, 20(2): 58-66.  
 [5] CHUANG S H. Feature recognition from solid models using conceptual shape graphs [D]. Tempe, AZ, USA: Arizona State University, 1991.  
 [6] SASHIKUMAR V, MILIND S, VINAY K. A graph-based framework for feature recognition [C]// Proceedings of the 6th ACM symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM Press, 2001: 194-205.