

一种属性图同构的三维 CAD 模型局部匹配算法

张开兴, 张树生, 白晓亮, 李亮

(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, 710072, 西安)

摘要: 由于三维模型整体检索算法无法实现局部结构的匹配, 因此提出一种基于 B-Rep 模型属性邻接图的局部匹配算法, 通过提取模型的 B-Rep 信息, 将局部结构和 CAD 模型分别用属性邻接图表示. 根据面和边的属性, 先在 CAD 模型中查找与局部结构属性相同的边, 再对这些边进行组合, 将局部结构从 CAD 模型中分离出来. 通过比较欲检索的局部结构和从 CAD 模型中分离出的局部结构的邻接矩阵是否相等, 可以判断 CAD 模型中是否含有该局部结构. 实验表明, 该算法实现了 CAD 模型局部结构的匹配, 检索效率能够满足工程检索的要求.

关键词: B-Rep 模型; 局部匹配; 属性邻接图; 邻接矩阵

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0056-05

Partial Matching Algorithm of 3D CAD Models Based on Attributed Graphs Isomorphism

ZHANG Kaixing, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, LI Liang

(The Key Laboratory of Contemporary Designing and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Since the current global-shape-based 3D model retrieval algorithm cannot conduct partial matching, a new approach based on attribute adjacent graph of B-Rep models is proposed. By extracting B-Rep information of the models, the sub-part and the CAD model are represented by the attribute adjacent graph. According to the attribute of the CAD model surfaces and edges, the edges whose attributes get similar to the sub-part are identified, and then new sub-part is separated by combining these edges. Therefore, whether CAD model contains the objective sub-part is estimated by comparing their corresponding adjacent matrixes. The experimental results show that this method realizes the partial matching of CAD model, and the efficiency meets the requirement of engineering retrieval.

Keywords: B-Rep model; partial matching; attribute adjacent graph; adjacent matrix

在通用领域, 基于内容的三维模型检索技术已突破了传统的关键词检索的局限, 可直接利用三维模型特征来建立索引和完成检索. 经过多年的研究, 已出现了众多的检索算法, 根据模型表示方法的不同, 可将这些方法分为^[1]全局特征的方法、制造特征识别的方法、图的方法、产品信息的方法和计算机视觉的方法. 基于内容的三维模型检索在产品概念设计、详细设计、工艺/工装设计等各阶段, 为设计人员

提供了一种全新的可视化检索手段, 极大地促进了产品相关信息的有效重用. 但是, 在 CAD 领域, 设计人员往往更关注局部相似性的比较, 只有达到局部特征级别的检索才能更好地实现参考并重用已有设计模型的目的, 因而模型局部相似性匹配较之整体相似性匹配在设计和工艺领域的实用价值更大, 但在实现技术上难度也更大, 是目前研究的热点和难点. 文献[2]使用尺度空间分解的特征提取方法,

自动分割三维模型,为能够用于检索、分类、匹配的特征实现局部匹配.文献[3]提出了一个基于多边形网格的局部相似性匹配算法,利用图对模型进行分割,并运用图匹配的方法实现了模型的局部相似性匹配.文献[4]通过面特征对图的顶点进行了有效细分和快速剪枝搜索,实现了模型的匹配.

现有的局部匹配算法中的三维模型,一般由三角网格组成,而工程中的 CAD 模型主要是由曲线和曲面组成.以 B-Rep 为主要的表达方式,其局部结构一般由一个尺度函数进行自动分割得到,但分割的结果很难具有工程语义信息.针对这些问题,本文以 CAD 模型的 B-Rep 表示为基础,通过交互选取或者自定义的方式获取欲检索的局部结构,然后将局部结构和 CAD 模型分别用属性邻接图来表示,最后通过子图同构的方法来实现 CAD 模型的局部匹配.

1 基于属性图同构的局部匹配算法

1.1 CAD 模型与局部结构的表示

模型的 B-Rep 表示是以物体边界作为基础的定义和描述几何形体的方法,并能给出完整的和显式的界面描述,用这种方法表示的形体记录了几何元素的几何信息及其拓扑信息,它的优点在于形体的点、边、面等几何元素是显式表示的,比较容易确定几何元素之间的关系.如果用这些信息来直接评价 2 个模型的相似程度必然是有利且可信的,因此实验所用 CAD 模型是以 B-rep 来表示的. STEP (Standard Exchange of Product Data Model) 标准已经被 UG、CATIA 等大型 CAD 软件普遍接受,STEP 中性文件也采用 B-Rep 的数据结构形式,因此本文将模型的 STEP 文件作为输入,来实现模型的局部结构匹配.

通过提取三维 CAD 模型中的 B-Rep 信息,将模型用属性邻接图来表示.属性邻接图^[5]是一种用于描述零件几何拓扑信息的图结构,定义为 $G = \langle V, E, T \rangle$,其中: V 表示结点的集合,对于零件的每个表面 f_i 都有唯一的节点与之相对应; E 表示边的集合,对于零件的每 2 个相邻表面 f_i, f_j 都有唯一的边与之对应(不考虑节点含有直接与自身相连的边). T 是关于节点集合与边集合相连关系的集合,对于 E 中的每个边,都有一个属性值与之对应.首先,用邻接矩阵来表示属性邻接图中面节点和边的拓扑关系,将所有顶点的信息组织成一个顶点表,利用一个矩阵来表示各顶点之间的邻接关系,然后

根据 CAD 模型的几何和拓扑信息,定义相应的面和边的属性.面的属性信息包括面的类型和面的指向,边的属性除了包括边的凹凸性外,还包括边的曲线类型、边的邻接面夹角及边的 2 个邻接面属性.构建属性邻接图的时间复杂度和空间复杂度均为 $O(n^2)$,其中 n 为属性邻接图节点的个数,由 CAD 模型构建属性邻接图的步骤如下.

步骤 1 遍历 CAD 模型中的每一个面,对应创建一个属性邻接图顶点,同时提取面的属性作为其对应属性邻接图顶点的属性.

步骤 2 对 CAD 模型中的每 2 个面,识别两者之间的连接关系,同时提取邻接面的相邻边的属性作为其对应属性邻接图边的属性.

对于面的属性,将面的类型分为平面、圆柱面、圆锥面、球面、圆环面等规则曲面.面的指向定义为面的方向和表面方向之间的关系,表面方向如图 1 中实线直箭头所示,面的方向如图 1 中虚线直箭头所示.当面和曲面的方向相同时,面的指向为真,不相同为假.如图 1 所示,圆柱面的指向为真,圆柱孔的指向为假,通过面的指向可以将它们进行有效区分.

对于边的属性,将边的类型分为直线、圆形曲线、椭圆形曲线、双曲线、抛物线、其他曲线等,边的凹凸性表示 2 个邻接面的连接属性.对边的凹凸性的判别,现有的方法大多数是将边的凹凸性分为凹边和凸边,但对于 2 个相切邻接面的凹凸性判别,现有的方法有时会出现判别错误,因此本文将边的凹凸性分为凸边、凹边和平滑边,如图 2 所示.边的邻接面夹角是指在两邻接面 f_i, f_j 上分别任取一点,得到该点在对应面上的法矢为 $\mathbf{n}_i$ 和 $\mathbf{n}_j$ (如果 f_i 或 f_j 不是平面,则 $\mathbf{n}_i$ 或 $\mathbf{n}_j$ 沿中心轴的方向).边的邻接面的夹角为

$$\theta = \arccos\left(\frac{|\mathbf{n}_i \mathbf{n}_j|}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{n}_j|}\right)$$

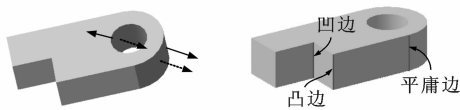


图 1 面的指向

图 2 边的凹凸性

1.2 局部匹配算法

为实现局部匹配,在 CAD 模型和局部结构分别用属性邻接图表示完成后,将利用子图同构算法来实现在属性图中寻找特定子属性图.下面,给出图

和子图同构的定义.

定义 1 图同构. 对于 2 个图 $G=(V,E), G'=(V',E')$, 如果存在一一映射函数 $f: v_i \rightarrow v'_j$ 且 $e=(v_i, v_j)$ 是 G 中的 1 条边, 当且仅当 $e'=(v'_i, v'_j)$ 是 G' 的 1 条边, 则称 G, G' 是同构的.

定义 2 子图同构. 对于 2 个图 $G=(V,E), G'=(V',E')$, 如果 G' 有子图 $G''=(V'',E''), V'' \subseteq V', E'' \subseteq E'$, 使得 G'' 与 G 同构, 则称 G, G' 是子图同构的.

子图同构是指求 1 个图的子图, 该子图与另外 1 个图同构. 判断 2 个图是否同构, 本质上就看是否存在 2 个图顶点之间的 1 个映射, 使得 2 个图的边在该映射下也保持对应.

为了提高算法的效率, 将充分利用 CAD 模型中面、边的属性来提高算法的效率. 由于在边的属性定义中包含了面的属性, 因此在匹配过程中将利用边的属性. 匹配算法的步骤如下.

步骤 1 通过交互选取或者自定义形成欲检索局部结构, 该局部结构面的集合为 V_α , 边的集合为 E_α , 局部结构的邻接矩阵为 M_α ; CAD 模型的面的集合为 V_β , 边的集合为 E_β , CAD 模型的邻接矩阵为 M_β . 其中, M_α 和 M_β 为实对称矩阵, V_α 和 V_β 的个数为矩阵的行数或列数, E_α 和 E_β 的个数为矩阵中各元素和的 1/2.

步骤 2 取 $u_i \in E_\alpha, i=1, 2, \dots, m$ (m 为局部结构属性图中边的个数). 遍历待检索模型中的每一条边 v_j , 其中 $v_j \in E_\beta, j=1, 2, \dots, n$ (n 为待检索模型属性图中边的个数), 在 E_β 中查找与边 u_i 属性相同的所有边, 如果存在则存入集合 S_i 中, $i=1, 2, \dots, m$ (m 为集合元素的个数, 与局部结构属性图中边的个数相同). 如果在 E_β 中没有与边 u_i 属性相同的边, 则该模型中不含有欲检索的局部结构. 在将边存入 S_i 中时, 根据边的邻接面的对应关系, 应使存入集合中的边所邻接的面的存放顺序与 u_i 所邻接的面的顺序对应一致.

步骤 3 任取 S_i 中的 1 条边, 形成 1 个边的组合, 提取出组合中各边所邻接的面, 并去除重复的面, 形成面的集合 V_γ .

步骤 4 如果 V_α 和 V_γ 的个数相同, 则转到步骤 5, 否则转到步骤 3, 继续下一个组合.

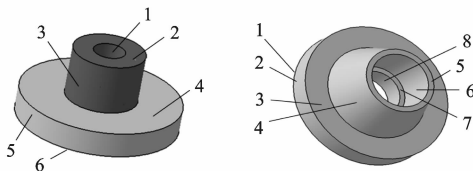
步骤 5 将由 V_γ 组成的局部结构从 CAD 模型中分离出来, 并将分离出来的局部结构的邻接矩阵表示为 M_γ . 如果欲检索的 M_α 和从 CAD 模型中分离出的 M_γ 相等, 则该检索模型中含有欲检索的局部结构, 否则返回步骤 3, 继续下一个组合.

2 算法验证与实验分析

为了验证本文算法, 以 Microsoft Visual Studio 2008 为集成开发环境, 以 Open CASCADE 为几何平台, 自主开发了 1 个原型系统, 该系统可以实现草图检索、整体检索、局部检索等功能. 原型系统库中的模型主要来自于普渡大学建立的工程标准模型库^[6], 构建了 1 个以 STEP 文件表示的三维 CAD 模型库和 1 个典型结构库. 三维 CAD 模型库包含了盘类、轴类、箱体类、齿轮类等共计 400 多个典型的 CAD 模型, 而且模型的复杂程度不同, 其中 B-Rep 模型面的数量从几个到几百个不等. 局部结构库包含了 80 个典型结构, 覆盖了从简单的仅有几个面构成的孔、槽等基本特征, 以及到复杂的由数十个面构成的用户自定义结构.

如图 3a 所示, 用户从 CAD 模型上交互选取由面①、②、③组成的带孔的圆柱体作为欲检索的局部结构, 图 3b 为被检索模型. 为了判定被检索模型中是否还有欲检索的局部结构, 按照算法的步骤 1, 首先得到局部结构属性邻接图的邻接矩阵 A 和被检索模型的邻接矩阵 B , 即

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



(a)局部结构 (b)被检索模型

1~8: 表示 CAD 模型中不同的面

图 3 局部结构及被检索模型

为了表达方便, 用 2 个邻接面顶点的编号来表示边, 局部结构由①②、②③两条边组成, CAD 模型由①②、②③、③④、④⑤、⑤⑥、⑥⑦、⑦⑧、⑧①等 8 条边组成. 根据本文 1.2 节中的算法步骤 2, 在 CAD 模型各边中查找与局部结构各组成边属性相同的边, 得到与①②、②③属性相同的边的集合分别为 $S_1=\{\textcircled{6} \textcircled{5}, \textcircled{8} \textcircled{1}, \textcircled{8} \textcircled{7}\}, S_2=\{\textcircled{1} \textcircled{2}, \textcircled{3}$

②}. 在集合 S_1 和 S_2 中任取 1 个边⑥ ⑤ 和① ②组成 1 个组合,对组合中所有边的顺序提取出所有的面,形成面顶点的集合 $\{⑤,⑥,①,②\}$,因为这个组合的面的个数与选取的局部结构的面的个数不同,不可能同构,所以进行下 1 个边⑧ ① 和① ② 的组合,按顺序提取出所有的面,并去除重复的面,得到集合 $\{⑧,①,②\}$. 此时,集合中面的个数和局部结构的面的个数相同,在被检索模型中分离出由这些面组成的局部结构,得到分离出的局部结构的邻接矩阵与欲检索的局部结构的邻接矩阵相同,因此判定在被检索模型中含有欲检索的局部结构.

为了验证算法的有效性,将本文算法与文献[4]的算法进行了对比实验,比较了 2 种算法的综合性能. 图 4 和图 5 列出了 2 种常见的 CAD 模型局部结构用本文算法的检索实验结果. 图 4a 所示为交互的从模型上选取 1 个局部结构进行检索,在 CAD 模型库中包含该局部结构的 CAD 模型共有 24 个,并全部被准确地检索到. 实验选取了 6 个具有代表性的 CAD 模型进行显示,如图 4b~图 4g 所示. 由于文献[4]的算法并没有考虑面的指向和边的凹凸性等属性,因此不能对包含圆柱面或圆柱孔等旋转曲面,以及拓扑结构相同的局部结构进行有效的区分,检索的准确度也不如本文的算法. 图 5 所示为检索结果在原型系统中的显示,从局部结构库里选择 1 个自定义的局部结构进行检索,在模型库中包含该局部结构的 CAD 模型共 6 个,这 6 个模型可全部被准确地检索到.

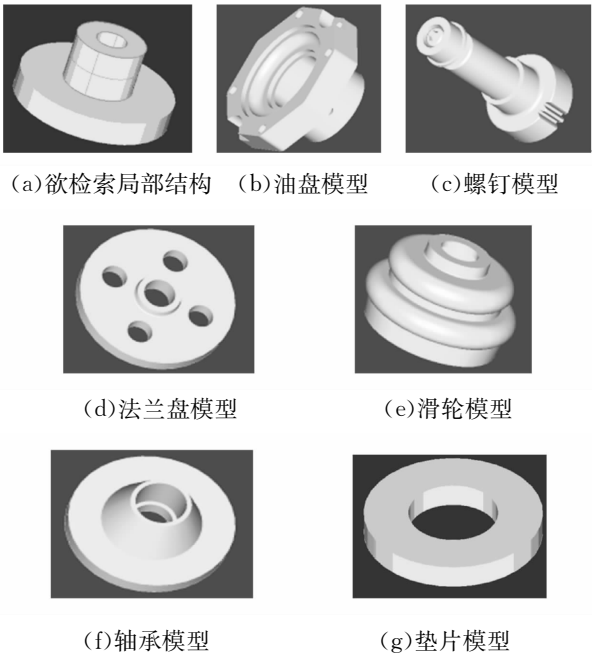
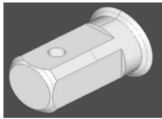
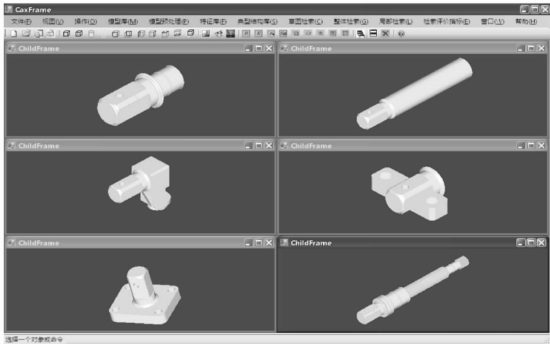


图 4 局部结构检索实验 1



(a)欲检索局部结构



(b)检索结果

图 5 局部结构检索实验 2

本文算法和文献[4]方法在时间复杂度上是相同的,但本文同时考虑了面和边的属性,在查找属性相同的边时,将大大减少属性相同边的集合,从而减少了后续的搜索匹配时间. 如表 1 所示,通过对 80 多个局部结构分别在 CAD 模型库中进行局部检索,统计检索时间的平均值 t_1 及与每个模型进行匹配的平均时间值 t_2 ,得到了本文与文献[4]方法的对比分析数据. 表 2 为本文与文献[4]方法对图 4、图 5 中的实验进行检索的执行时间 t_s . 从表 1、表 2 的对比分析数据中可以看出,本文方法在时间效率方面要明显高于文献[4]的方法.

表 1 局部结构平均检索执行时间

检索方法	t_1/s	t_2/s
文献[4]	162.669	0.396 7
本文	44.875	0.109 5

表 2 实验执行时间

实验	t_s/s	
	文献[4]算法	本文算法
1	159.473	36.768
2	144.987	43.102

3 结 论

本文给出一种基于属性图同构的三维模型局部结构匹配算法,将局部结构和 CAD 模型分别用属

性邻接图来表示,利用 CAD 模型面和边的属性,通过一系列的处理得到从 CAD 模型中分离出的局部结构.最后,通过比较 2 个局部结构属性邻接图的邻接矩阵是否相等,判断出模型中是否含有该局部结构.在评价模型的相似性时,本文综合考虑了多种影响因素,使得算法对模型具有平移、旋转、缩放不变性.本文算法允许用户通过交互式方法或自定义方法选取自己需要检索的局部结构,且算法的处理对象是工程界广泛应用的以 STEP 文件表示的模型,因此具有一定的工程应用价值.

参考文献:

- [1] IYER N, JAYANTI S, LOU K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37 (5):509-530.
- [2] BESPALOV D, REGLI W C, SHOKOUFANDEH A. Local feature extraction and matching partial objects [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38 (9): 1020 - 1037.
- [3] MARINI S, BIASOTTI S, FALCIDIENO B. Partial matching by structural descriptors [EB/OL]. [2007-08-31]. <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/651>.
- [4] 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 Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. Local matching of 3D CAD model based on subgraph isomorphism [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008,20(8):1078-1084.
- [5] JOSHI S, CHANG T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from 3D solid model [J]. *Computer-Aided Design*, 1988,20(2):58-66.
- [6] JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38 (9):939-953.

(编辑 管咏梅)