

面向重用的三维 CAD 模型检索算法

白晓亮, 张树生, 张开兴

(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: 针对现有 CAD 领域的检索算法对模型的局部细节特征描述不足的现状, 提出了一种基于最大公共子图的三维 CAD 模型检索算法, 通过提取 CAD 模型的 B-Rep 信息, 将模型用属性邻接图来表示. 根据如果 2 个 CAD 模型存在相似的特征或局部结构, CAD 模型所对应的属性邻接图应存在公共子图的原理, 通过检测属性邻接图中的公共子图, 得到了 2 个与 CAD 相似的局部细节特征, 并利用这 2 个相似的局部细节特征对 CAD 模型进行了相似性评价. 实验表明, 该方法能够实现三维 CAD 模型检索, 且检索的效率能够满足工程检索的要求, 因此可以实现 CAD 模型设计和制造知识的重用.

关键词: 重用; 最大公共子图; 属性邻接图; 模型检索

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0074-05

Algorithm for 3-Dimensional CAD Model Retrieval Based on Reuse

BAI Xiaoliang, ZHANG Shusheng, ZHANG Kaixing

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

Abstract: Since the current retrieval algorithms cannot describe local features of CAD models detailed in the CAD field, a new one of 3D CAD model retrieval based on maximum common sub-graph is proposed. Extracting B-Rep information of CAD models, the models are represented by the attribute adjacent graph (AAG). If two CAD models contain similar sub-parts, the corresponding AAGs ought to have common subgraph. According to this principle, the similar sub-parts are obtained by detecting the common subgraph of AAG. The similarity of the CAD models is evaluated by comparing the similar sub-parts. The experimental results show the efficiency of 3D CAD model retrieval to meet the requirements of engineering retrieval and reuse of design and manufacture.

Keywords: reuse; maximum common subgraph; attribute adjacent graph; model retrieval

目前, 基于三维模型的产品设计与制造已成为我国制造业的主流模式, 由于产品三维模型具有可视化、数字化和虚拟化等特点, 基于三维模型的产品设计与制造已经成为产品开发各环节(CAD、CAE、CAPP、CAM 等)的基础载体. 研究和统计分析表明, 在新产品开发中, 约 40% 是重用过去的部件设计, 约 40% 是对已有设计部件的微小修改, 而只有约 20% 是完全新的设计^[1]. 因此, 如何方便、准确、

快速地获取已有产品三维模型的相似性设计成果, 并加以有效重用, 是提高设计效率、缩短产品开发周期的关键技术之一. 通过基于内容的检索技术可以实现企业产品三维 CAD 模型资源的多粒度、精确化、个性化快速聚类, 为产品设计过程中各类设计成果的重用提供一种全新的支持手段.

目前, 从总体上来说, 具有创新性的、专门针对 CAD 模型特点而设计和提出的算法较少, 大多采用

直接将通用领域的三维模型检索算法应用于CAD模型的检索,其思路就是将CAD模型从B-Rep格式离散化为三角网格形式,直接调用通用领域较为典型的算法进行检索.充分考虑CAD模型数据的特殊性,以及机械设计、制造领域的特定信息和知识,具有针对性设计的典型算法有属性图的算法^[2]、骨架图的算法^[3]和神经网络聚类的算法^[4].这些方法更侧重于CAD模型的整体相似性,但是对模型的局部细节特征相似性描述不足.然而,在设计和制造过程中,企业往往更关注模型的局部细节特征,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的模型.因此,本文将通过CAD模型所包含的局部细节特征对CAD模型进行相似性评价,从而实现了对于CAD模型相关设计和制造知识的重用.

1 最大公共子图的检索算法

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.在属性邻接图中,图的每一个顶点对应CAD模型的一个面,而面的属性是将面的类型、方向等作为顶点的属性.将2个面之间的临界关系作为图的一条边,把边的类型和凸凹性作为边的属性.通过属性邻接图表示方法,CAD模型相似性的比较问题就转换成检测属性邻接图公共子图的问题.因此,下面给出公共子图和最大公共子图的定义.

定义1 公共子图. 给定图 G 、 G_α 和 G_β ,若图 G 与图 G_α 子图同构,同时图 G 也与图 G_β 子图同构,则称图 G 是图 G_α 和图 G_β 的公共子图.

定义2 最大公共子图. 给定图 G_α 和 G_β ,若图 G 是图 G_α 和图 G_β 的公共子图,且不存在图 G' ,图 G' 也是图 G_α 和图 G_β 的公共子图,图 G' 的节点个数大于图 G ,则称图 G 是图 G_α 和图 G_β 的最大公共子图.

给定2个CAD模型,它们对应的特征或者局部结构可以通过查找2个属性邻接图的公共子图来获得.检测2个图的最大公共子图的问题是一个NP(Non-deterministic Polynomial)完全问题,算法的复杂度非常高,并且随着图的节点数增加,计算时间会爆发性增长.目前,求解的算法总体上可以分为:①基于回溯搜索策略,典型的代表是McGregor算法^[5];②基于最大团检测,典型的代表是Durand-Pasari算法^[6]和Balas-Yu算法^[7].将这3种求解算法应用到三维CAD模型匹配中时,所存在的主要问题有:①对于给定的2个三维CAD模型,其相似

的局部结构可能有多个,它们对应的属性邻接图也将有多个公共子图,因此要求检测算法不仅要找到二者的最大公共子图,还需要枚举出其所有的其他公共子图,而上述3种求解算法均只能检测最大公共子图,而不能列出所有的公共子图;②三维CAD模型的局部结构是由相互连接的面组成,由于不存在孤立的面,因此其对应的属性邻接图中的子图必定是连通的.由上述算法检测到的最大公共子图可能是连通图,也可能是非连通图,如果检测到的子图是非连通图,所对应的三维CAD模型的局部结构就没有实际意义.因此,现有的几种典型的最大公共子图的匹配算法均不能很好地解决三维CAD模型的匹配问题.为此,本文设计了一种改进的最大公共子图的检测算法.该算法满足以下条件:①可以检测出2个属性邻接图的所有公共子图;②保证所有检测到的公共子图都是连通图.

本文设计的最大公共子图检测算法分为2个步骤:①给定2个属性邻接图构建一个特定的关联图;②通过检测关联图的最大团来实现最大公共子图的检测.

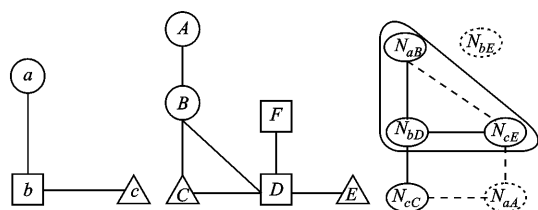
1.1 关联图

给定图 G_1 、 G_2 ,其顶点集为 V_1 、 V_2 ,设二者的关联图为 H_V ,则构建关联图的具体算法步骤如下.

步骤1 对图 G_1 中的任意一个顶点 $v_i \in V_1$ ($1 \leq i \leq n$),遍历图 G_2 中每一个顶点 $u_j \in V_2$ ($1 \leq j \leq m$),组成顶点对 (v_i, u_j) ,若 v_i 与 u_j 具有相同的属性值,则将 (v_i, u_j) 加入 H_V 的顶点集 V_H 作为一个顶点.

步骤2 任取 H_V 中的2个顶点 $u_H = (u_1, u_2)$, $v_H = (v_1, v_2)$,若 $u_1 \neq v_1$, $u_2 \neq v_2$,且图 G_1 中的边 $e_1 = (u_1, v_1)$ 与图 G_2 中的边 $e_2 = (u_2, v_2)$ 具有相同的属性值,或图 G_1 中的顶点 u_1 和 v_1 ,图 G_2 中的顶点 u_2 和 v_2 各不相邻,则构造一条边 $e_H = \langle u_H, v_H \rangle$,加入到关联图 H_V 的边集 E_H 中并作为它的一条边.将上述2种情况下构造的边分别称为连通边和非连通边.

关联图的构造如图1所示,图中的圆、正方形和三角形节点分别表示属性不同的顶点,图1a和图1b分别表示图 G_1 、 G_2 .根据步骤1, H_V 由顶点 N_{aB} 、 N_{aA} 、 N_{bD} 、 N_{bF} 、 N_{cC} 和 N_{cE} 组成,根据步骤2来构造关联图的边,顶点之间的连通边用实线表示,非连通边用虚线表示. H_V 如图1c所示,三角形内的顶点集合称为 H_V 的最大团,关联图中的最大团对应于图 G_1 、 G_2 的最大公共子图,因此检测公共子图的问题就转换为检测关联图最大团的问题.



(a)图 G_1 (b)图 G_2 (c)关联图

a, b, c :图 G_1 的顶点; A, B, C, D, E, F :图 G_2 的顶点

图1 关联图构建示意图

1.2 最大团检测

最大团检测的一个简单枚举算法由 Bron 和 Kerbosch 提出(简称为 BK 算法^[8]),该算法是目前最为稳定和快速的枚举算法,能够检测出任意 2 个图的所有最大公共子图。

定义 3 对于给定图 $G=(V, E)$, $V=\{1, \dots, n\}$ 是图 G 的顶点集, $E \subseteq V \times V$ 是图 G 的边集, 图 G 的团就是一个两两之间有边的顶点集合. 如果一个团不被其他任一团所包含, 即它不是其他任一团的真子集, 则称该团为图 G 的极大团, 而顶点最多的极大团即为图 G 的最大团。

BK 算法枚举关联图的所有最大团, 这些团中一部分对应于图的连通公共子图, 另一部分对应于非连通公共子图. 三维 CAD 模型的局部结构转化后对应的子图是连通子图, 因此在匹配相似局部结构时只需检测连通公共子图, 而无需关注非连通公共子图. 如果检测到的最大公共子图是非连通的, 其对应的局部结构就没有实际意义, 反而会导致误匹配. 因此, 必须改进 BK 算法, 使之只检测对应于连通公共子图的团, 排除对应于非连通公共子图的团, 并以此来提高算法的效率。

预先设置 5 个集合: ①代表当前团的顶点集 C ; ②能够被直接添加到当前团的顶点集 P , 该集合中的任意一个顶点与最后加入当前团的顶点通过连通边相连; ③不能够被直接添加到当前团的顶点集 D , 该集合中的任意一个顶点与最后加入当前团的顶点通过非连通边相连; ④不能够被添加到当前团的顶点集 S ; ⑤任意顶点的邻接点集合 N . 算法初始时, P 包含图中所有顶点, C, D 和 S 为空. 如果 P 为空且 S 也为空, 则一个团被发现, 否则, 对 P 中的每一个顶点进行处理. 首先, 将该顶点从集合 P 中移除, 然后将集合 P 拷贝给集合 P' , 集合 D 拷贝给集合 D' , 集合 S 拷贝给集合 S' , 接着找出该顶点的所有邻接点构成集合 N . 对集合 D' 中的每一个顶点, 根

据该顶点是否与 u_i 通过连通边相连来更新 P' 和 D' . 若 C 为空的话, 对 N 中的每一个顶点可根据是否与 u_i 通过连通边相连来更新 P' 和 D' . 最后, 将该顶点加入到集合 C , 并将集合 P', D', S' 与 N 求交, 开始新的递归调用. 当一次递归调用到达递归树的叶子级别后, 一个团被找到, 则最后加入团的顶点被加入到集合 S 中。

1.3 算法复杂度分析及相似度计算

由于最大公共子图问题是 NP 完全问题, 所以现有的求解算法的时间复杂度一般都比较低, 并且算法性能不稳定. 本文算法在最好情况下的时间复杂度为 N_1 , 在最差情况下的时间复杂度为 $(N_2 + 1)! / (N_2 - N_1 + 1)!$, 其中 N_1 为图 G_1 的顶点个数, N_2 为图 G_2 的顶点个数, 且 $N_2 \geq N_1$.

单纯从理论上的极端情形分析, 本文算法与现有的 McGregor 算法、Durand-Pasari 算法以及 Balas-Yu 算法相比, 并无任何优势. 但是, 由于本文算法在实施最大连通团检测之前, 对 H_V 进行了预处理, 去除了不可能构成连通团的顶点和边, 在实施最大连通团检测过程中, 又对 H_V 的边进行了细分(将边分为连通边和非连通边), 因此在实际检测中, 算法的效率比现有的算法高。

将查找出的最大团对应于 CAD 模型上相似的特征或局部结构, 采用所有最大团的顶点个数与 2 个 CAD 模型中面的个数较大者, 来描述 2 个模型的相似性大小. 为规范描述, 将相似局部结构的尺度记为

$$L = N_m / \max(N_1, N_2)$$

式中: N_m 表示所有最大团顶点的个数. L 越大表示 2 个 CAD 模型之间的相似性越大, 它们所包含的相似特征或局部结构就越多。

2 算法验证与讨论

为了验证本文算法的有效性, 以 Microsoft Visual Studio 2008 为集成开发环境, Open CASCADE^[9] 为几何平台, 构建了三维 CAD 模型测试库, 该库中包含 200 个常见的 CAD 模型. 为客观评估算法的效率, 共进行了 4 组实验, 在每一组实验过程中, 保持选取的相似局部结构的尺度不变, 而让 CAD 模型的面的个数从小到大发生变化. 分别测试本文算法、McGregor 算法、Durand-Pasari 算法和 Balas-Yu 算法匹配最大公共子图所需的时间, 并绘制出匹配时间 t 相对于 CAD 模型面的个数的曲线图. 在 4 组实验中, L 的取值分别为 10%、20%、

30%、40%，实验结果如图 2 所示。

从图 2 实验结果的 $t-N$ 曲线图中可以看出，在 4 种参与比较的算法中，本文算法在同等条件下完成最大公共子图检测所需的时间最少，算法效率也较高，并且检测所需时间不会随着 CAD 模型面个数的增加而急剧增长。McGregor 算法和 Durand-Pasari 算法的效率基本相当，但是随着 CAD 模型面个数的增加，Durand-Pasari 算法所需时间增长得最

快。Balas-Yu 算法由于在搜索过程中使用了过于复杂的约束条件，需要额外的计算时间，因此在 N 较小时，效率反而较其他 3 种算法低。但是，当 N 增加到一定数量时，约束的作用开始显现，算法的效率明显提高，所以比 McGregor 算法和 Durand-Pasari 算法好。由于 McGregor 算法、Durand-Pasari 和 Balas-Yu 算法都属于一种精确的最大公共子图查找算法，因此查找的精度是相同的。表 1 是本文算法

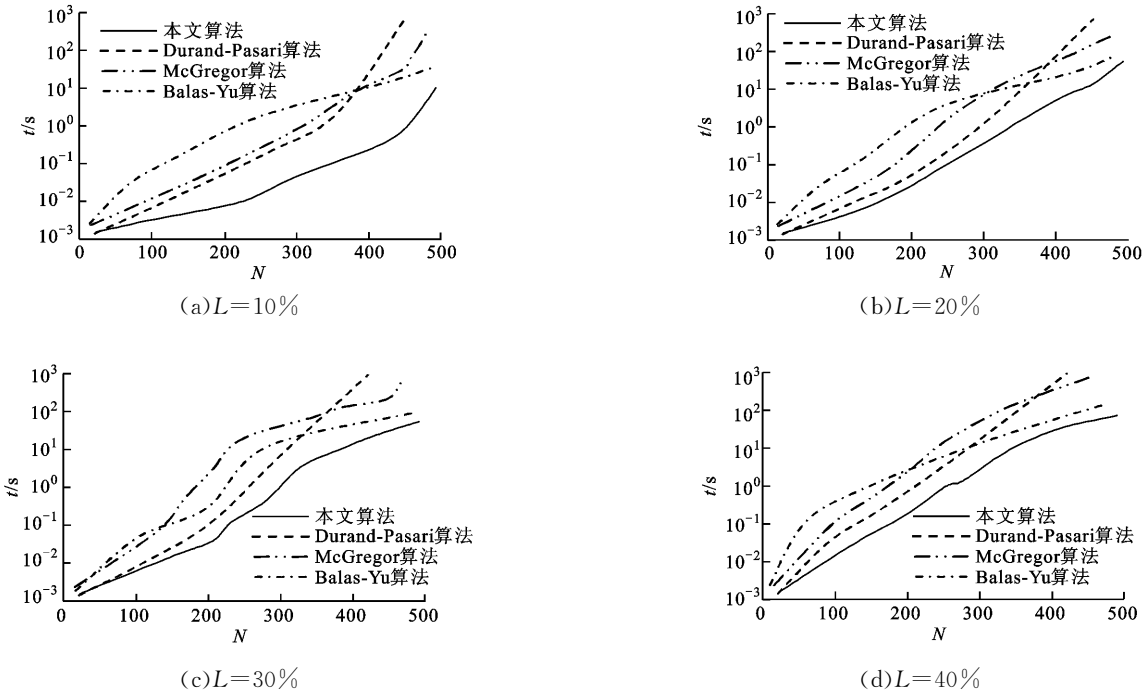


图 2 检索算法的性能实验

表 1 检索实例

检索模型	算法	检索结果排序					
		1	2	3	4	5	6
	Balas-Yu						
	本文						
	Balas-Yu						
	本文						

和 Balas-Yu 算法对检索模型的实验结果,由于本文算法可以将模型所包含的所有相似的局部结构查找出来,因此能保证局部结构是连通的.从检索结果中可以看出,本文算法与 Balas-Yu 算法相比,则更注重局部细节特征的比较,因此检索结果更符合人的相似性感知,可更好地指导企业参考并重用已有的 CAD 模型.

3 结 论

本文提出了一种面向重用的三维 CAD 模型的检索算法.该算法首先将 CAD 模型用属性邻接图来表示,然后利用最大公共子图来检测 CAD 模型中所包含的相似的特征或局部结构,最后根据相似特征或局部结构来实现 CAD 模型的相似性评价.由于最大公共子图检测是 NP 完全问题,算法的时间复杂度较高,因此本文并没有直接求解,而是再将其转化为 2 个属性邻接图的关联图的最大团检测问题来求解.在最大团检测过程中,通过利用 CAD 模型及其属性邻接图的特征,对关联图预先进行简化,并在搜索过程中只检测最大连通团,舍弃非连通团,从而加快了搜索进度,极大地提高了算法的检测效率.该算法的最大特点在于充分考虑企业在设计和制造过程中更注重模型局部细节的特征相似性,而只有达到局部细节特征的检索才能更好地实现 CAD 模型的重用.实验结果表明,本文算法的检索性明显高于其他几种算法,而且更符合 CAD 领域的检索需求.

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] 王洪申, 张树生, 白晓亮, 等. 基于最有匹配的三维 CAD 模型相似性评价算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(10): 924-928.
WANG Hongshen, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. Optimal-matching-based 3D CAD model similarity assessment algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(10): 1291-1297.
- [3] GAO W, GAO S M, LIU Y S, et al. Multiresolutional similarity assessment and retrieval of solid models based on DBMS [J]. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(9): 985-1001.
- [4] 王玉, 马浩军, 何玮, 等. 机械 3 维 CAD 模型的聚类 and 检索 [J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(6): 924-928.
WANG Yu, MA Haojun, HE Wei, et al. Clustering & retrieval of mechanical 3D CAD models [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(6): 924-929.
- [5] MCGREGOR J. Backtrack search algorithms and the maximal common sub-graph problem [J]. *Software Practice and Experience*, 1982, 12(1): 23-34.
- [6] DURAND P J, PASARI R, BAKER J W, et al. An efficient algorithm for similarity analysis of molecules [J]. *Internet Journal of Chemistry*, 1999, 2(17): 1352-1358.
- [7] BALAS E, YU C S. Finding a maximum clique in an arbitrary graph [J]. *SIAM J Computing*, 1986, 15(4): 1054-1068.
- [8] KOCH I. Enumerating all connected maximal common subgraphs in two graphs [J]. *Theoretical Computer Science*, 2001, 250(1): 1-30.
- [9] Open CASCADE SAS. Open CASCADE technology, 3D modeling & numerical simulation [EB/OL]. [2010-03-01]. <http://www.opencascade.org/>.

[本刊相关文献链接]

一种属性图同构的三维 CAD 模型局部匹配算法. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 56-60.
一种多源遥感图像分割的融合新策略. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 88-92.
拟三次 Bézier 曲线曲面的拼接技术. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 46-50.
PPTL 模型检测器实现的一个关键技术. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 24-29.

(编辑 管咏梅)