

基于语义的三维 CAD 模型可重用区域自动提取

白 静

(北方民族大学计算机科学与工程学院 银川 750021)

摘 要 针对产品设计中的局部检索重用需求,提出一种基于语义分析的可重用区域自动提取方法。通过采用扩展特征树表征三维 CAD 模型,准确刻画设计模型中不同粒度、不同形式的特征及特征间的关联关系,有效捕捉模型中包含的设计语义;通过分析局部区域的设计重用性,提出局部区域可重用性度量函数,并以扩展特征树的表征结构为输入,依据局部区域的可重用性自动提取候选可重用区域;通过进一步评价候选可重用区域的重用率确定最终可重用区域,以确保可重用区域的有效性及其合理性。实验结果表明,依据本方法提取获得的可重用区域符合设计重用语义,能有效支持产品设计阶段的局部检索重用。

关键词 三维 CAD 模型,设计重用,可重用区域,扩展特征树,局部检索

中图分类号 TP391.72 **文献标识码** A

Semantic-based Automatic Extraction of Reusable Regions in 3D CAD Models

BAI Jing

(Department of Computer Science and Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China)

Abstract Aiming at the partial retrieval and reuse, a semantic-based automatic extraction approach of reusable regions was proposed. Giving an engineering part, the defined design feature model can accurately describe both its features with different scales and forms and the relationships between these features by using extended feature tree, so as to effectively capture the design semantics of the model. Furthermore, based on the analysis of reusable regions for design of 3D CAD models, a reusability metric function of a given local region was defined and an algorithm that automatically extracts its candidate reusable regions for inputted extended feature tree was put forward. Finally, for each extracted candidate reusable regions, its reuse rate in given library was calculated and those candidate reusable regions which have high reuse rates were identified as final reusable regions. The proposed approach was implemented and tested. Preliminary results show that the reusable regions which are extracted using this method meet the design reuse requirements, so as to effectively support partial retrieval for design reuse.

Keywords 3D CAD model, Design reuse, Reusable region, Extended feature tree, Partial retrieval

随着经济社会的不断发展和工业化水平的不断提高,计算机辅助设计技术在工业界得到了广泛的应用。日益增多的三维 CAD 模型数据为产品设计带了大量的可重用资源。如何从海量的设计资源中快速、准确地找到满足设计重用需求的三维 CAD 模型已成为产品设计中首要解决的问题,对此出现了大量的研究工作。它们当中绝大多数的工作都以寻找整体相似的三维 CAD 模型为研究目标,局部区域检索的研究较少。然而,随着产品设计工具的不断增强,以及产品设计复杂度的不断增加,局部检索及重用的需求正在不断加强。一个复杂产品的设计可能包含了不同原始设计中的不同局部区域,需要借鉴若干个已有设计中的局部区域。同时,同步建模等 CAD 技术的发展使得局部设计的重用变得越来越简单。因而,查找并重用三维 CAD 模型内重要的局部区域在产品设计中变得越来越普遍、越来越重要。

与三维模型的全局检索不同,三维模型局部检索的检索

对象不是整个三维模型,而是它其中的某一部分。该部分位于三维模型的何处、尺寸多大、怎样放置、能否有效地被重用,在检索之前都无从知晓。这为局部检索及重用带来了很大的困难性。为此,本文提出一种基于设计语义分析的三维 CAD 模型可重用区域自动提取方法,来解决现有局部检索方法“待匹配区域”确定难、重用难的双重问题,以有效支持产品设计中 CAD 模型的局部检索及重用。该方法具有以下特点:

1) 引入扩展特征树的表征结构,实现模型中不同粒度、不同形式设计特征及特征间关系的准确表征,充分体现模型中所包含的设计语义,支持面向设计重用局部区域的有效划分及高效匹配;

2) 分析满足设计重用需求的局部区域特性,提出可重用区域判断原则,并以扩展特征树的表征模型为输入实现候选可重用区域的自动提取,确保其可重用;

3) 综合考虑局部区域的复杂性及重用率等特性,提出局

到稿日期:2012-06-25 返修日期:2012-10-14 本文受国家自然科学基金(61163016),宁夏自然科学基金(NZ1114),北方民族大学校内科研项目(2010Y033),北方民族大学自主科研基金项目(2011ZQY021)资助。

白 静(1982-),女,博士,副教授,主要研究领域为计算机辅助设计、三维模型检索及重用,E-mail: baijing_nun@gmail.com.

部区域可重用性度量函数,并以此为基础评价候选可重用区域的可重用性以确定最终可重用区域,保证可重用区域的高重用价值。

1 相关工作

三维模型局部检索中待匹配的对象不是整个三维模型,而是其中的一部分,这给局部检索带来了新的困难,也成为局部检索首要解决的问题。根据局部检索中待匹配对象——局部匹配区域的确定时间、确定方式的不同,现有的三维模型局部检索方法可以分为以下两类:

1) 其中一类局部检索方法是在局部搜索匹配的过程中动态地确定匹配区域。典型的工作有 Funkhouser 等人^[2]提出的基于体素表征的方法和部分学者提出的基于图表征和子图匹配的局部检索方法,包括基于二叉树^[3]、扩展 Reeb 图^[4]和多分辨率蔓延骨架图^[5]等多种方法。这里,基于体素表征的局部检索方法能够同时支持全局检索和局部检索,但是其局部匹配建立在两个待匹配三维模型整体对准的前提下,因此难以支持真正意义上的局部检索^[6]。而基于图表征和图匹配的局部检索方法在理论上能够从模型库中找到所有和查询实例相似的局部区域。但是,由于子图匹配非常耗时,且在局部检索中查询实例对应的子图非常小,导致了这些局部检索方法效率低和检索能力有限。

2) 另一类局部检索方法是在模型入库前预先提取三维模型中“潜在匹配区域”,并对这些局部区域进行表征、存储,匹配和相似评价都直接在查询实例和库内的“潜在匹配区域”之间进行。典型方法有 Gal 等人^[6]提出的基于曲率分析局部区域重要性进而提取“潜在匹配区域”的方法、李明等人^[7]提出的基于 FDAG(特征依赖有向无环图)关键点移除的“潜在匹配区域”提取及局部检索方法、马露洁等人^[8]提出的基于属性

邻接图抽取公共子图寻找“潜在匹配区域”的方法。其中 Gal 等人提出的基于曲率识别“潜在匹配区域”的局部检索方法能够有效地捕捉模型中相对独立且包含较多几何信息的局部区域,检索效果及效率都较好,只是难以适用于 CAD 模型。而后两种方法以工程语义为基础,因而更加适用于三维 CAD 模型,只是由于对“潜在匹配区域”可重用性的分析不足,支持三维 CAD 模型设计阶段局部检索的能力还有待提高。

综合分析以上各种局部检索方法可知,无论是动态寻找还是预先提取“潜在匹配区域”,现有的局部检索方法都存在强调局部区域相似性、忽略局部区域可重用性的问题,因而难以真正满足新产品数字化设计中的局部重用需求。最近,一份有关设计重用的调查报告指出^[9]:由于当前 CAD 造型系统采用的是一种历史相关的造型方法,导致很多看似相似的 CAD 模型无法被重用。目前,设计重用的最大挑战之一是如何保证检索到的三维 CAD 模型是能够被重用的,该问题在局部设计重用中尤其严重。本文提出的三维 CAD 模型可重用区域自动提取方法正是从根本上解决这类问题。

2 方法概述

对于三维 CAD 模型可重用区域的提取,本文提出基于语义分析的方法,以确保可重用区域的设计重用性。由于产品的设计知识难以显式标识,往往通过设计者的设计行为隐式地渗透在设计过程中,体现在设计结果里,而基于底层数据结构的三维 CAD 模型无法记录相关设计信息,因此,本文以记录了产品设计语义的设计特征模型为输入,分析设计语义并提取可重用区域。图 1 给出了整体流程,具体包括:①设计特征模型的有效表征;②候选可重用区域的自动提取;③可重用区域的最终评定。

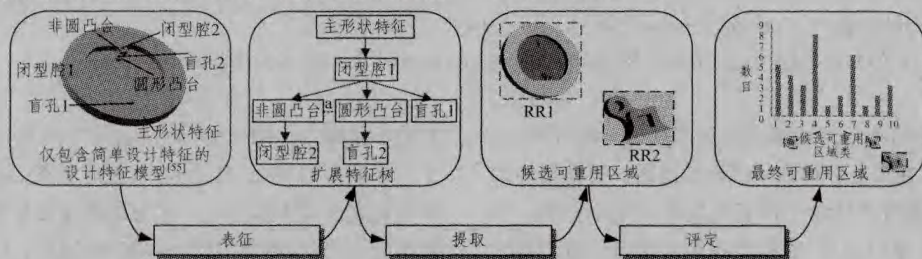


图1 三维CAD模型可重用区域提取流程

3 设计特征模型的有效表征

设计特征包含了高层次的语义信息,以其为基础的模型表征能够更好地表征设计者的设计思想,支持设计阶段的产品检索及局部区域的有效重用。可是设计特征非常自由,给定一个产品,其设计特征模型可能有多个,这势必会影响设计特征模型在检索中的应用。针对这一问题,我们提出了面向设计重用的工程零件设计特征模型表征及构建方法^[10]。这项工作对设计特征及其关系做出了明确的限定,提出了扩展特征树的设计特征模型表征结构,并统一采用 B-rep 表示的三维 CAD 模型为输入,通过交互定义设计特征、自动识别特征间关系的方式构建与其对应的扩展特征树,确保产品设计特征模型的唯一性。

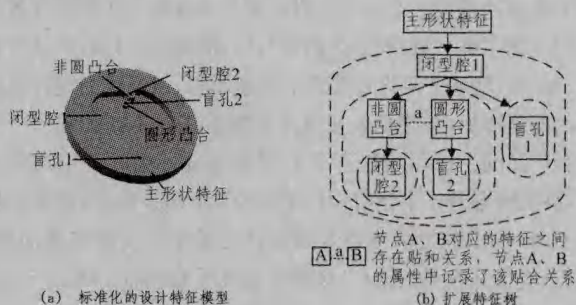


图2 基于扩展特征树的设计特征模型表征

图2给出了设计特征模型及其扩展特征树的表征实例。如图所示,该表征结构:①通过树的层次特性刻画设计特征模型中不同类型、不同粒度的设计特征;②通过树中节点间的父子关系记录设计特征之间的依赖关系;③通过扩展节点属性

增加兄弟节点信息记录设计特征之间的其它关联关系,完整记录了设计特征模型中所包含的设计特征及其关联信息。另外,与一般的图相比,树形结构中显式的层次信息能够方便地支持局部区域的有效划分。为准确刻画设计特征模型中所包含的设计特征及其关联信息,以有效支持可重用区域的提取,本文选用扩展特征树表征三维 CAD 模型。有关该模型表征的详细内容可参见我们的早期工作^[10]。

4 可重用区域的自动提取

三维 CAD 模型中的可重用区域是指模型中包含的那些具有设计重用价值的局部区域。如果能够在检索之前预先提取三维 CAD 模型中的可重用区域并对其表征,将其存储以作为局部检索的检索对象,不仅仅可以避免检索过程中动态寻找匹配区域所造成的检索效率低下的问题,还能够保证局部检索结果的可重用性。本文将扩展特征树为三维 CAD 模型的表征模型,通过分析其特征关系提取独立区域,并评价各个区域的可重用性,提取满足设计重用需求的局部可重用区域。下面将首先给出一些相关概念。

4.1 相关概念

定义 1(孤立节点, Isolated Node, IN) 扩展特征树中的孤立节点是这样一类节点:它们仅仅和其它节点存在依赖或被依赖关系,而不存在贴合、相交的关系。为方便起见,扩展特征树中满足类似属性的节点集合也被称为孤立节点,即节点集合内部的所有节点都仅仅和集合内部的其它节点之间存在相交、贴合关系的最小节点集合也被称为孤立节点。值得注意的是,当扩展特征树中的某个孤立节点对应一个节点集合时,这个节点集合一定具有以下特性:集合内部的所有节点的父亲节点对应扩展特征树中的同一个节点。

以图 2(b)中的扩展特征树为例, {主形状特征}, {闭型腔 1}, {非圆凸台, 圆形凸台}, {盲孔 1}, {闭型腔 2} 以及 {盲孔 2} 都是该扩展特征树中的孤立节点。其中孤立节点 {非圆凸台, 圆形凸台} 对应一个节点集合, 它们拥有相同的父节点“闭型腔 1”。

定义 2(孤立子树, Isolated Subtree, IS) 孤立子树是扩展特征树中以孤立节点为根的最大子树或最大子树集合(当孤立节点对应节点集合时,孤立子树是以集合内部节点为根的最大子树集合)。

定义 3(孤立真子树, Isolated Proper Subtree, IPS) 扩展特征树的孤立真子树是不以该特征树的根节点为根的孤立子树。

每一个孤立真子树都对应了模型内部的一个相对独立的子区域,它的根反映了该区域的整体形状,非根节点反映了该区域的细节信息。如图 2(b)中每一个虚线框内的子树都是该模型内部的一个孤立真子树。

定义 4(局部区域的复杂度, Complexity of Local Region)

CAD 模型中局部区域的复杂度是用来表征该区域设计复杂性的量化指标,由该区域所包含的设计特征的复杂度和设计特征间的关联关系共同决定。在给出局部区域复杂度的具体定义之前,首先定义 3 种基本设计特征集合的复杂度。

1) 基本设计特征集合一的复杂度

基本设计特征集合一,标记为 S_1 ,由一组彼此孤立的简单设计特征构成。如图 2(b)中的特征集合 {盲孔 1, 盲孔 2}

就属于 S_1 。这类特征集合的复杂度由特征集合内最复杂特征的设计复杂度来决定。这是因为这类特征集合中特征的设计过程彼此独立。具体地,该类特征集合的复杂度定义为:

$$\text{Complexity}(S_1) = \max_{u \in S_1} (\text{Complexity}(u)), S_1 \text{ is a feature set, where } \forall u, v \in S_1, R_d(u, v) \neq 1 \wedge R_s(u, v) \neq 1 \quad (1)$$

式中, $R_d(u, v)$ 表征节点 u, v 之间的依赖关系(包含直接依赖关系和间接依赖关系), $R_s(u, v)$ 表征节点 u, v 之间的兄弟关系(包含贴合关系和相交关系)。如果节点 u 依赖于节点 v , 那么 $R_d(u, v) = 1$, 否则, $R_d(u, v) = 0$; 如果节点 u, v 之间存在兄弟关系, 那么 $R_s(u, v) = 1$, 否则, $R_s(u, v) = 0$ 。

2) 基本设计特征集合二的复杂度

基本设计特征集合二,标记为 S_2 ,由一组通过贴合、相交关系关联起来的简单设计特征构成。如图 2(b)中的特征集合 {圆形凸台, 非圆凸台} 就属于 S_2 。这类特征集合的复杂度由所有包含在该特征集合中的特征的复杂度共同决定。这是因为设计者设计属于该特征集合的特征时,不仅仅要考虑特征自身,还需要考虑特征间的约束关系。具体地,该类特征集合的复杂度定义为:

$$\text{Complexity}(S_2) = \sum_{u \in S_2} (\text{Complexity}(u)), S_2 \text{ is a feature set, where } \forall u \in S_2, \exists v \in S_2, R_s(u, v) = 1 \quad (2)$$

3) 基本设计特征集合三的复杂度

基本设计特征集合三,标记为 S_3 ,组成这个特征集合的任何两个简单设计特征之间都存在依赖关系(直接依赖或间接依赖)。如图 2(b)中的特征集合 {闭型腔 1, 盲孔 2} 就属于这类;而 {闭型腔 1, 盲孔 1, 圆形凸台} 就不满足要求,因为集合中的“盲孔 1”和“圆形凸台”之间并不存在依赖关系。这类特征复杂度的定义与第二类特征集合的相同,因为设计者设计该特征集合中的特征时,不仅仅要考虑特征自身,还需要考虑特征之间的约束关系。具体地,该类特征集合的复杂度定义为:

$$\text{Complexity}(S_3) = \sum_{u \in S_3} (\text{Complexity}(u)), S_3 \text{ is a feature set, } \forall u, v \in S_3, R_d(u, v) = 1 \vee R_d(v, u) = 1 \quad (3)$$

基于上述 3 种基本设计特征集合的复杂度,局部区域 LR 的复杂度定义为:

$$\text{Complexity}(LR) = \max_{u \in S} (\sum (\text{Complexity}(u))), S \subset LR \wedge S \subset S_1 \cup \{u | u \text{ is a feature, } \exists v \in S_3, R_s(u, v) = 1\} \quad (4)$$

上述表达式中单个简单设计特征的复杂度被定义为该特征的设计复杂度。具体地,按照特征自身的设计复杂程度,将基本设计特征,如凸台、孔、型腔等的复杂度定义为 1;而其它类型的特征如阵列、组合特征的复杂度定义为 2(详细分类可见已有工作^[10])。

基于上述局部区域复杂度的定义,图 2(b)中以 {闭型腔 1} 为根的孤立真子树对应的局部区域的复杂度计算如下:

$$\text{Complexity}(LR) = \max_{u \in S_n, 1 < n \leq 11} (\sum (\text{Complexity}(u))), LR$$

是以闭型腔 1 为根的孤立真子树对应的局部区域

$$= \sum_{u \in S_{10}} (\text{Complexity}(u))$$

$$= \sum_{u \in S_{11}} (\text{Complexity}(u))$$

$$= (\text{Complexity}(\text{闭型腔 1})) + (\text{Complexity}(\text{非圆凸台})) + (\text{Complexity}(\text{圆形凸台}))$$

$$\begin{aligned} & \text{台}) + (\text{Complexity}(\text{盲孔} 2)) \\ & = 4 \end{aligned}$$

其中,特征集合 $S_1 = \{\text{闭型腔} 1\}$, $S_2 = \{\text{盲孔} 1\}$, $S_3 = \{\text{闭型腔} 2\}$, $S_4 = \{\text{盲孔} 2\}$, $S_5 = \{\text{闭型腔} 1, \text{盲孔} 1\}$, $S_6 = \{\text{圆形凸台}, \text{非圆凸台}\}$, $S_7 = \{\text{闭型腔} 1, \text{非圆凸台}, \text{圆形凸台}\}$, $S_8 = \{\text{圆形凸台}, \text{非圆凸台}, \text{闭型腔} 2\}$, $S_9 = \{\text{圆形凸台}, \text{非圆凸台}, \text{盲孔} 2\}$, $S_{10} = \{\text{闭型腔} 1, \text{圆形凸台}, \text{非圆凸台}, \text{闭型腔} 2\}$, $S_{11} = \{\text{闭型腔} 1, \text{圆形凸台}, \text{非圆凸台}, \text{盲孔} 2\}$ 。这里,局部区域 LR 的复杂度等价于其包含的最复杂特征集合 S_{10} 、 S_{11} 的复杂度。该方法有效地区分了模型内特征的加入所引起的简单工作量递增和真实复杂性递增,仅仅考虑了那些引入新的设计复杂度的特征对局部区域复杂度的影响,忽略了简单、重复、仅仅对应工作量的设计特征的加入对复杂度的干扰。如:在集合 S_7 的基础上新增闭型腔 2 就会增加新的复杂度,而在 S_{10} 集合基础上加入盲孔 2 并不累加新的区域复杂度。

4.2 可重用区域的确定原则

通过分析设计特征模型中具有设计重用价值的局部区域发现:通常情况下,一个由若干简单设计特征组成的局部区域如果能够同时满足以下 4 点,那么它就对应了一个可重用区域。

1) 内部高度聚合,即该区域中的所有特征彼此关联。这一点保证了该区域的连通性。同时这种高度聚合的性质往往也说明了该区域内部的所有特征都是为了支持同一功能而存在的。如图 3 中的 4 个红色局部区域均满足该要求。分析这些局部区域的特性可以看到:从局部区域 1 到局部区域 4,每个区域内部的若干特征都是为了完成同一个子功能而存在的。

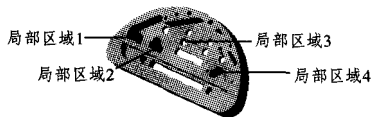


图 3 一个三维 CAD 模型中的 4 个局部区域

2) 同外部低度耦合,即该区域内部的特征几何上除了依赖于区域以外的某个特征之外,与模型中其它部分的特征之间彼此独立。这一点保证了该区域的相对完整性和独立性。

显然,如果一个局部区域同时满足 1)、2) 两个条件,那么它就对应了一个相对完整的功能区域,容易被不同的零件所共享;同时,该区域相对独立,因此非常方便重用。如图 3 中的局部区域 1、局部区域 2 以及局部区域 3 就同时满足以上两个条件,均对应了一个相对独立且完整的装配接口;而局部区域 4 则同时和区域以外的两个特征存在关系,只对应了完整装配接口的一部分。

3) 相对复杂,这一点保证了该区域具有重用价值,即值得被重用。显然,设计特征模型中某局部区域的重用价值就在于它能够设计者提供一种相对于直接设计更快速、简单的设计方式。如果一个局部区域非常简单,直接设计的代价将变得非常小,因此设计者无需通过检索、重用的方式来完成该区域的设计,如图 3 中的局部区域 1 和局部区域 3 便属于这种情况;反之,当一个局部区域相对复杂时,直接设计将变得困难且费时,基于检索、重用的设计方式才具有意义,即该局部区域才具有重用价值,如图 3 中的局部区域 2。

4) 具有一定的重用率,即该局部区域在不同设计特征模

型内多次出现。这一点从统计意义上保证了该局部区域在产品设计中重用中的重要性。

本文将用以上 4 点作为设计特征模型中可重用区域的确定原则来提取可重用区域。

4.3 可重用区域的提取算法

依据上述可重用区域的确定原则,给定一个设计特征模型,通过以下两步提取其包含的可重用区域:①提取候选可重用区域,即内部高聚合、外部低耦合的若干基本设计特征组成的局部区域;②确定最终的可重用区域,即具有一定复杂度和重用率的候选可重用区域。

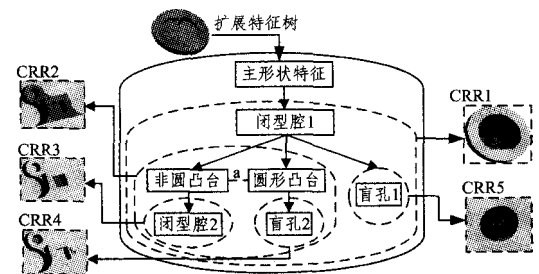
4.3.1 候选可重用区域的提取

由 4.1 节中孤立真子树的定义可知,设计特征模型扩展特征树中的孤立真子树需满足以下 3 点:1) 子树内部的节点和模型中的简单设计特征一一对应;2) 子树内部的所有节点都彼此关联,构成一个连通图,即子树对应了模型内部高度聚合的局部区域;3) 子树内部的所有节点都只可能和外部的同一个节点存在直接关联的关系,这个节点就是子树根节点在扩展特征树中的父节点,即子树对应了模型中一个和外部低耦合的局部区域。综合以上 3 点可知,扩展特征树中的孤立真子树对应了设计特征模型内部由基本设计特征组成的、内部高聚合且同外部低耦合的局部区域。同时,通过分析发现在设计特征模型中,除了其扩展特征树中孤立真子树对应的局部区域以外,其它任何区域都无法同时满足以上 3 点。因此,可以得出如下结论:设计特征模型中的局部区域是候选可重用区域当且仅当它对应了该模型扩展特征树中的一棵孤立真子树。

基于以上分析,在给定一个设计特征模型及其对应的扩展特征树后,可通过提取该模型扩展特征树中的孤立真子树来获取模型内部的所有候选可重用区域。具体地,该算法包括以下两步:

步骤 1 寻找扩展特征树中所有非根孤立节点集合 INS。

步骤 2 对每一个非根孤立节点,寻找所有以该孤立节点(可能是节点集合)内部节点为根的最大子树,这些子树的集合构成了扩展特征树中的一个孤立真子树。在后文中,这种由孤立节点构建其对应孤立真子树的算法统一称为 IPS (孤立真子树)提取算法。



注:CRR 为候选可重用区域(candidate reusable region)的缩写。图中红色高亮的区域为模型中的候选可重用区域,其中,候选可重用区域 CRR2 被确定为最终可重用区域)

图 4 可重用区域的提取示例

图 4 以一设计特征模型为例,按照以上算法提取其候选可重用区域,得到:该设计特征模型共包含 5 个候选可重用区域,分别对应了如图所示的 CRR1—CRR5。由图可知,所有的候选可重用区域都相对独立,仅和外部的一个特征存在直接关联关系,易于被重用;同时,这些候选可重用区域内部紧

密结合,对应了一个相对完整的功能区域,易于被不同的三维CAD模型所共享。但也有部分候选可重用区域,如CRR3、CRR4和CRR5,过于简单而不值得重用。下节将介绍如何剔除这些不值得重用的候选可重用区域。

4.3.2 最终可重用区域的确定

依据可重用区域的确定原则:只有当设计特征模型的候选可重用区域具有一定的复杂度和重用率时才能构成该模型的最最终可重用区域。为有效评定最终可重用区域,本文提出了一种局部区域可重用性度量函数,其定义为局部区域复杂度和重用率的函数。当给定候选可重用区域的可重用度大于系统设定的可重用度阈值 λ 时,判定其为最终可重用区域;否则,判定其不能构成最终可重用区域。这里,可重用度的计算如下:

$$\text{Reusability}(LR) = \text{Complexity}(LR) * \frac{(\text{sign}(fr(LR)) - (\epsilon - 0.1)) + 1}{2} \quad (5)$$

式中,Reusability(LR)表示局部区域LR的可重用度,Complexity(LR)表示依据式(4)计算所得的局部区域LR的复杂度,sign(x)为x的符号函数,fr(LR)表示局部区域LR在已有数据源中出现的频率, ϵ 为判断局部区域重用率的阈值,取整数。通过对符号函数的变换可知:

$$\frac{(\text{sign}(fr(LR)) - (\epsilon - 0.1)) + 1}{2} = \begin{cases} 1, & fr(LR) > \epsilon - 0.1 \\ 1/2, & fr(LR) = \epsilon - 0.1 \\ 0, & fr(LR) < \epsilon - 0.1 \end{cases} \quad (6)$$

由于fr(LR)始终为整数,而 $\epsilon - 0.1$ 始终为非整数,可知上式中永远不存在 $fr(LR) = \epsilon - 0.1$ 的情况;而当局部区域LR的重用频率大于等于阈值 ϵ 时,表达式(6)为1,否则为0。故我们可知,当一个候选可重用区域在已有数据源中出现的频率高于一个特定阈值时,其可重用度等于其复杂度,即该区域越复杂,重用它的价值就越高;而当一个候选可重用区域在已有数据源中出现的频率低于一个特定阈值时,其可重用度为0,这里,已有数据源中局部区域的出现频率代表该区域在历史设计过程中的重用频率,因而,当且仅当其达到一定次数后,我们才认为该区域可能具有设计重用价值。

依据式(5),给定一个候选可重用区域,便可计算其可重用度,进而判断其是否构成最终可重用区域。其中,Complexity(LR)依据式(4)计算即可, ϵ 为系统给定值,唯一待确定的就是fr(LR),即候选可重用区域的出现频率。本文中,将扩展特征树作为三维CAD模型的表征模型,每一个候选可重用区域都对应了一个孤立真子树,候选可重用区域出现频率的统计转换为相同子树数目的统计问题,其关键便是子树匹配。可重用区域的确定往往是在离线状态下判断完成的,因此与效率相比较,匹配质量更显重要。因而,本文将采用精确的子树匹配算法统计候选可重用区域的出现频率。

为叙述方便,设两待匹配候选可重用区域对应的表征结构分别为树 $Q(N_Q, E_Q, R_Q)$ 和 $T(N_T, E_T, R_T)$,其中N为节点集合,E为边的集合,R为树的根节点。两局部区域之间的匹配问题被转化为树Q和树T之间的匹配问题。当 $N_Q = N_T, E_Q = E_T, R_Q = R_T$,两子树可能相同,进一步计算它们间的相似度,包括3步:①查找树Q和树T之间的所有匹配方案;②计算每一个匹配方案的相似度;③计算树Q和树T的

相似度。下面分别给出各个步骤的详细算法。

1) 查找树Q和树T之间的所有匹配方案

由检索需求可知,树Q和树T之间的匹配f是树Q在树T中满足以下两个条件的嵌入^[11]:

①保持父子关系,即对任何节点u和v, $(f(u), f(v)) \in E_T$ 当且仅当 $(u, v) \in E_Q$;

②保持节点的层次属性以及粗层次的类型属性,即对任何节点 $u \in N_Q$ 且 $f(u) \in N_T$,有 $\text{depth}(u) = \text{depth}(f(u)) \wedge \text{CoarseType}(u) = \text{CoarseType}(f(u))$ 。其中,函数depth(u)表示节点u在特征树中的深度值;CoarseType(u)表示节点u的粗层次类型;" \wedge "表示"且"运算。

基于上述定义,求解树Q和树T间所有匹配方案的算法可分为以下两步:

步骤1 利用树嵌入的求解算法^[11]获得树Q和树T之间的所有嵌入方案;

步骤2 以节点粗层次的类型以及节点深度必须相同为限制条件,删除部分不满足要求的嵌入方案,获得最终的匹配方案。

2) 计算每一个匹配方案的相似度

给定树Q和树T之间的任一个匹配方案f,其相似度定义为该匹配方案中所有匹配上的节点对的相似度加权和,如下所示:

$$\text{similarity}(f) = \frac{1}{|N_Q|} \sum_{(u, f(u)) \in f} \text{SimilarityOfNodePair}(u, f(u)) \quad (7)$$

式中, $1/|N_Q|$ 为权重,旨在规范化相似度取值空间至 $[0, 1]$;而SimilarityOfNodePair(u, f(u))为节点对u, f(u)间的相似度,由两部分决定,分别是节点对u, f(u)兄弟关系的相似程度、特征类型的相似程度,具体的计算方法如下:

$$\text{SimilarityOfNodePair}(u, f(u)) = w_r * \frac{\text{matched sibling relationships number of}(u, f(u))}{\max(N_s(u), N_s(f(u)))} + w_n * S_t(u, f(u)) \quad (8)$$

式中, $N_s(u)$ 和 $N_s(f(u))$ 分别为节点u和节点f(u)兄弟关系的数目; $S_t(u, f(u))$ 为节点u和节点f(u)特征类型间的相似度; w_r, w_n 分别为特征间关系的相似度、特征类型的相似度在节点相似度中的权重,这里 $w_r = w_n = 0.5$ 。将匹配上的节点对的权重及其相似度代入匹配方案f的相似评价式(7)中,就可以获得匹配方案f的相似度。

3) 计算树Q和树T的相似度

树Q和树T的相似度被定义为它们间所有匹配方案对应相似度的最大值,即:

$$\text{similarity}(Q, T) = \max(\text{similarity}(f)) \quad (9)$$

相应地,树Q和树T间的最终匹配方案被定义为它们之间拥有最大相似度的那个匹配方案f。

当两个候选可重用区域的相似度为1时,我们认为它们对应同一种可重用区域。以此为基础,可以对库内已有模型中所有候选可重用区域归类,并统计其出现频率,作为其重用率,带入式(5),计算其重用度。

以图4中三维CAD模型为例,假定它所包含的候选可重用区域的重用率均大于等于给定的重用率阈值 ϵ ,按照可重用度计算式(5)可得:Reusability(CRR1) = 4, Reusability(CRR2) = 3, Reusability(CRR3) = Reusability(CRR4) =

Reusability (CRR5) = 1。当选择 3 为可重用区域的重用度阈值 λ 时,图 4 中的候选可重用区域 CRR1 和 CRR2 被确定为该模型的可重用区域。由图可见,这两个可重用区域对应模型中相对独立的功能区域,且具有一定的复杂度,既方便重用,也值得重用。

5 算法分析及实验

5.1 可重用区域提取算法的唯一性及稳定性分析

一个好的可重用区域提取算法应该具备:1)唯一性:即如果两个三维 CAD 模型相同,则它们所对应的可重用区域集合也相同;2)稳定性:即三维 CAD 模型中小的改动不会造成其对应可重用区域集合大的改变。这两点共同保证了以可重用区域为基础的局部检索重用的稳定性。本文给出的可重用区域提取算法具有良好的唯一性及稳定性,具体体现在以下两个方面。

1)扩展特征树的构建算法保证了由三维 CAD 模型构建扩展特征树的唯一性及稳定性。

产品设计特征模型的构建算法包括交互定义设计特征和自动构建扩展特征树两步。忽略人工理解的差异,我们假定在本文给出三维 CAD 模型主形状特征和辅形状特征的明确定义后,三维 CAD 模型设计特征的交互定义具有唯一性及稳定性。那么:① 给定两三维 CAD 模型,如果它们相同,则它们所对应的设计特征集合相同,根据扩展特征树的构建算法可知相同特征间的关系也相同,故其对应的扩展特征树相同,即设计特征模型相同;② 给定两三维 CAD 模型,如果它们之间存在小的差异,那么它们对应的设计特征集合中会有一些不同的局部形状特征,根据扩展特征树的构建过程可知这些不同的设计特征对应的特征间的关系也会有所不同,但是其它特征及特征间的关系仍然相同,体现在扩展特征树中则是:两模型对应扩展特征树间的公共子树和它们各自的扩展特征树间的差异都很小,即设计特征模型间的差异较小。通过以上分析可以得出以下结论,本文所采用的产品设计特征模型构建算法确保了产品设计特征模型的唯一性及稳定性。

2)可重用区域的提取算法保证了由扩展特征树提取可重用区域的唯一性及稳定性。

• 唯一性分析

可重用区域的提取包括候选可重用区域的提取及最终可重用区域的确定两步。其中候选可重用区域的提取又进一步分为扩展特征树中非根孤立子节点的提取和所有以非根孤立子节点为根的最大子树集合的提取两步。由提取过程可知:

1)对于两个给定的扩展特征树 A 和 B ,如果 $A=B$,那么其对应的孤立子节点集合 $S_{in}(A)=S_{in}(B)$;

2)如果扩展特征树 $A=B$,且孤立子节点 $ISN_a=ISN_b$, $ISN_a \in A$ 且 $ISN_b \in B$,那么以 ISN_a 和 ISN_b 为根的孤立真子树 $ISPT_a$ 和 $ISPT_b$ 必定相同,即 $ISPT_a=ISPT_b$ 。

综合 1)、2)可知:当两个给定的扩展特征树 $A=B$ 时,必定有其对应的候选可重用区域集合 $S_{CRR}(A)$ 和 $S_{CRR}(B)$ 相同,即 $S_{CRR}(A)=S_{CRR}(B)$ 。

若两候选可重用集合 $S_{CRR}(A)$ 和 $S_{CRR}(B)$ 相同,利用同样的重用度计算公式和相同的可重用区域判断阈值,必定有:以它们为输入进行筛选得到的最终可重用区域集合 $S_{RR}(A)$ 和 $S_{RR}(B)$ 满足 $S_{RR}(A)=S_{RR}(B)$ 。即,如果两个扩展特征树相

同,其对应的可重用区域集合一定相同。这验证了可重用提取算法的唯一性。

• 稳定性分析

假设扩展特征树 A 比扩展特征树 B 多了一个节点 N_a ,那么根据节点 N_a 和扩展特征树 A 中其它节点之间的贴合、相交关系,其稳定性分析分为以下两种情况。

第一种情况,如果不存在和 N_a 发生贴合或相交关系的其它兄弟节点,那么:

1)扩展特征树 A 、 B 的孤立子节点集合 $S_{in}(A)=S_{in}(B) \cup \{N_a\}$;

2)在候选可重用区域的提取过程中,当孤立子节点 $ISN_a=ISN_b$,且 ISN_a 不是节点 N_a 的祖辈节点时, $ISN_a \in A$ 且 $ISN_b \in B$,有以 ISN_a 和 ISN_b 为根的孤立真子树 $ISPT_a=ISPT_b$;若孤立子节点 $ISN_a=ISN_b$,但 ISN_a 是节点 N_a 的祖辈节点时,有以 ISN_a 和 ISN_b 为根的孤立真子树 $ISPT_a-N_a=ISPT_b$;同时,扩展特征树 A 比扩展特征树 B 多了一个以 N_a 为根的孤立真子树 $ISPT_{N_a}$ 。

以此为基础可知:扩展特征树 A 和扩展特征树 B 相比,其最终可重用集合中可能增加的可重用区域有 $ISPT_{N_a}$,可能不同的候选可重用区域为那些包含节点 N_a 的候选可重用区域。

第二种情况,如果在扩展特征树 A 中存在与节点 N_a 贴合或相交的兄弟节点,那么通过比较扩展特征树 A 和扩展特征树 B 的可重用区域集合可得:可能增加的候选可重用区域为以 N_a 及其兄弟节点为根的子树集合对应的区域,可能变化的候选可重用区域为所有包含节点 N_a 及其兄弟节点的可重用区域。

综合分析以上两种情况,可知:

1)同等条件下,扩展特征树 A 比扩展特征树 B 新增的节点 N_a 的层次越低,即越靠近扩展特征树的根节点时,扩展特征树 A 和扩展特征树 B 对应可重用区域集合中相同的可重用区域越多。这是因为当节点 N_a 的层次越低时,其出现在局部区域的机会就越少,故发生改变的可重用区域的数目也越少。如图 5 所示,模型 B 比模型 A 新增的闭型腔位于扩展特征树的第二层,而模型 C 比模型 A 新增的闭型腔位于扩展特征树的第三层,显然,模型 B 和模型 A 拥有两个相同的可重用区域,模型 B 增加了一个新的可重用区域;而模型 C 和模型 A 仅仅拥有一个相同的可重用区域,模型 C 增加了一个新的可重用区域,并因为新增闭型腔位于别的局部区域内而导致了已有可重用区域的改变。

2)同等条件下,扩展特征树 A 比扩展特征树 B 新增节点 N_a 的层次越高,即越远离扩展特征树的根节点时,扩展特征树 A 和扩展特征树 B 的可重用区域集合中不同的可重用区域越多,但是这些不同的可重用区域会非常相似。这是因为当节点 N_a 的层次越高时,其出现在某个局部区域的机会就越多,自然会影响到更多的可重用区域。如图 5 中的模型 C 比模型 A 新增的闭型腔不仅影响了自己为根的孤立真子树对应的可重用区域,还影响了其父节点为根孤立真子树对应的可重用区域。但是,由于新增节点 N_a 的层次较高,在可重用区域中,它往往对应一些细节信息,故它的增加对可重用区域的改变较小。

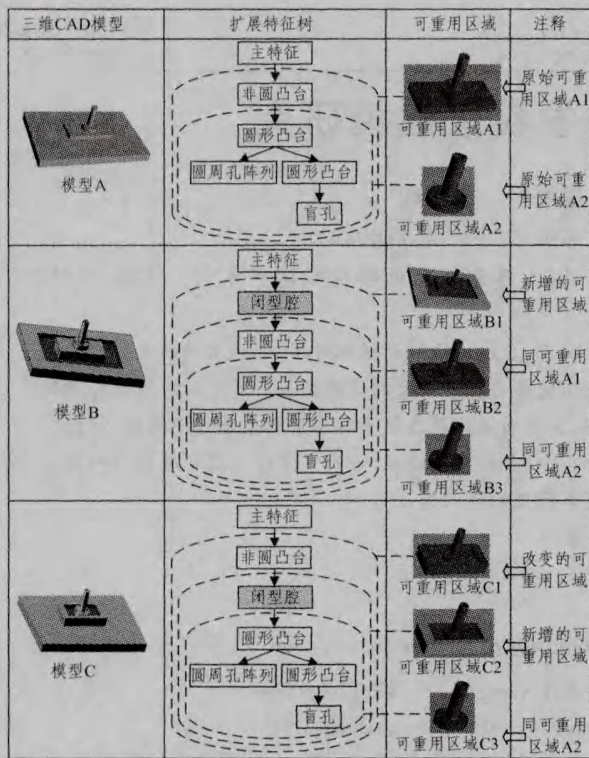


图5 可重用区域稳定性示意图

3)当扩展特征树A比扩展特征树B新增节点 N_n 的层次一定时,与 N_n 存在兄弟关系的节点数目越少,即模型中和 N_n 对应特征有关联关系的特征越少时,扩展特征树A和扩展特征树B对应的可重用区域集合中相同的可重用区域就越多。这是因为当新增节点 N_n 与已有节点存在兄弟关系时,其加入可能会影响到可重用区域集合中以这些节点为根的可重用区域,因此与新增节点 N_n 存在兄弟关系的节点数目越少时,节点 N_n 对原有可重用区域的影响就越小;反之,就越大。

以此类推,可以得到删除或更改特征后给定三维CAD模型可重用区域集合的变化情况。总体而言,三维CAD模型扩展特征树的小改动不会造成其对应可重用区域集合大的改变,即三维CAD模型可重用区域的提取是稳定的。

5.2 实验与分析

以本文算法为基础,采用Microsoft Visual C++7.0的编程环境,结合使用ACIS 13.0的几何引擎以及MFC、HOOPS 11.0的应用框架,我们设计并实现了三维CAD模型可重用区域自动提取的原型系统;并通过网上下载及自己构造的方式,构建了一个包含475个B-rep模型的工程零件测试库来对本文所提出的算法进行测试。具体地,对于测试库中的每一个B-rep表示的CAD模型,利用文献[10]中提出的扩展特征树的构建算法构建其对应的设计特征模型,利用本文算法自动提取其可重用区域。图6给出了该原型系统的界面,左侧对话框列出了当前测试库中所包含的可重用区域种类,点击其序号,可在右侧的视图中看到其包含的可重用区域实例(红色区域高亮显示)。

实验中,根据经验,将可重用度阈值 λ 及重用率阈值 ϵ 均设置为3。以当前收集的475个三维CAD模型为测试数据,仅仅考虑复杂度而不考虑重用率的情况下,得到了756个候选可重用区域实例;进一步地,对可重用区域实例进行归类,

并考虑其重用率后,得到了包含234个可重用区域实例的51个可重用区域。表1给出了有关该系统的所有统计数据。这里,考虑重用率后,之所以造成可重用区域实例由756个降至234个,是因为我们当前收集的模型均来自于网上等不同数据源,较为杂乱,造成很多具有一定复杂度的候选可重用区域在本数据源中的数目都为1或者2,影响了最终可重用区域的形成。图7中756个“仅考虑复杂度不考虑重用率的候选可重用区域”的分布情况也说明了这个问题。

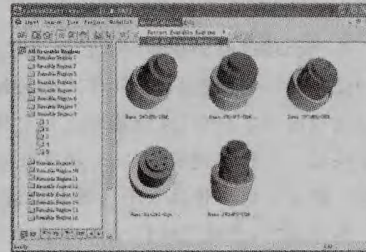


图6 三维CAD模型可重用区域提取原型系统

表1 可重用区域提取原型系统相关数据统计信息

CAD模型 的数目	特征的 数目	面的 数目	不考虑重用率的 候选可重用 区域实例数目	考虑重用率后的 候选可重用 区域实例数目	可重用 区域数目
475	3560	33553	756	234	51

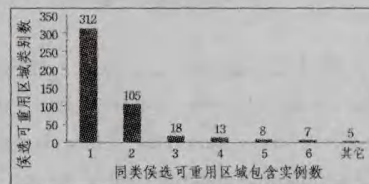


图7 “仅考虑复杂度不考虑重用率的候选可重用区域”分布图

图8给出了利用本系统得到的部分典型可重用区域及其实例,其中红色区域标识了各个实例中的可重用区域。如图所示,同组可重用区域实例之间彼此相似,特征及特征间的关系一致,它们可以方便地通过检索、拷贝、修改的方式加以重用。第1、2、3、4组中都存在阵列特征,由于现有的CAD系统能够方便地支持对阵列中特征数目及分布情况的修改,本系统并未区别不同阵列分布类型及数目,这也为帮助设计师更加广泛地搜索并重用局部区域提供了可能。

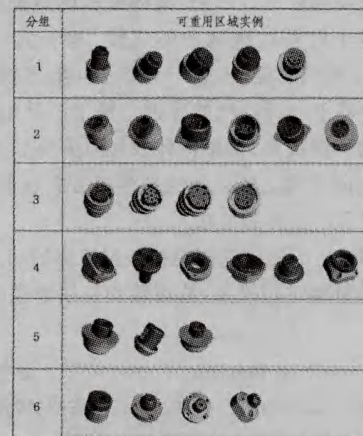


图8 一些典型的可重用区域及其实例

结束语 本文提出了一种三维CAD模型可重用区域的
(下转第313页)

考虑了图像的分割复杂性和潜在图像区域的大小,提出了一种新的能反映语义对象区域基本特征的有意义区域的概念,即分割必要性指标 SCM,并给出了该指标的判断方法和使用流程。该 SCM 可以避免目前图像分割算法中所出现的分割无语义问题,可有效地反映图像可分割区域的大小和图像分割复杂性,并能较精确地反映出图像的分割必要性。通过实验验证表明,该图像分割必要性指标 SCM 对目标区域大小具有很好的适应性。

参考文献

- [1] Cios K J, Pedrycz W, Swiniarski R M. Data Mining Methods for Knowledge Discovery [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(6): 1533-1534
- [2] Feyyad U M. Data mining and knowledge discovery: making sense out of data [J]. IEEE Expert, 1996, 11(5): 20-25
- [3] Zhang K D, Lu H Q, Duan M Y, et al. Automatic Salient Regions of Interest Extraction Based on Edge and Region Integration [C]// Proceedings of 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal, Quebec, Canada: IEEE Industrial Electronics Society, 2006, 1: 620-623
- [4] Luo Y, Zhang Y J, Gao Y Y, et al. Extracting Meaningful Region for Content-based Retrieval of Image and Video [C]// Proceedings of SPIE Visual Communications and Image Processing. San Jose, California, USA: SPIE, 2001, 4310: 455-464
- [5] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with

wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643

- [6] Fwu J K, Djuric P M. EM algorithm for image segmentation initialized by a tree structure scheme [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(2): 349-352
- [7] Chen C W, Luo J, Parker K J. Image segmentation via adaptive K-mean clustering and knowledge-based morphological operations with biomedical applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(12): 1673-1683
- [8] Yang X D, Gupta V. An improved threshold selection method for image segmentation [C]// Proceedings of 1993 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Waterloo, Canada: IEEE Computer Society, 1993, 1: 531-534
- [9] Shi Jian-bo, Malik J. Normalized cuts and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 888-905
- [10] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619
- [11] Li Chun-ming, Xu Chen-yang, Gui Chang-feng, et al. Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation [C]// Proceedings of 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2005, 1: 430-436
- [12] Dougherty E R. Mathematical Morphology in Image Processing [M]. New York: M. Dekker, 1993

(上接第 281 页)

自动提取方法。该方法采用扩展特征树的表征结构表征三维 CAD 模型,准确有效地刻画了设计模型中不同粒度、不同形式的特征及它们之间的关系,有效地体现了模型中包含的设计语义;分析局部区域可重用特性,提出可重用区域判断原则,并以此为基础,以扩展特征树的表征结构为输入,依据局部区域的可重用性自动提取三维 CAD 模型中包含的候选可重用区域,确保了其可重用性;综合分析模型局部区域的复杂度、重用率等特性,进一步提出了局部区域的可重用度评价函数,通过子树匹配、可重用度计算的方式综合评价候选可重用区域,确定最终可重用区域,确保了可重用区域的合理性;此外,依据本文算法提取的可重用区域具备唯一性及稳定性,保证了以其为基础的局部检索重用的有效性。

为进一步加强可重用区域自动提取的质量,下一步的工作将考虑在可重用区域的最终确定过程中引入用户反馈及机器学习机制,以有效利用用户局部检索及重用的相关信息来捕捉用户高层需求,提供更加符合用户产品设计重用需求的局部可重用区域。

参考文献

- [1] Gunn T G. The mechanization of design and manufacturing [J]. Scientific American, 1982, 247(3): 114-130
- [2] Funkhouser T, Kazhdan M, Shilane P, et al. Modeling by example [C]// ACM SIGGRAPH 2004. ACM: Los Angeles, California, 2004
- [3] Bespalov D, Regli W C, Shokoufandeh A. Local feature extrac-

tion and matching partial objects [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 1020-1037

- [4] Biasotti S, Marini S, Spagnuolo M, et al. Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9): 1002-1019
- [5] Bai J, Liu Y S, Gao S M. Multi-mode solid model retrieval based on partial matching [C]// The 10th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics. Beijing, China, 2007
- [6] Gal R, Cohen-Or D. Salient geometric features for partial shape matching and similarity [J]. ACM Trans. Graph., 2006, 25(1): 130-150
- [7] Li M, Fuh J Y H, Zhang Y F, et al. General and Partial Shape Matching Approaches on Feature-Based CAD Models to Support Efficient Part Retrieval [J]. ASME Conference Proceedings, 2008(43277): 121-130
- [8] Ma L J, Huang Z D, Wang Y W. Automatic discovery of common design structures in CAD models [J]. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 545-555
- [9] Jackson C, Buxton M. The design reuse benchmark report: seizing the opportunity to shorten product development [R]. Benchmark Report. 2007
- [10] 白静,周广平. 面向设计重用的工程零件设计特征模型构建 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(004): 622-632
- [11] Pekka K. Tree Matching Problems with Applications to Structured Text Database [D]. University of Helsinki, AAT C305 045, 1992