

## 参数化模型的局部自动适应重用方法

潘万彬<sup>1,2)</sup>, 高曙明<sup>1)\*</sup>, 陈翔<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310058)

<sup>2)</sup> (杭州电子科技大学数字媒体与艺术设计学院 杭州 310018)  
(smgao@cad.zju.edu.cn)

**摘 要:** 在基于局部重用的零件设计中, 设计人员会选择较复杂的可重用局部区域来替换当前零件模型中与其形状相似的简单局部, 期间一般必须进行适应性修改且往往离不开人工交互. 为了使得可重用局部区域能自动满足简单局部区域所蕴含的设计需求, 提出一种局部自动适应方法. 首先基于种子面过滤来确定两局部区域之间的对应面, 并以此作为它们的关联元素; 其次采用带定位信息的三维尺寸约束图来显式地表示参数化的局部形状尺寸和定位信息; 最后基于对应面和带定位信息的三维尺寸约束图, 通过尺寸传递和约束传递分别将简单局部区域的形状和定位信息自动、准确地传播到可重用局部区域. 实验结果表明, 该方法能有效地支持基于局部重用的零件设计.

**关键词:** 模型局部; 自动重用; 对应面; 形状传递; 定位信息传递  
**中图法分类号:** TP391.72

## An Automatic Adaptation Reuse Method for the Subparts of Parametric Solid Models

Pan Wanbin<sup>1,2)</sup>, Gao Shuming<sup>1)\*</sup>, and Chen Xiang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

<sup>2)</sup> (School of Media and Design, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

**Abstract:** Adaptation plays a fundamental role in subpart reuse based part design and is usually human dependent. In common design works, designers often replace a simple subpart (possessing the design requirements of shape and location information) in the current design model with an existing reusable subpart having a similar shape as the simple subpart but more complex. To enable the reusable subpart to smartly adapt itself to the design requirements implied by the simple subpart, a novel automatic adaptation reuse method for subparts is proposed. First, to determine the corresponding faces between the two subparts as their relevant elements, a seed face filter method is adopted. Second, to explicitly represent the parametric shape dimensions and location information of a subpart, a 3D dimension constraint graph with location information is adopted. Finally, based on the corresponding face and the 3D dimension constraint graph, the reusable subpart automatically and accurately adapts its shape and location information to those of the simple subpart through dimension transferring and constraint transferring respectively. The experimental results show that the proposed method is effective for subpart reuse based part design.

**Key words:** subpart; automatic reuse; corresponding face; shape transfer; location information transfer

收稿日期: 2015-02-26; 修回日期: 2015-08-24. 基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2013AA041301); 国家自然科学基金(61173125, 61303136); 浙江省自然科学基金(LQ15F020011). 潘万彬(1983—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为 CAD、虚拟现实等; 高曙明(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为 CAD/CAX 集成、模型检索与重用、工程信息学、有限元网格生成等; 陈翔(1982—), 男, 博士, 讲师, CCF 会员, 主要研究方向为 CAD&CG 等.

相关研究表明<sup>[1-2]</sup>,超过半数的产品设计是通过对已有设计根据新需求开展适应性修改而实现的,即基于实例设计(case-based design)<sup>[3]</sup>。随着三维CAD系统在工程领域的流行,大量的三维CAD模型存在于互联网和公司内部的数据库中。因此,产品设计过程中如何有效地重用现有的产品模型,对于增强产品开发的时效性非常关键。总体而言,基于实例的三维CAD模型的设计可分为整体重用设计和局部重用设计2类。前者通过对已有的整体模型开展适应性修改来满足当前的整体设计需求,而后者仅适应性修改已有的模型的可重用局部并将该局部融入到当前设计模型中来满足当前的局部设计需求。

在设计的早期阶段,设计人员通常很难直接设计出最终的完整模型<sup>[4-5]</sup>。设计人员在设计模型过程中经常会遇到某些比较复杂或者难设计的局部,或者对于模型的某个局部形状只有初步的设想。在上述情况下,设计人员可以通过在模型的该类局部区域上先设计一个形状粗糙但包含初步设计需求的简单局部,然后用它去库中搜索出细节丰富的相似的候选局部,即可重用局部,加以重用。该方法通常可以激发设计人员的进一步设计并通过重用候选局部来节约详细设计的时间<sup>[3,6]</sup>。

在工程领域,三维CAD模型的局部重用设计包含两部分:局部检索和局部适应性重用。近些年,局部检索技术得到了很大的发展<sup>[7]</sup>,可以有效地实现根据当前设计模型中的简单局部从库中找出形状相似且更复杂的可重用局部。但是在工程领域,目前对于局部适应性重用,即根据简单局部隐含的设计需求对可重用局部做适应性修改并通过替换简单局部和当前设计模型成为一个整体,由于缺乏高层语义支持,相关工作不多见且通常离不开人工干涉<sup>[6,8]</sup>;同时在工程应用领域,尽管当前主流的三维CAD系统支持局部移植(特征集合的复制、粘贴),但所移植的局部在当前设计模型中所需的定位信息以及形状需求仍然依靠人工交互修改完成<sup>[9-12]</sup>,该过程通常冗长乏味。因此,研究自动的局部适应性重用对于提升设计人员的设计效率、减少不必要的工作负担具有非常重要的意义。

尽管自动的局部适应性重用方法在计算机图形学领域已有大量的工作<sup>[13]</sup>,但是该类方法目前并不适用于工程领域,其中最主要的原因是该类方法目前主要针对网格模型,并以如何智能地开展网格编辑(重建)来实现在给定的2个网格模型的

交界处自然光滑地过渡连接为目标;而工程领域的CAD模型通常是边界表示模型,局部适应性重用的目标不仅要在保证模型准确性的前提下实现可重用局部和当前设计模型的相连接,而且要使得可重用局部在替换简单局部后在当前设计模型中能体现原简单局部的设计需求,如形状信息和定位信息。

针对上述问题,考虑到基于特征的参数化模型是目前在设计阶段主流的CAD模型,本文提出了一种针对基于特征的参数化模型的局部自动适应重用方法。该方法的主要目标是使得参数化模型的可重用局部<sup>[14]</sup>,能自动地根据当前设计模型中简单局部隐含的设计需求,即局部形状和局部定位信息,实现适应性重用。该方法遵循基于实例设计的一般性方法<sup>[6]</sup>,即确定当前设计需求与已有实例之间的关联元素以及通过关联元素传递当前需求。为了使得本文方法更加通用,本文沿用对应面<sup>[8]</sup>作为两局部的关联元素,并基于种子面过滤来更高效地确定两局部之间的对应面。为了使得隐藏于局部的设计需求,即参数化的形状信息和定位信息能准确地被传递,本文采用带定位信息的三维尺寸约束图来显式地表示模型局部区域的形状尺寸以及定位信息。基于对应面和带定位信息的三维尺寸约束图:1)在两局部的尺寸约束之间建立关联关系<sup>[8]</sup>,通过在关联的尺寸约束之间传递尺寸值来实现需求形状往可重用局部的传递和修改;2)在两局部定位信息所关联的三维几何元素之间建立对应关系,通过在对应的三维几何元素之间传递定位约束来实现需求定位信息往可重用局部的传递和修改。最后通过删除简单局部并在设计模型中自动重建经过上述自动修改的可重用局部来实现最终的局部重用。

## 1 相关工作

由于直接与参数化模型的局部自动适应重用相关的工作很少见,因此本文查阅的相关文献资料主要围绕模型之间几何对应关系的确定和几何模型的适应性修改。

模型之间几何对应关系的确定。在基于实例推理的相关工作中(case-based reasoning),尽管有很多方法可以识别当前设计需求和库中案例在概念上的关联关系<sup>[3,6,15]</sup>,但该类方法通常需要有足够的高层设计语义的支持,并且概念上的关联关系往往无法直接体现实例之间的几何对应关系。

在工程领域,模型之间确定相似区域的工作主要有局部检索和公共设计结构查找 2 类<sup>[7,16-18]</sup>。例如, Bai 等<sup>[14]</sup>围绕所提出的可重用区域的定义,采用层次结构在不同分辨率(细节复杂程度)的模型之间开展局部检索; Tao 等<sup>[19]</sup>基于局部区域分解,通过局部特征对应关系来开展局部检索; Ma 等<sup>[20]</sup>基于面邻接图在模型中寻找公共的设计结构,同时基于图的检索方法不仅能确定模型之间相似的区域,还能确定几何元素的对应关系,如面对应等,但该类方法对于相似局部的查找受限于模型细节的差异程度; Li 等<sup>[21]</sup>对边界表示模型进行了层次化表示,通过该层次化模型表示可以在几何细节存在差异的模型之间确定区域对应关系。局部检索的主要目标是确定 2 个模型之间相似的局部,而非确定 2 个模型在几何元素之间的对应关系。寻找模型之间的几何对应关系是计算机图形学中一个非常重要和公认的难题。例如, Sumner 等<sup>[22]</sup>在人工参与的基础上,采用迭代最近点算法确定 2 个三角网格模型之间的几何对应关系; van Kaick 等<sup>[23]</sup>依据先验知识,根据功能相似性确定 2 个几何形状差异较大的模型之间的几何对应关系。在语义知识缺失的情况下,在 2 个给定的离散几何模型之间确定有意义的几何对应关系非常困难<sup>[24]</sup>。Pan 等<sup>[8]</sup>基于面布局信息采用相似形状框架的搜索算法在 2 个模型之间确定几何元素对应关系,可以在语义缺失的情况下确定 2 个几何细节存在差异的相似模型(或局部)之间的对应几何元素,但该方法目前效率不高。

几何模型的适应性修改。Watson 等<sup>[3]</sup>对基于实例设计中的适应性修改方法做了以下的分类:人工干预、基于知识的修改、基于实例组合的修改以及上述方法的综合。上述适应性修改方法大多面向概念设计<sup>[8]</sup>,即便是一些面向几何模型设计的相关工作,通常也需要语义或者领域知识的支持,例如, Hua 等<sup>[25]</sup>根据产品的设计规则和形状语法开发的 CADRE 系统,可以对产品模型的尺寸和拓扑进行自动修改; Liu 等<sup>[26]</sup>针对测试转台提出了一种基于实例的参数化设计方法,该方法的有效实施有赖于由参数化模型构成的知识库和设计说明构成的实例库; Zhang 等<sup>[27]</sup>基于本体对夹具以及家具的设计知识进行检索并重用; Wang 等<sup>[28]</sup>提出一种材料摄动方法,使用一个固定的网格模型来进行应力敏感性分析和模型形状优化。目前,仅根据几何模型开展适应性修改的工作并不多见, Pan 等<sup>[8]</sup>通

过将参数化特征模型的底层尺寸约束提升到模型的几何元素之间,通过模型几何元素之间的对应关系在查询模型和候选模型的尺寸约束之间确定对应关系,并通过该关系实现尺寸值的传递,从而实现形状传递。在工程领域,目前模型之间自动传递设计需求的方法主要围绕模型的整体形状(装配体模型整体形状或装配体中某个零件的形状)修改来实现,并不适用于本文涉及的零件局部替代式的重用设计。在计算机图形学领域,不仅存在很多通过几何对应关系传递模型整体形状需求的工作,例如, Sumner 等<sup>[22]</sup>和卢涤非等<sup>[29]</sup>通过预先在查询模型和候选模型之间确定的几何对应关系,如标记点对应关系,从查询模型往候选模型传递变形信息;而且通过自动重用模型局部来传递设计需求的工作也很多<sup>[13]</sup>,例如, Brouet 等<sup>[30]</sup>提出了一种全自动的局部适应性重用方法,该方法将服装分不同的部分从一个模特模型传递并重建到另一个模特模型上,同时根据模特模型的大小调整服装大小并尽可能保持该服装的样式; Lee 等<sup>[31]</sup>也提出了一种自动服装传递方法,在服装传递过程中不仅力求保持样式,还尽可能保持原服装的尺寸。由于计算机图形学领域的局部适应性重用目标与工程领域不同,因此该类方法目前不适用于本文的研究内容。

## 2 基本概念和方法概述

### 2.1 基本概念

图 1 所示为基本概念相关的图示,其中,模型  $QM$  和  $CM$  中的深灰色局部区域分别为简单局部和可重用局部,每个  $F_i$  和  $f_i$  均表示模型的几何面,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

可重用区域。通常情况下,一个由若干设计特征组成的局部区域如果能够同时满足以下 3 点,那么它就对应了一个可重用区域<sup>[14]</sup>: 1) 内部高度聚合。该区域中的所有特征彼此关联,对应了一个相对完整的功能区域; 2) 同外部低度耦合。该区域内部的特征和模型中其他部分的特征之间彼此独立,仅和外部的一个特征存在直接关联关系; 3) 相对复杂。文中所有涉及到的局部均为可重用区域,如图 1 所示,模型  $QM$  中的深灰色区域为模型  $QM$  中的一个可重用区域。

根据上述定义,可重用区域中与外部特征关联的特征,它(它们)在外部特征(整体模型)中的

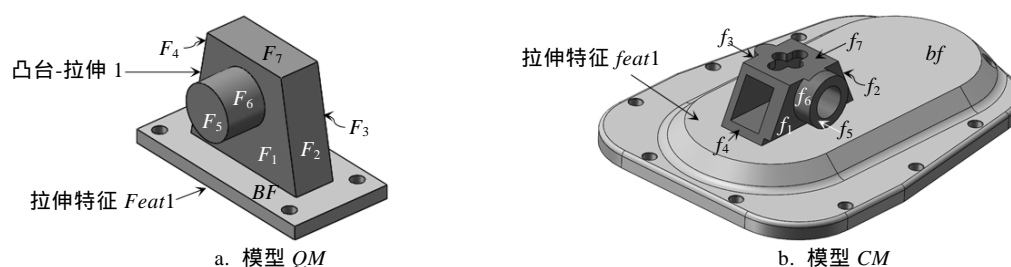


图1 概念相关示意图

定位信息决定了可重用区域在外部特征(整体模型)中的定位信息. 因此, 可重用区域中与外部特征关联的特征称为可重用区域的定位特征, 如凸台-拉伸1即为深灰色区域的定位特征. 根据上述定义, 每个局部中所有定位特征的草图依赖面应为同一个, 文中将局部的定位特征的草图依赖面称为该局部的种子面. 如图1中, 简单局部的种子面为BF.

面布局信息. 一组面中, 面与面之间的相对位置和相对朝向信息称为该组面的面布局信息<sup>[8]</sup>.

形状框架. 给定一个模型的一组面, 若该组面能通过每个面的形状以及该组面的面布局信息体现该模型的总体形状, 则该组面称为该模型的一个形状框架<sup>[8]</sup>. 特别地, 当该组面属于模型的某个局部区域且体现该局部的总体形状, 则称该组面为该局部的局部形状框架. 如图1所示, 面组 $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7\}$ 为模型CM中深灰色局部的一个局部形状框架.

通常, 在模型局部重用设计中用于支持由粗到细查询的简单局部往往比较简单, 因此文中简单局部的局部形状框架由该局部的所有面组成. 如图1所示, 面组 $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}$ 为简单局部的局部形状框架.

考虑到简单局部和可重用局部具有相似的总体形状, 文中将可重用局部中与给定的简单局部形状框架具有相同面数且面形状信息和面布局信息最相似的局部形状框架, 称为该简单局部形状框架的对应局部形状框架. 如图1所示,  $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7\}$ 为 $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}$ 的一个对应局部形状框架. 文中假定简单局部和可重用局部之间存在对应局部形状框架.

局部对应面. 给定一组对应局部形状框架  $S_1$  和  $S_2$  分别属于2个不同的局部  $P_1$  和  $P_2$ ,  $\forall F_i \in S_1, \forall f_j \in S_2$ , 若这2个面满足下面3个条件, 则  $F_i$  和  $f_j$  称为  $P_1$  和  $P_2$  之间的一对局部对应面: 1) 2个面的几何类型相同; 2) 2个面面上任一点的法向和该点在面底层几何方程上的法向关系保持一致<sup>[8,32]</sup>; 3)  $F_i$  和  $f_j$  在各自局部形状框架中相对于其他面的位置和朝

向非常相似. 如图1所示, 每一对  $F_i$  和  $f_i$ ,  $1 \leq i \leq 7$ , 均为局部对应面.

尽管局部的种子面不属于局部的形状框架, 但它对于决定局部的形状却至关重要. 如图1中, 种子面BF与面 $F_7$ 之间的距离决定了简单局部在面BF法向方向上的形状尺寸. 为了使得形状能有效地被传递, 文中将简单局部和可重用局部的种子面列入局部默认的对对应面, 称为局部种子对应面. 如图1中, BF和bf为一对局部种子对应面.

## 2.2 方法概述

为了使得可重用局部能更有效地支持模型局部重用设计, 基于自动形状和定位信息传递, 本文提出了局部自动适应重用方法. 该方法以2个参数化实体模型作为输入: 一个包含简单局部的设计模型, 一个包含可重用局部的库模型. 简单局部在设计模型中体现了2点设计需求: 1) 新的局部形状——通过局部的边界信息以及其内部的尺寸约束所体现; 2) 新的定位需求——通过局部的定位特征在种子面上的尺寸约束和几何约束体现. 可重用局部根据简单局部检索获得, 与简单局部形状相似且几何细节更复杂; 同时, 两局部未配准. 考虑到自动适应性重用很困难, 本文涉及到的局部主要由平面和二次曲面构成. 本文方法的流程如图2所示, 具体步骤如下:

Step1. 基于种子面过滤, 自动地确定两局部之间的对应面.

Step2. 采用约束提升机制<sup>[8]</sup>自动地创建带定位信息的三维尺寸约束图, 来显式地表示模型局部的形状尺寸(尺寸约束)和定位信息(定位约束).

Step3. 基于对应面和带定位信息的三维尺寸约束图, 自动地对可重用局部根据从简单局部传入的设计需求进行形状修改和定位信息修改.

Step4. 删除简单局部, 并自动地将已完成适应性修改的可重用局部根据其自身的构造历史重建到设计模型中.

在图2中, 输入模型QM和CM中的深灰色区域分别为简单局部和可重用局部. 简单局部通过在草图线和模型边之间设置距离约束实现定位,

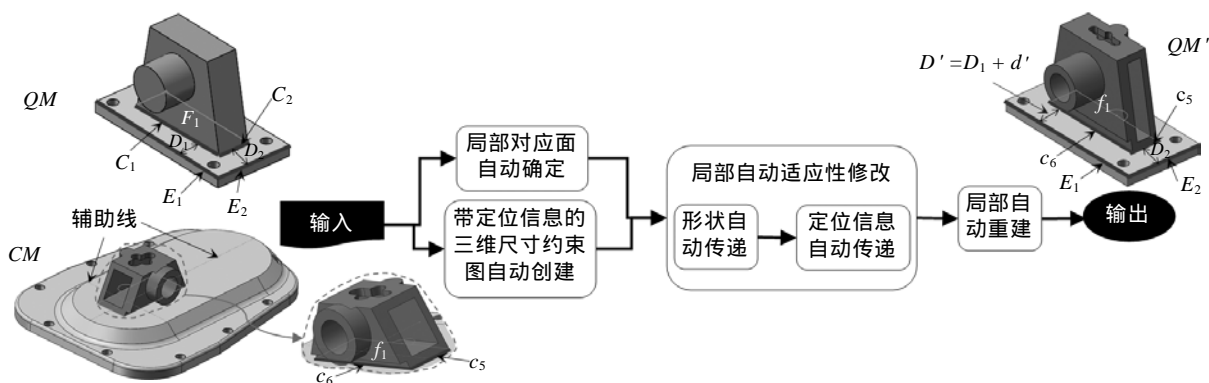


图 2 局部自动适应重用的流程

如草图线  $C_1$  和模型边  $E_1$  之间的距离约束  $D_1$ . 可重用局部通过在草图线与辅助线之间设置几何约束实现定位. 输出局部  $QM'$  的总体形状尺寸与原简单局部保持一致, 且定位信息一致, 如平面  $f_1$  与  $E_1$  之间的距离与原简单局部平面  $F_1$  与  $E_1$  之间的距离相等.

根据图 2 所示的效果图可以看到, 可重用局部到达设计模型后能自动地适应性继承简单局部的形状和定位信息, 同时适应性地保留了可重用局部原始的几何细节. 由于 Step4 比较简单, 因此文中重点介绍 Step1, Step2 和 Step3.

### 3 局部面对应关系的确定

考虑到局部对应面存在于对应局部形状框架中, 因此通过先确定 2 个局部之间的对应局部形状框架来确定 2 个局部之间的对应面显得比较合理. 本文采用对应形状框架检索算法的基本思想<sup>[8]</sup>来确定 2 个局部之间的对应面. 为了使得对应面能直

接通过检索对应形状框架获得, 文献[8]对对应形状框架的检索主要采用有序面组遍历查找的方法. 通过分析, 该方法主要时间消耗于从有序面组中过滤出可能的对应形状框架. 针对上述问题, 文中采用基于局部种子对应面的启发式过滤来改善上述方法的效率. 该启发式过滤通过将可重用局部中相对于种子面不满足对应面定义要求的有序面组事先删除, 从而缩小对应局部形状框架的搜索规模来提升算法的效率.

假定输入的简单局部和可重用局部分别为图 1 所示的深灰色区域; 给定的简单局部形状框架的有序面组  $G_0 = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}$ , 其中包含 1 个圆柱面和 6 个平面; 可重用局部总共包含 7 个圆柱面、22 个平面. 文中对应局部形状框架(局部对应面)检索算法如下:

Step1. 面形状过滤并生成所有可能的局部对应面.

根据给定的有序面组  $G_0$ , 可重用局部中所有满足局部对应面定义要求 1) 和 2) 的面被组织成如图 3a 所示的有序面组矩阵: 每一行代表可重用局部中满足上述

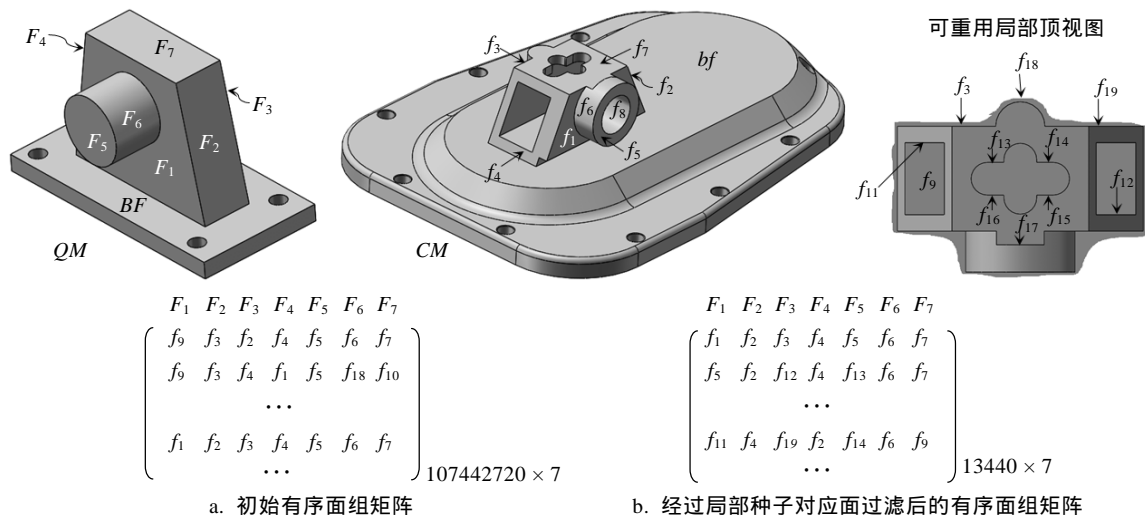


图 3 基于种子面过滤的面对应确定示意图

要求的一个有序面组, 该例中共有 107 442 720 组面序列; 每一列代表所有可能的可重用局部对应面, 如列  $F_1$  表示所有与面  $F_1$  可能对应的可重用局部对应面。

Step2. 基于局部种子对应面的启发式过滤。

根据对应面的定义要求 3): 任意 2 个对应面相对于各自形状框架中的其他面的朝向(面之间法向或轴向的交角)要相似。为此本文规定 2 个对应面在各自形状框架中相对于所有其他面的朝向差值均应小于阈值  $\xi$  (根据实验经验值, 本文中  $\xi=15^\circ$ )。同时, 由前文可知, 每个局部中的种子面是唯一的, 并且给定的 2 个局部的种子面默认为对应面。因此本文任意 2 个面为局部对应面的前提是它们相对于各自局部种子面的朝向差值也应小于  $\xi$ 。

根据上述规则, 对于有序面组矩阵中的每一行有序面组  $G' = \{f_1', f_2', \dots, f_n'\}$ , 通过

$$C(G_0, G') = \begin{cases} 0, & \text{若 } \|\angle F_i F - \angle f_i' f\| \geq \xi, i=1, 2, \dots, n \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

判断它和给定的有序面组  $G_0$  相对于各自种子面的在相对朝向上的可接受性。其中,  $\angle F_i F$  表示  $G_0$  中任一面  $F_i$  与种子面  $F$  之间的相对朝向;  $\angle f_i' f$  表示  $G'$  中任一面  $f_i'$  与种子面  $f$  之间的相对朝向; 下标相同的  $F_i$  和  $f_i'$  表示 2 个面组中序列位置相同的面。式(1)为布尔函数, 仅当  $G'$  和  $G_0$  中所有相同位置上的面与各自种子面的相对朝向距离的绝对值均小于给定阈值时,  $G'$  才是可接受的; 否则, 直接淘汰  $G'$ 。例如, 当  $G' = \{f_9, f_3, f_2, f_4, f_5, f_6, f_7\}$  时, 即图 3a 中的初始有序面组矩阵中的第 1 行, 由于  $f_9$  与种子面  $bf$  的相对朝向是  $0^\circ$ , 而位于相同面序列位置上的  $F_7$  与种子面  $BF$  的相对朝向是  $90^\circ$ , 根据式(1),  $G'$  与  $G_0$  在相对朝向上不匹配, 因此该面序列在图 3b 中被删除了。最后, 经过上述基于局部种子对应面  $BF$  和  $bf$  过滤之后的有序面组矩阵如图 3b 所示。

Step3. 确定对应局部形状框架和局部对应面。

经过上述过滤, 有序面组矩阵中的任一行  $G' = \{f_1', f_2', \dots, f_n'\}$  和  $G_0$  之间的布局信息相似度为

$$D(G', G_0) = \sum_{i=1}^n \left( \|dF_i - df_i'\| + \sum_{j=1}^n \|\angle F_i F_j - \angle f_i' f_j'\| \right);$$

其中,  $dX$  表示局部几何中心到面  $X$  的归一化距离<sup>[8]</sup>;  $\angle XY$  表示面  $X$  和  $Y$  之间的相对朝向。遍历有序面组矩阵, 找到与  $G_0$  距离最小的有序面组即默认为它的对应局部形状框架。根据局部对应面的定义, 对应局部形状框架中相同序列位置上的 2 个面为局部对应面。

根据上述算法可知, 当给定的 2 个局部细节差异较大时, 基于局部种子对应面开展启发式过滤的过滤效果将比较明显。如上述例子中, 在经过 Step2 之后, 可重用局部中与给定的局部形状框架有序面组相适应的有序面组仅剩 13 440 组。同时, 上述算法采用的过滤依据跟文献[8]保持一致, 因

此并不会影响最终面对应结果的准确性。图 3 中, 采用本文算法最终确定的对应局部形状框架为  $\{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}$  和  $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7\}$ , 其中相同序列位置上的面为局部对应面, 如  $F_1$  和  $f_1$  为局部对应面。

#### 4 带定位信息的三维尺寸约束图

尽管三维尺寸约束图<sup>[8]</sup>可以通过三维几何元素之间的关系来显式地表示模型(局部)参数化的形状尺寸信息, 并以此有效地辅助参数化模型(局部)形状准确地传递, 但是三维尺寸约束图缺乏对局部定位信息的支持, 如无法表示局部定位信息中的几何约束。为了后续能开展准确地形状和定位信息的传递, 本文对传统的三维尺寸约束图进行了扩展, 在其中融入了局部的定位信息, 形成了带定位信息的三维尺寸约束图。

根据模型的构造历史和三维尺寸约束图的构造方法<sup>[8]</sup>, 对于局部相关的带定位信息的三维尺寸约束图的构造过程可分为 3 步。为了更具体地说明构造过程, 给出了图 4 所示的示例, 其中,  $C_i$  为草图轮廓线;  $CP$  为草图圆心;  $E_i$  为三维几何边;  $D_i$  为距离;  $A_i$  为角度;  $//$  代表平行;  $F_i \cap F_j$  表示面  $F_i$  和  $F_j$  之间的公共边;  $F_i \perp A$  代表面  $F_i$  的轴;  $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

Step1. 提升局部形状尺寸约束。

参照文献[8]中尺寸提升的一般性方法, 将局部中每个特征的底层尺寸约束统一提升为最终模型局部上的三维几何元素之间的尺寸约束关系, 同时在草图元素和所提升的三维几何元素之间保持关联关系。如图 4 所示, 控制草图线  $C_1$  和  $C_3$  的距离约束  $D_3$  被提升为控制两平行面  $F_1$  和  $F_3$  之间的距离约束, 其中  $C_1, C_3$  分别与  $F_1, F_3$  相关联; 控制草图线  $C_2$  和  $C_4$  的距离约束  $D_4$  被提升为控制两平行边  $BF \cap F_2$  和  $BF \cap F_4$  之间的距离约束, 其中  $C_2, C_4$  分别与  $BF \cap F_2, BF \cap F_4$  相关联; 控制草图圆心  $CP$  和边  $F_1 \cap F_7$  的距离约束  $D_6$  被提升为控制圆柱面中心轴  $F_6 \perp A$  和边  $F_1 \cap F_7$  之间的距离约束, 其中  $CP$  与  $F_6 \perp A$  相关联; 控制拉伸特征拉伸距离的约束  $D_5$  被提升为控制拉伸起止面  $BF$  和  $F_7$  的距离约束。

Step2. 提升局部的定位信息(定位约束)。

由于局部在设计模型上的定位信息由定位特征在种子面上的定位信息所决定, 因此带定位信息的三维尺寸约束图的定位信息即为定位特征(草图轮廓上)的草图元素与种子面上的几何元素之间的约束信息。对于定位信息中尺寸约束的提升方式与 Step1 一致, 如将控制草图线  $C_1$  和边  $E_1$  的距离约束  $D_1$  提升为控制面  $F_1$  和边  $E_1$  之间的距离约束, 其中  $C_1$  与  $F_1$  相关联。对于定位信息

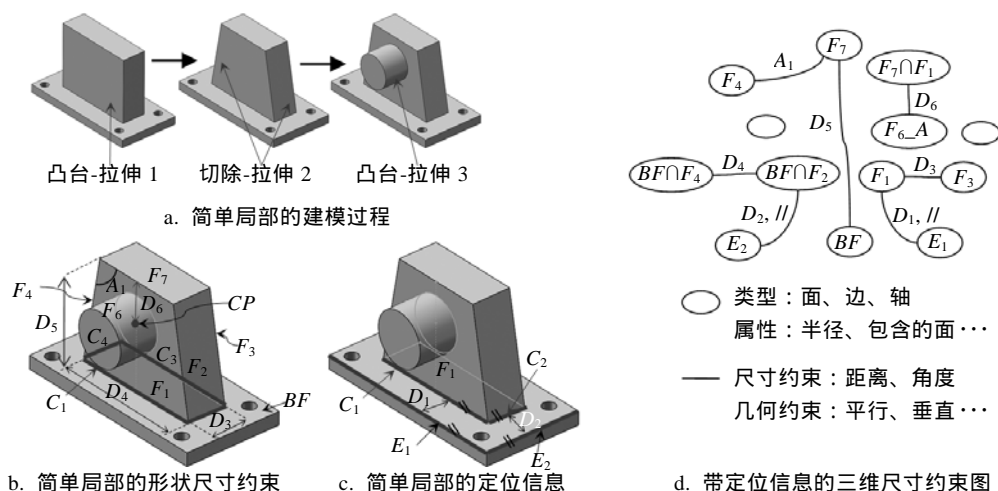


图 4 简单局部及其带定位信息的三维尺寸约束图

中的几何约束的提升方法与尺寸约束的方式类似, 仅将约束关系类型变为几何约束, 如  $C_1$  和  $E_1$  之间的平行约束被提升为  $F_1$  和  $E_1$  之间的平行约束, 并且保持  $C_1$  与  $F_1$  的关联关系。

Step3. 构造局部带定位信息的三维尺寸约束图。

本文用带定位信息的三维尺寸约束图( $V, E$ ) 来统一表示局部中被提升的形状尺寸和定位信息。其中,  $V$  为节点集合, 每个节点的属性如图 4d 所示, 每个节点都与三维几何元素相对应, 如节点  $F_7$  表示面  $F_7$ ;  $E$  为边集合, 为了支持定位信息的表示, 每条边在传统三维尺寸约束图的基础上增加了几何约束的属性信息, 如边  $D_2$  所示。特别地, 当一条边仅对应形状尺寸时, 该边的几何约束属性信息为空, 如边  $D_6$ , 而当一条边仅对应一个定位几何约束时, 尺寸约束属性信息为空。

依照上述构造过程可知, 带定位信息的三维尺寸约束图能够有效地通过三维几何元素之间的关系将参数化的局部形状尺寸以及定位信息显式地表示出来。图 4d 所示为简单局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图。

## 5 局部自动适应性修改

由于两局部之间的其余三维几何元素的对应关系, 如对应边、对应轴等<sup>[8]</sup>均可从对应面推导而来, 因此基于两局部之间的对应面以及它们相应的带定位信息的三维尺寸约束图, 借鉴形状传递的基本方法<sup>[8]</sup>可以准确有效地将简单局部的形状信息和定位信息, 通过两局部之间三维几何元素的对应关系自动地传递到可重用局部中, 从而实现可重用局部的自动适应性修改。

### 5.1 基于关联尺寸的局部形状自动传递

由于带定位信息的三维尺寸约束图将局部的

形状尺寸信息通过三维几何元素之间的关系表示出来, 因此基于两局部的对应面以及它们相应的带定位信息的三维尺寸约束图, 可以很准确地 2 个参数化模型局部之间建立尺寸关联关系(对应关系)<sup>[8]</sup>, 通过在关联尺寸约束之间建立参数表达式来实现局部形状的自动传递。

如图 5 所示, 由于面  $F_7$  和  $BF$  分别与面  $f_7$  和  $bf$  相对应, 因此面  $F_7$  和  $BF$  之间的距离约束  $D_5$  和面  $f_7$  和  $bf$  之间的距离约束  $b_4$  相关联。当将  $D_5$  的值传递给  $b_4$ , 即  $b_4 = D_5$  时, 简单局部在面  $F_7$  法向方向上的形状尺寸即传递给了可重用局部在面  $f_7$  法向方向上的形状尺寸。同理, 可得图 5 的关联尺寸表和尺寸关系表。特别地, 由于两局部参数化方式的不同, 同方向的形状尺寸传递可能会涉及到多个尺寸约束, 如图 5c 所示, 与距离约束  $D_3$  相关联的距离约束有  $b_2$  和  $b_6$ 。此时  $b_2$  和  $b_6$  的最终值要通过将  $b_2 + b_6 = D_3$  加入到可重用局部的参数约束方程组中, 通过求解方程组而获得<sup>[33]</sup>。详细的尺寸约束新值的确定过程见文献[8]。最终局部形状自动修改后的效果如图 5e 所示。

由于给定的两局部之间通过对应局部形状框架确定面对应关系, 基于对应面和尺寸值传递, 可重用局部可以有效地获得查询局部的形状。但对于可重用局部中的细节特征, 在总体形状更新过程中可能会出现无法重建的问题, 如图 5b 所示, 由于凸台-拉伸 4 在  $f_1$  上的位置发生改变, 导致切除-拉伸 5 无法生成。此时系统将自动删除无法重建的细节特征, 如切除-拉伸 5 在结果模型(图 5e)中被删除。当自动传递的局部形状未完全满足设计人员的设计时, 需对结果局部形状进行人工交互修改。

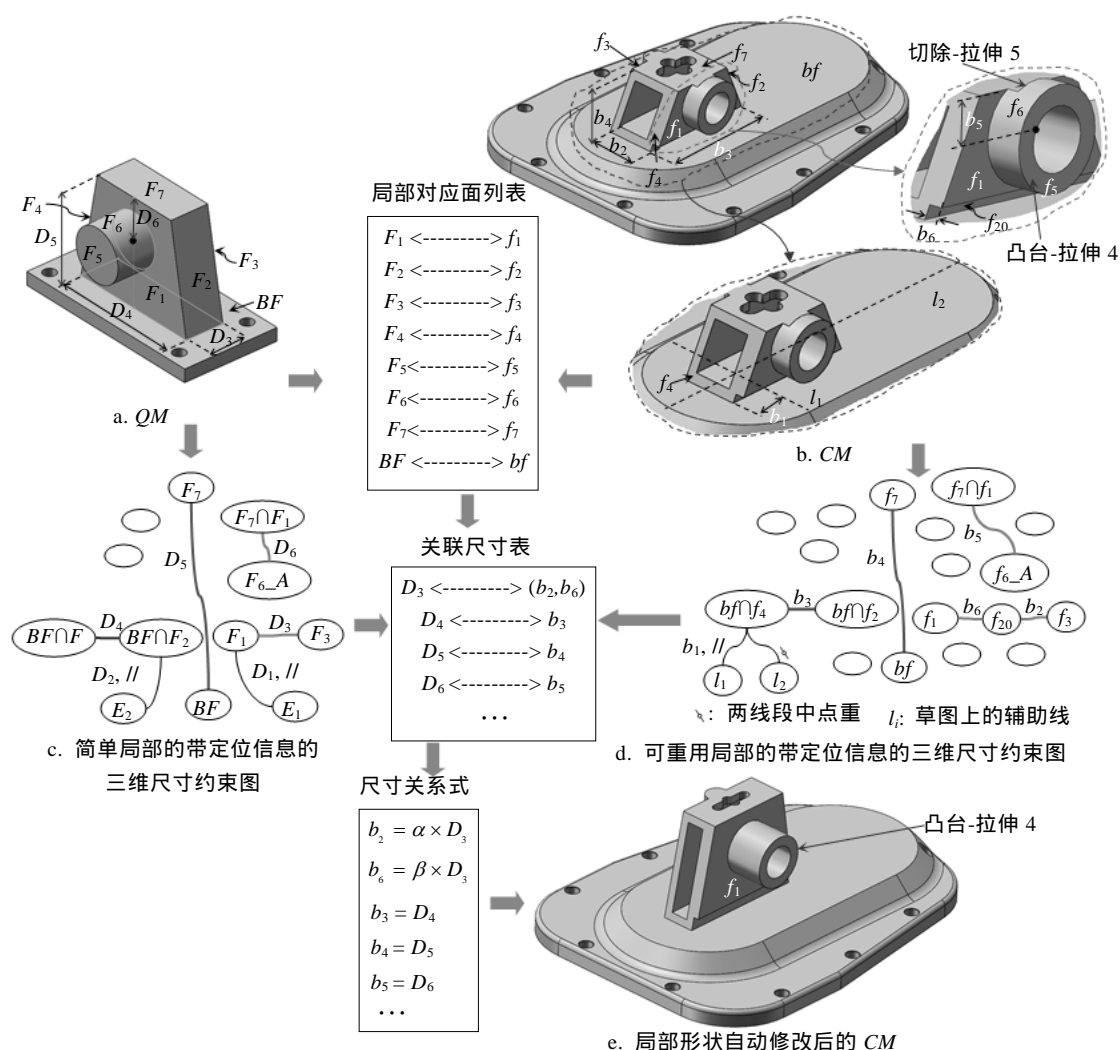


图5 局部形状自动传递示意图

**5.2 基于对应可定位元素的局部定位信息自动传递**  
带定位信息的三维尺寸约束图显式地体现了局部的定位信息, 为了使得简单局部的定位信息能如局部形状传递般准确地自动地传递给可重用局部, 本文给出对应可定位元素的相关概念:

**可定位元素.** 局部定位特征经过约束提升后, 关联了其草图元素的三维几何元素称为该局部的可定位元素, 如图5中的边  $BF \cap F_4$ ,  $BF \cap F_2$  等均为简单局部的可定位元素。

**对应可定位元素.** 给定一对对应的三维几何元素  $GE$  和  $ge$  分别属于简单局部和可重用局部, 且  $GE$  为可定位元素. 若  $ge$  也是可定位元素, 则  $GE$  和  $ge$  称为一对直接对应可定位元素. 否则, 若可重用局部中存在某个与  $ge$  同类型的可定位元素  $rge$  满足下列条件之一, 则称  $GE$  和  $rge$  为一对间接对应可定位元素: 1) 若  $ge$  为平面, 此时  $rge$  与  $ge$  同时满足平行、朝向一致、距离最近; 2) 若  $ge$  为

轴, 即某二次曲面  $f_i$  的轴, 此时  $rge$  所在的二次曲面与  $f_i$  同时满足轴平行、朝向一致、几何类型相同; 3) 若  $ge$  为边, 此时  $rge$  中的2个邻接面分别与  $ge$  的2个邻接面中的一个面同时满足平行、朝向一致且距离最近. 直接对应可定位元素和间接对应可定位元素统称为对应可定位元素。

由基于特征的参数化模型的建模方式<sup>[9-12,34]</sup>可知, 特征的定位信息通常是通过在特征的草图元素与该草图依赖面的几何元素之间设置约束关系实现的; 根据上文可知, 约束相关的草图元素在约束提升后关联三维几何元素, 因此简单局部定位信息的传递可通过在两局部之间寻找对应可定位元素, 并通过在对应可定位元素(实际上为关联的草图元素)之间传递定位约束来实现. 由于此时可重用局部尚未移植(重建)到当前设计模型中, 因此定位信息的传递由通过修改可重用局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图而实现。



### 5.2.1 删除原定位信息

考虑到可重用局部移植到当前设计模型中后, 由于放置环境的差异, 定位约束以及它们关联的局部外的几何元素将会失效, 因此本文删除可重用局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图中与定位约束以及它们关联的局部外的几何元素相关的图元素. 实际上, 此时带定位信息的三维尺寸约束图退化为局部的三维尺寸约束图. 例如, 图 6d 是在图 5d 的基础上删除了关联定位信息的节点  $l_1$ ,  $l_2$  以及边而获得.

### 5.2.2 基于对应定位元素的图元素移植

基于对应面、带定位信息的三维尺寸约束图以及对应可定位元素的定义, 可以确定两局部之间的对应可定位元素. 通过将简单局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图中的与可定位元素相关的图元素, 根据两局部之间可定位元素的对应关系, 移植到可重用局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图中, 以此来实现定位信息的传递.

假定  $D$  为待传递的定位信息(约束), 经过约束提升后, 其关联的几何元素(related geometric element, RGE)分别为  $RGE_1$  和  $RGE_2$ . 其中,  $RGE_1$  为简单局部的可定位元素且与可重用局部的三维几何元素(reusable subpart geometric element, RSGE)  $RSGE_1$ ; 相应地,  $RGE_2$  为设计模型中简单局部以外

的三维几何元素. 由于  $RGE_2$  本身属于重用设计中要重用的几何元素, 因此此处直接复制  $RGE_2$  对应的图节点到可重用局部对应的约束图中, 而与  $D$  相关的图元素的移植分 2 种情况分别进行处理.

情况 1.  $RSGE_1$  为可重用局部的可定位元素.

此时,  $RGE_1$  与  $RSGE_1$  为直接对应可定位元素. 假设  $RGE_1$  和  $RSGE_1$  关联的草图元素分别为  $C_i$  和  $c_i$ . 由于通过重建实现的局部移植, 系统保证移植前后局部参数化方式的一致性<sup>[9-12]</sup>, 因此当可重用局部移植到当前的设计模型中后, 可以直接将  $C_i$  与  $RGE_2$  之间的定位约束重用至  $c_i$  与  $RGE_2$  之间. 为此, 复制  $D$  对应的图边到可重用局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图中, 并分别与  $RSGE_1$  相应的图节点和已经复制过来的  $RGE_2$  对应的图节点相连接. 如图 6 所示, 由于面  $F_2, BF$  分别与面  $f_2, bf$  相对应, 因此边  $F_2 \cap BF$  与边  $f_2 \cap bf$  为对应边且为对应可定位元素. 将约束边  $D_2$  及其相关的约束元素节点  $E_2$  从图 6c 中移植到图 6e 中, 并用边  $D_2$  联接节点  $f_2 \cap bf$  与节点  $E_2$ .

情况 2.  $RSGE_1$  不是可重用局部的可定位元素.

此时, 需要在可重用局部的定位特征上寻找  $RGE_1$  的间接对应可定位元素. 通常, 定位特征通过其草图(轮廓)上的草图直线、草图点(包括二次曲面中心)与种子面上的几何元素设置几何约束或

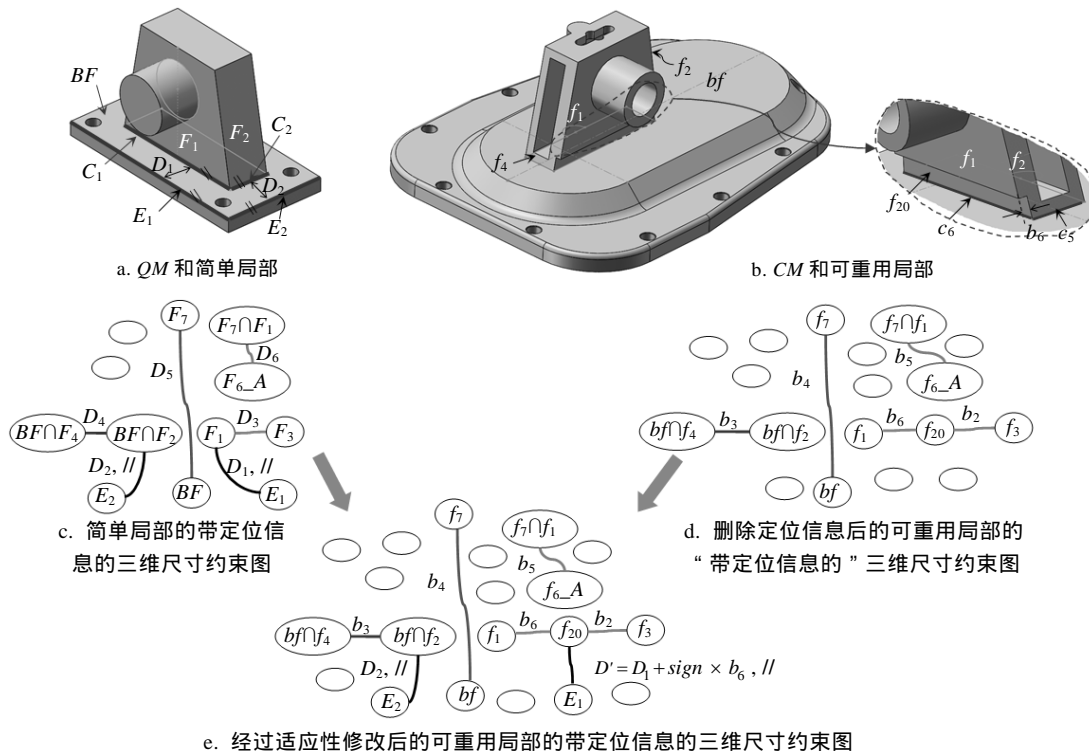


图 6 局部定位信息自动传递

尺寸约束来实现定位. 与文献[8]相同, 草图直线、草图点经过约束提升后, 分别关联三维模型的平面、三维模型的边或者二次曲面的轴. 因此本文寻找  $RGE_1$  的间接对应可定位元素主要围绕上述3类几何对应元素的确定而展开:

1) 若  $RSGE_1$  为平面, 根据间接对应可定位元素的定义, 从可重用局部定位特征相关的面中, 找到与  $RSGE_1$  同时满足平行、朝向一致、距离最近且为可定位元素的平面  $f_i'$  作为  $RGE_1$  的间接对应可定位元素, 将它关联的草图元素  $c_i'$  作为重用定位信息  $D$  所需的草图元素; 同时, 通过可重用局部对应的带定位信息的三维尺寸约束图, 获取  $RSGE_1$  与  $f_i'$  之间的尺寸设计意图, 即参数表达式信息, 连同  $D$  作为下一步移植可重用局部所需的尺寸约束. 如图6所示,  $D_1$  相关联的可定位元素  $F_1$  与  $f_1$  对应,  $f_1$  并非简单局部的可定位元素(如图5d所示). 尽管如此, 面  $f_{20}$  既跟草图线  $c_6$  关联, 又与面  $f_1$  同时满足平行、朝向一致且距离最近, 因此,  $f_{20}$  为  $F_1$  的间接对应可定位元素; 同时, 依据图6d,  $f_1$  与  $f_{20}$  的设计意图表达式为距离  $b' = \text{sign} \times b_6$  (当找到的面比  $RSGE_1$  更加接近局部外围轮廓时  $\text{sign} = -1$ , 否则  $\text{sign} = 1$ ). 当可重用局部移植到  $QM$  上后, 其定位约束的值变为  $D' = D_1 + \text{sign} \times b_6$ , 且几何约束保持不变. 根据上述思想, 将图6c中与  $D_1$  相关的元素移植到图6d中.

2) 若  $RSGE_1$  为轴, 根据间接对应可定位元素的定义, 从可重用局部定位特征相关的面中, 找到与  $RSGE_1$  所关联的二次曲面同时满足轴平行、朝向一致的同类型面  $f_i'$ , 将它的轴  $f_i' - A$  作为  $RGE_1$  的间接对应可定位元素, 并将  $f_i' - A$  关联的草图圆心  $cp_i'$  作为重用定位信息  $D$  所需的草图元素, 其他的操作与  $RSGE_1$  为平面时相同.

3) 若  $RSGE_1$  为边, 则对于边  $RSGE_1$  中的每个邻接面  $f_i$ , 从可重用局部定位特征相关的面中, 找到同时与  $f_i$  满足平行、朝向一致、距离最近的面  $f_i'$ . 再将这些找到的面的公共边  $E_i$  作为  $RGE_1$  的间接对应可定位元素, 并将  $E_i$  所关联的草图点作为重用定位信息  $D$  所需的草图元素, 其他的操作与  $RSGE_1$  为平面时相同.

根据上述图操作, 简单局部在设计模型中的定位信息, 伴随着两模型之间定位元素的确定而自动地适应性传递给了可重用局部.

### 5.3 可重用局部的自动重建

将经过局部形状自动传递后的可重用局部, 根据其构造历史以及修改后的带定位信息的三维尺寸约束图重建到当前的设计模型中, 即实现了局部自动适应性重用. 如图7所示, 在删除简单局部后, 首先将可重用局部(图6b所示)的定位特征(凸台-拉伸1)根据其新的定位信息(图6e所示)重建到种子面  $BF$  上. 根据前文可知, 边  $bf \cap f_2$  关联草图元素  $c_5$  (图6b所示), 因此图6e中图节点  $bf \cap f_2$  和图节点  $E_2$  之间的边信息(距离约束  $D_2$  和几何约束  $//$ )将被应用到重建的定位特征的草图元素  $c_5$  和边  $E_2$  上. 同理, 由于面  $f_{20}$  关联草图元素  $c_6$  (图6b所示), 因此图6e中图节点  $f_{20}$  和图节点  $E_1$  之间的边信息(距离约束  $D'$  和几何约束  $//$ )将被应用到重建的定位特征的草图元素  $c_6$  和边  $E_1$  上. 从而实现简单局部在设计模型上的定位信息适应性自动地传递到重建的可重用局部(定位特征)上. 其次, 在定位特征重建之后, 如图7所示, 可重用局部的其余特征根据其构造历史以及与定位特征之间依赖关系, 按顺序重建到设计模型中. 最终移植的可重用局部如图7b所示. 当可重用局部在设计模型中自动确定的定位信息未完全满足设计人员的设计需求时, 其定位信息需要人工交互修改.

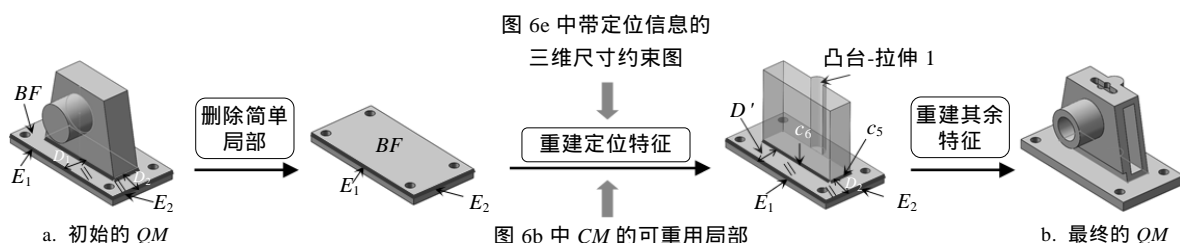


图7 局部自动适应性修改

## 6 系统实现

针对本文提出的局部自动适应重用方法, 开发

了原型系统 OSAD\_for\_Partial, 如图8所示. 该系统主要采用 C# 基于 SolidWorks 2014<sup>[9]</sup> 进行二次开发.

下面通过分析一个有代表性的例子(如图9所示)

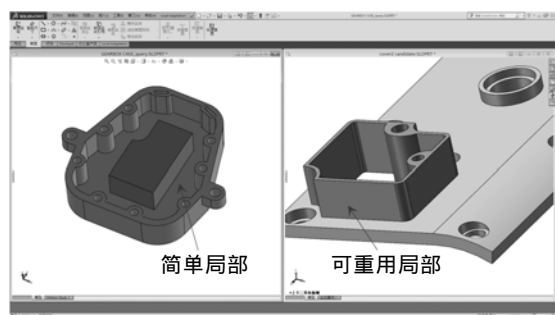


图 8 原型系统部分界面

来展示本文自动适应重用方法的特点;除了图 2, 9 所示的例子外, 还用如图 10 所示的 3 个例子进行方法有效性的展示.

1) 重建局部的几何细节来源于可重用局部而形状尺寸来源于简单局部

图 9 从重用局部的特征草图轮廓(图中金黄色的连续的封闭细曲线)的变化, 进一步展示了本文方法是一种从特征底层细节开始的满足形状需求的适应性方法. 从 3 张草图轮廓的变化可以看出,



图 9 摩托车车把手仪表区域局部自动适应重用

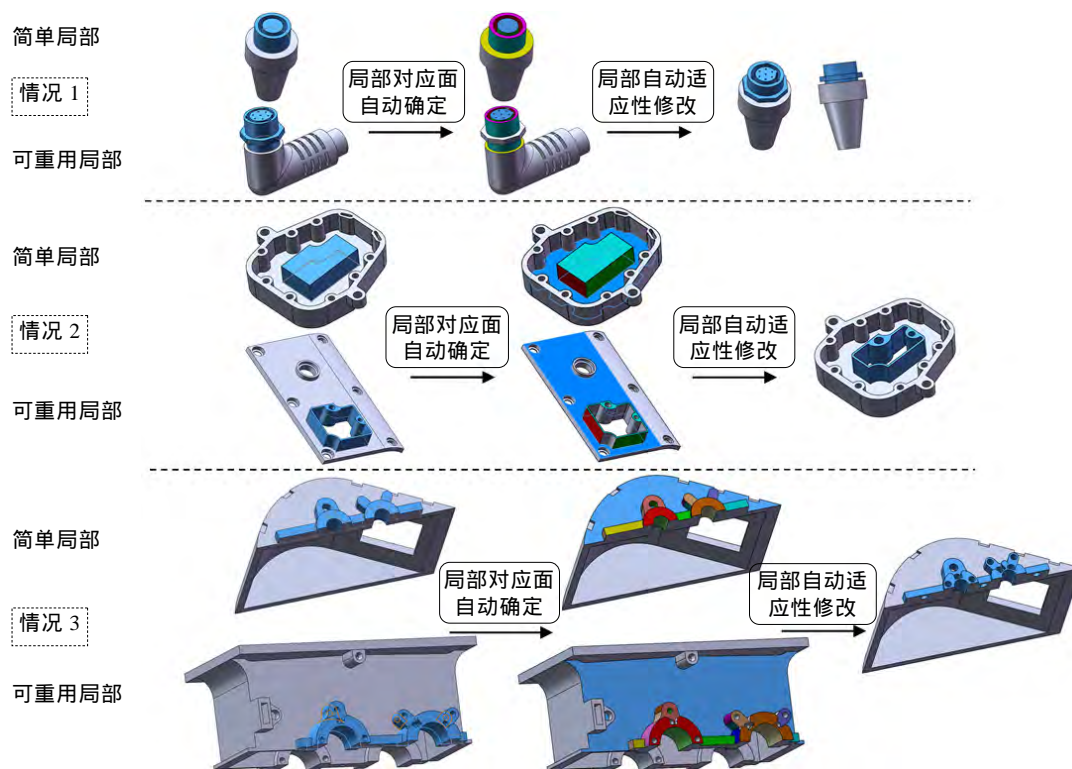


图 10 局部自动适应重用效果示意图

重建局部定位特征的草图轮廓除了尺寸差异之外与可重用局部定位特征的草图轮廓细节保持了一致, 如各草图中浅绿色虚线圈出的细节轮廓部分; 重建局部草图轮廓的尺寸与简单局部定位特征的草图轮廓相一致, 如各草图中红圈所在的角度值. 不仅如此, 重建局部中特征之间保持了可重用局部特征之间类似的几何分布关系. 同时, 根据简单局部和可重用局部之间的面对应关系, 以及简单局部黄圈所在的区域尺寸, 重建局部相应区域中的特征之间的分布相对于可重用局部原有的分布(可重用局部黄圈所在的特征分布)变得更加紧凑.

## 2) 重建局部的定位信息来源于简单局部

通过图 9 中定位特征定位信息的变化, 进一步展示本文方法是一种从简单局部继承定位需求的方法. 图 9 中, 简单局部和可重用局部的定位特征, 在它们各自的草图依赖面  $BF$  和  $bf$  上的定位信息随着 2 个依赖面的形状不同而存在差异, 其中简单局部的定位信息为草图线  $C_1$  与边  $E_1$  重合、草图线  $C_3$  与边  $E_2$  平行且距离为  $D_1$ ; 可重用局部的定位信息为草图线  $c_5$  与边  $e_1$  在它们的中点处重合、草图

线  $c_8$  与模型圆周边  $e_2$  同圆心. 通过本文方法, 可重用局部重建到设计模型中之后的定位信息与初始简单局部的定位信息一致.

图 10 中, 情况 1 展示在定位方式一致的情况下局部重建的效果, 情况 3 体现多个定位特征时的局部重建效果(可重用局部中有 3 个定位特征, 它们的草图分别用金黄、浅蓝和白灰进行了标志), 同时, 情况 2 和情况 3 在局部自动适应重用过程中, 既涉及到形状自动适应同时也涉及到定位信息自动适应.

## 7 方法分析

由于与本文直接相关的工作很少见, 此处, 将本文方法与目前针对几何模型开展适应性重用的相关研究工作通过 6 个方面做了间接的功能性比较: 1) 处理的模型类型; 2) 是否保结构约束<sup>[13]</sup>; 3) 是否基于语义; 4) 适应性修改的途径; 5) 是否支持模型局部重用设计; 6) 结果模型是否具有工业上的精确性. 根据表 1 所示的比较结果可以看出, 本文方法更加适合于工业领域的模型局部重用设计.

表 1 6 种方法比较结果

方法	模型类型	保结构约束	基于语义	适应性修改的途径	支持局部重用设计	结果精确
文献[26]	装配体	是	是	交互地修改形状控制参数	否	是
文献[27]	装配体	否	是	采用进化方式更改检索到的模型	否	是
文献[22]	网格模型	否	否	根据几何对应关系传递变形	否	否
文献[31]	网格模型	否	否	对模型进行分割和缝合	是	否
文献[8]	参数化模型	是	否	根据几何对应关系自动传递形状尺寸	否	是
本文	参数化模型	是	否	根据几何对应关系确定新的形状尺寸值和定位信息, 并据此进行局部重建	是	是

同时, 本文在形状传递部分上继承和发展了文献[8]中的相关工作, 即在文献[8]确定对应面方法的基础上增加种子面过滤来提升确定对应面的效率, 效率比较如表 2 所示. 表 2 中, 所有时间均通过在配置 Intel Core i5 3.2 GHz 的 CPU, 8 GB 内存, Windows 7 操作系统下的计算机中运行 20 次取平均所得. 尽管如此, 本文方法与文献[8]方法除了重用方式不同外, 还在以下方面存在差别: 1) 处

理对象; 2) 形状修改方式; 3) 自动适应过程中是否考虑定位约束; 4) 模型的参数化方式是否更改; 5) 确定面对应的方式. 从表 3 可以看出, 本文方法与文献[8]方法主要解决的问题是不同的.

尽管本文方法能够有效地针对参数化模型的局部开展自动适应重用, 但存在下列不足:

1) 为了使得形状传递能准确地进行, 要求给定的 2 个局部之间存在对应局部形状框架. 例如, 在图 11 的情况 4 中, 简单局部(模型  $QM'$  中的深灰色部分)的圆锥面  $F_1$  在可重用局部(模型  $CM'$  中的深灰色部分)中找不到同类型的面. 不仅如此, 在给定的交角差异阈值范围  $\xi$  内, 平面  $F_2$  在可重用局部中也找不到对应面. 根据本文方法, 两局部之间缺乏对应局部形状框架, 即它们之间无法自动

表 2 确定局部对应面的效率比较表

方法	图 2	图 9	图 10		
			情况 1	情况 2	情况 3
文献[8]	718.31	935.85	42.35	49.41	1 186.56
本文	69.69	87.12	14.32	15.98	109.23

表 3 2 种方法比较结果

方法	处理对象	形状修改方式	考虑定位约束	更改模型的参数化方式	重用方式	确定面对应的方式
文献[8]	整体模型	更改尺寸	否	否	用自动适应后的候选模型替代设计模型	穷举过滤
本文	局部模型	更改尺寸; 更改拓扑(局部移植)	是	是	用自动适应后的可重用局部替代设计模型中的简单局部	继承[8]的工作方式并增加种子面过滤

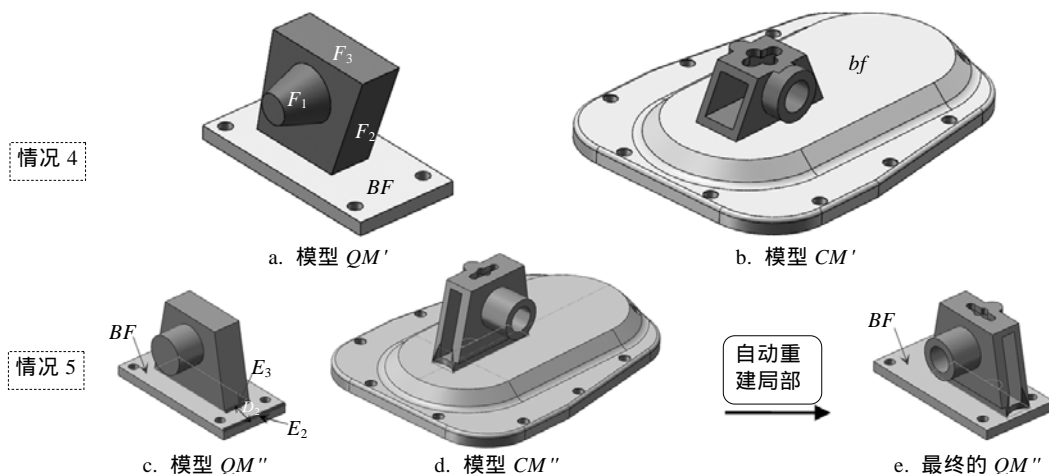


图 11 局部无法自动适应重用的例子

确定对应面, 因此简单局部中面与面之间的相对位置和相对朝向将无法自动传递到可重用局部中, 即可重用局部的形状无法根据简单局部的形状进行自动更新, 此时需要人工干预形状传递。

2) 为了使得定位信息能准确地传递, 要求两局部之间存在对应可定位元素。例如, 在图 11 的情况 5 中, 由于简单局部的可定位元素  $E_3$  在可重用局部中找不到对应的可定位元素, 因此当将可重用局部重建到简单模型  $QM''$  的种子面  $BF$  上后, 简单局部的  $D_2$  定位约束未得到适应性继承, 需要人工干预调整可重用局部在  $BF$  上的位置。

3) 考虑到基于特征建模中, 拉伸和旋转特征使用最广泛, 本文的局部主要以上述 2 类特征构成为主。此外, 由于自由曲面形状通常不是尺寸约束相关的, 因此本文的局部由平面和二次曲面构成。

## 8 结 论

尽管局部自动适应重用在局部重用设计中非常重要, 但目前相关的工作较少。本文根据当前设计模型中简单局部隐含的设计需求, 提出一种针对参数化模型的局部自动适应重用方法。该方法具有以下的特点: 1) 基于对应面和对应可定位元素, 可重用局部可以根据简单局部隐含的形状信

息和定位信息自动地准确地完成修改; 2) 基于种子对应面的过滤改善了原有面对应算法在确定局部面对应关系时的效率; 3) 基于带定位信息的三维尺寸约束图可以有效地在参数化模型局部之间识别关联的形状尺寸和对应可定位元素, 使得形状和定位信息能自动地准确地被传递。

由于局部自动适应重用是一个公认的难题, 本文仅解决了局部自动适应重用的部分问题, 未来将继续逐步对该问题进行深入的探索和研究。同时, 为了使本文方法更加通用, 下一步的工作将围绕解决文中的前提假设而展开, 例如, 1) 降低对应局部形状框架的要求, 使得对应面的类型可以不一致; 2) 在未找到对应可定位元素的前提下也可以实现定位信息的传递; 3) 将本文的局部自动适应重用方法推广到与外部特征高度耦合的待重用区域上等。

## 参考文献(References):

- [1] Gunn T G. The mechanization of design and manufacturing[J]. Scientific American, 1982, 247(3): 115-130
- [2] Ullman D G. The Mechanical Design Process[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2009: 1-362
- [3] Watson I, Perera S. Case-based design: a review and analysis of building design applications[J]. Artificial Intelligence for Engi-

- neering, Design, Analysis and Manufacturing, 1997, 11(1): 59-87
- [4] Chen X, Gao S M, Guo S, *et al.* A flexible assembly retrieval approach for model reuse[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(6): 554-574
  - [5] Tsai C Y, Chang C A. A two-stage fuzzy approach to feature-based design retrieval[J]. *Computers in Industry*, 2005, 56(5): 493-505
  - [6] Chakrabarti A, Shea K, Stone R, *et al.* Computer-based design synthesis research: an overview[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2011, 11(2): 021001-021010
  - [7] Liu Z B, Bu S H, Zhou K, *et al.* A survey on partial retrieval of 3D shapes[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2013, 28(5): 836-851
  - [8] Pan W B, Chen X, Gao S M. Automatic shape adaptation for parametric solid models[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 62: 78-97
  - [9] The Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. SolidWorks web help[OL]. [2015-02-26]. <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>
  - [10] Hu Renxi, Liu Changli. UG NX9.0 Chinese version from the entry to the master[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014: 21-350 (in Chinese)  
(胡仁喜, 刘昌丽. UG NX9.0 中文版机械设计从入门到精通[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 21-350)
  - [11] Yu Wenqiang, Du Zesheng. UG NX 9.0 Mechanical design guide[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 1-255 (in Chinese)  
(于文强, 杜泽生. UG NX 9.0 机械设计教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 1-255)
  - [12] Hu Renxi, Liu Changli. SolidWorks 2014 Chinese version from the entry to the master[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014: 1-530 (in Chinese)  
(胡仁喜, 刘昌丽. SolidWorks 2014 中文版从入门到精通[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 1-530)
  - [13] Mitra N J, Wand M, Zhang H, *et al.* Structure-aware shape processing[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2014: Article No.13
  - [14] Bai J, Gao S M, Tang W H, *et al.* Design reuse oriented partial retrieval of CAD models[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(12): 1069-1084
  - [15] Bejarano J C R, Coudert T, Vareilles E, *et al.* Case-based reasoning and system design: an integrated approach based on ontology and preference modeling[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2014, 28(1): 49-69
  - [16] Bai Jing, Zhou Guangping. Design reuse oriented construction of design feature models of engineering parts[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(4): 622-632 (in Chinese)  
(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(4): 622-632)
  - [17] Zhang Kaixing, Zhang Shusheng, Bai Xiaoliang. Automatic extraction of common reusable partial structures in 3D CAD models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2011, 23(9): 1512-1519 (in Chinese)  
(张开兴, 张树生, 白晓亮. 三维 CAD 模型公共可重用局部结构自动提取[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(9): 1512-1519)
  - [18] Zhang Xin, Mo Rong, Chen Tao, *et al.* Design intent preserved reuse of 3D CAD models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(10): 1356-1362 (in Chinese)  
(张 欣, 莫 蓉, 陈 涛, 等. 面向设计意图不变的三维 CAD 模型重用方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(10): 1356-1362)
  - [19] Tao S Q, Huang Z D, Ma L J, *et al.* Partial retrieval of CAD models based on local surface region decomposition[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(11): 1239-1252
  - [20] 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
  - [21] Li Z, Zhou X H, Liu W. A geometric reasoning approach to hierarchical representation for B-rep model retrieval[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 62: 190-202
  - [22] Sumner R W, Popovic J. Deformation transfer for triangle meshes[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2004: 399-405
  - [23] van Kaick O, Tagliasacchi A, Sidi O, *et al.* Prior knowledge for part correspondence[J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 30(2): 553-562
  - [24] Kaick O V, Zhang H, Hamarneh G, *et al.* A survey on shape correspondence[J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 30(6): 1681-1707
  - [25] Hua K F, Faltings B, Smith I. CADRE: case-based geometric design[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1996, 10(2): 171-183
  - [26] Liu Q S, Xi J T. Case-based parametric design system for test turntable[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(6): 6508-6516
  - [27] Zhang X T, Peng G L, Hou X, *et al.* A knowledge reuse-based computer-aided fixture design framework[J]. *Assembly Automation*, 2014, 34(2): 169-181
  - [28] Wang D, Zhang W H. A general material perturbation method using fixed mesh for stress sensitivity analysis and structural shape optimization[J]. *Computers & Structures*, 2013, 129: 40-53
  - [29] Lu Difei, Zou Wanhong, Ye Xiuzi. Mesh deformation clone based on local affine transform[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(5): 595-599 (in Chinese)  
(卢涤非, 邹万红, 叶修梓. 基于局部相似变换的网格变形复制[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(5): 595-599)
  - [30] Brouet R, Sheffer A, Boissieux L, *et al.* Design preserving garment transfer[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2012: Article No. 36
  - [31] Lee Y, Ma J, Choi S. Automatic pose-independent 3D garment fitting[J]. *Computers & Graphics*, 2013, 37(7): 911-922
  - [32] You C F, Tsai Y L. 3D solid model retrieval for engineering reuse based on local feature correspondence[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46(5-8): 649-661
  - [33] Kumar A V, Yu L C. Sequential constraint imposition for dimension-driven solid models[J]. *Computer-Aided Design*, 2001, 33(6): 475-486
  - [34] Chen X P, Hoffmann C M. Towards feature attachment[J]. *Computer-Aided Design*, 1995, 27(9): 695-702