

保持柱状体特征的三维 CAD 模型直接编辑方法

郝良洲, 徐延宁*, 梁聪, 王政, 王璐, 孟祥旭

(山东大学软件学院 济南 250101)
(xyn@sdu.edu.cn)

摘要: 针对传统的三维 CAD 模型编辑通常会改变模型的拓扑信息且依赖于建模特征信息问题, 提出一种保持柱状体特征的三维 CAD 模型直接编辑方法. 该方法依据边界表示模型构建柱状体特征, 将编辑操作在柱状体特征内传播, 自动修改关联的几何元素, 保持柱状体拓扑不变, 从而支持符合设计意图的高效编辑. 主要定义了一种基于边界表示的柱状体特征, 将点、边和面的直接编辑操作映射为对特征面元素的编辑; 设计了一套面向柱状体特征的约束传播算法, 通过约束求解判定编辑操作的有效性, 求解需要改动的相关点、边和面, 对模型更改符合用户意图. 最后基于开源 CAD 引擎 Open CASCADE(OCC), 对正六棱台、电路板模型等进行了实验, 证明了方法的有效性.

关键词: 三维 CAD; 特征设计; CAD 直接编辑

中图分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023.2023-00007

A Direct Modeling Method for 3D CAD Models Preserving Columnar Features

Hao Liangzhou, Xu Yanning*, Liang Cong, Wang Zheng, Wang Lu, and Meng Xiangxu

(School of Software, Shandong University, Jinan 250101)

Abstract: Aiming at the problem that traditional 3D CAD model editing often changes the topology information of models and relies on modeling feature information, this paper proposes a direct modeling method for CAD models that preserves columnar body features. This method builds columnar body features based on boundary representation(B-Rep), propagates editing operations within the columnar body features, modifies associated geometric elements while maintaining the topology. The method mainly includes defining a columnar body feature based on B-Rep, which maps direct modeling operations for points, edges, and faces to editing the surface elements of the feature; providing a constraint propagation algorithm for columnar body features, which determines the effectiveness of editing operations through constraint solving and meets user intent. Based on the open source CAD engine Open CASCADE(OCC), an experimental verification is conducted on hexagonal frustums, circuit board models, etc., which proves the effectiveness of the method.

Key words: 3D CAD; feature design; CAD direct modeling

三维 CAD 在机械产品设计中广泛应用, 特征建模是三维 CAD 的典型建模方法. 拉伸、扫描和圆角等特征包含了设计语义, 以支持对模型的高

效的编辑. 但是特征信息复杂多样, 由于缺少统一的、中性的描述形式, 特征建模往往依赖特定的 CAD 软件. 模型的直接编辑基于通用的、仅包含

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-10-27. 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1708904); 国家自然科学基金(62272275). 郝良洲(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD 直接编辑; 徐延宁(1975—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 论文通信作者, 主要研究方向为计算机图形学; 梁聪(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为三维 CAD 内核架构; 王政(1979—), 男, 硕士, 实验师, CCF 会员, 主要研究方向为高性能计算在图形学的应用; 王璐(1981—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学; 孟祥旭(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学.

拓扑和几何信息的模型, 而不依赖特定 CAD 软件以及模型建模的历史信息.

模型的直接编辑常用于自然场景、人物的三维内容创作中, 通过拖拽几何网格的点线面等元素改变几何形状, 但这类编辑不考虑拓扑结构的维护, 常常导致编辑平面碎裂, 因而难以适用于零部件拓扑保持的 CAD 编辑中.

三维 CAD 模型直接编辑的主要特点是理解用户对顶点、边、面等几何元素的修改意图, 在不包含特征信息的几何模型上实现保持拓扑形状的高效编辑^[1]. 直接编辑的研究主要集中在对编辑操作的理解以及拓扑几何约束求解; 实践应用中, 一些商用 CAD 软件支持面的推拉、旋转等直接编辑操作, 驱动相关几何元素变化以维持拓扑形状.

本文提出了一种保持柱状体特征的直接编辑方法, 可理解用户对于 CAD 模型的顶点、边、面等底层几何元素的编辑意图, 通过引入基于柱状体特征的约束建模及求解机制, 实现符合编辑语义的高效修改.

1 相关工作

在过去二十年中, 基于参数的建模^[2-3]和基于特征的建模^[4-5]在 CAD 中发挥了巨大作用, 它们使设计者能够创建或编辑高级设计元素, 即特征. 特征具有丰富的工程和制造语义, 然而基于特征的建模有其自身的缺点, 如高复杂性和顺序依赖性, 这可能会阻碍建模的灵活性. 相比之下, 直接编辑技术是一种新兴技术. 直接编辑对普通用户来说是友好的, 因为用户可以很容易地操纵几何元素来编辑本地模型, 而不需要理解特征模型中复杂的设计语义.

与特征建模相比, 直接编辑是一种轻量级的编辑方式, 其唯一输入是 B-Rep 模型. 用户可以直接拖动或旋转几何元素来编辑模型, 其编辑效率和灵活性引起了业界的极大关注. 在工业界, 直接编辑技术已经在 SolidWorks^①, SolidEdge^②和 Creo^③等商业 CAD 系统中得到应用. 然而大多数工业软件并不支持对顶点和边进行编辑, 这主要是因为其复杂性高、编辑意图难以理解. 并且, 在实践中发现, 使用某些工业软件对模型面进行编辑时,

无法保持之前的某些特征或者与之前的形状差异较大.

相关研究中, 一部分工作将直接编辑转换为对体积进行操作, Kim 等^[6]通过逐步体积分解将 B-Rep 模型分解为简单的体积, 利用分解后的简单体生成一个特征树. 用户可以通过转换或删除特征树的组成部分来修改 B-Rep 模型. Fu 等^[7]提出了将直接编辑操作平滑地转换为修改特征模型操作的方法. Zou 等^[8-9]提出了提升算法鲁棒性和解决几何拓扑不一致的方法, 主要针对推拉模型面, 并未涉及点和边的编辑.

2 保持柱状特征的直接编辑方法概述

CAD 建模过程中, 基于特征的设计通常会产生如图 1 所示大量的柱状体特征. 本文面向柱状体特征的直接编辑主要意义可以归纳为 3 个方面: (1) 基于 STEP 中性文件, 不依赖 CAD 模型的设计历史, 支持符合意图的直接编辑修改; (2) 扩展了传统的拉伸、扫掠和放样等特征操作, 如放样操作中固定 2 个轮廓中的一个, 应用本文方法调整另一个, 在 2 个轮廓间填充合法的柱面; (3) 传统的特征操作通常生成规则的柱状体, 而直接编辑方便生成如图 2a 所示不规则的柱状体结构. 本文主要围绕直接编辑应用论述.

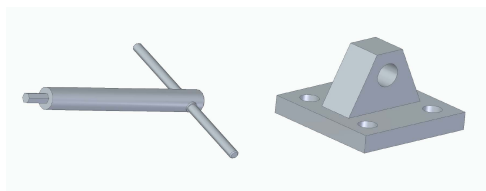


图 1 柱状特征零件实例

2.1 柱状体特征

定义 1. 单一柱状体特征. 对于任意一个模型 M , 存在这样的平面 $S \in M$, 使得 M 中至多只有一个平面与 S 不相邻, 则称模型 M 是单一柱状体. 其中, 与 S 相邻的所有平面为柱面, S 和其不相邻的唯一一个平面(如果存在)为非柱面.

定义 2. 复合柱状体特征. 模型 M 包含 2 个单一柱状体 M_1 和 M_2 , 非柱面 $S_1 \in M_1$ 、非柱面 $S_2 \in M_2$, 如果模型 M 可以由 M_1 和 M_2 进行布尔并运算

① <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>

② <https://solidedge.siemens.com/en>

③ <http://www.ptc.com/en/products/creo>

得到, 且满足 $S_1 \cap S_2 = S_1$ 或 $S_1 \cap S_2 = S_2$, 则称模型 M 为复合柱状体。

根据定义, 如果一个柱状体的所有面均为平面, 则柱面最多由图 2a 所示 4 条边构成。一旦与 S 相邻的柱面中出现多于 4 条边构成的面, 必然会出现有 2 个或 2 个以上的面与 S 不相邻, 不符合定义, 如图 2b 所示。

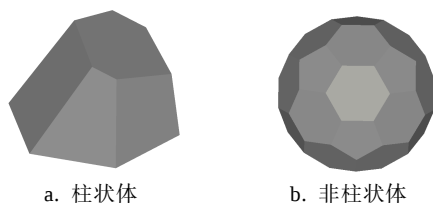


图 2 柱状体与非柱状体

本文方法直接编辑的对象是被标记为非柱面的面或其子元素^[10], 文中讨论的柱状体的柱面均由 4 条边 4 个顶点构成。

2.2 整体流程

本文方法的输入是用户选择的待编辑几何元素, 编辑操作为几何元素的平移和旋转等, 返回结果为编辑后更新的模型。整体流程如图 3 所示。

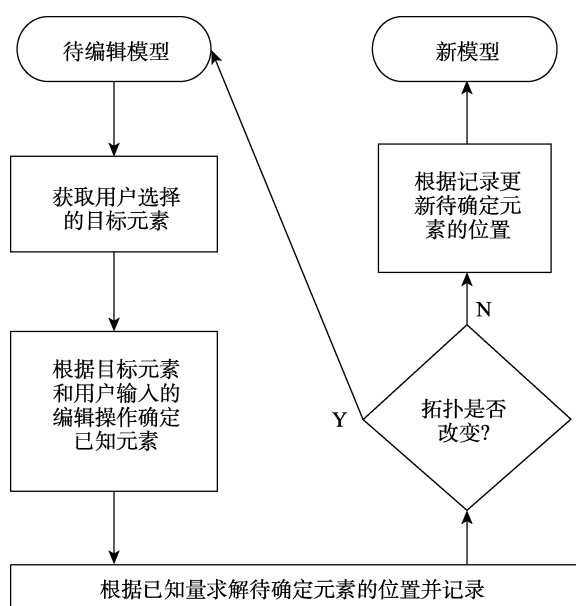


图 3 本文方法整体流程

对于不同几何元素的直接编辑, 本文方法都采取一个共同的思想: 首先确定哪些元素是已知的, 识别出哪些元素是要发生变化的, 依据已知的量求解变化的量(目标元素视为已知)。在这个共同思想的指导下进行分类讨论, 具体问题具体分析, 不同的问题采取不同的求解方式。方法的重点是

不同语义下的各种求解方式, 即图 3 中求解待确定元素位置的过程。

3 直接编辑方法分解实现

本文方法支持顶点移动、边和面进行平移和旋转, 平移和旋转这 2 种移动方式的原理和算法流程基本相同, 本节将以一个正六棱台上的点边面的平移为例描述算法的核心步骤。根据第 2 节给出的定义可知, 六棱台的上下 2 个六边形平面是非柱面, 其余平面为柱面。

3.1 拓扑保持判断

通过判断所有柱面的拓扑保持, 可以实现判断单一柱状体结构的拓扑保持。对于每个柱面, 如果其法向未发生变化, 则判断长度发生变化的边的 2 个顶点的顺序是否颠倒导致拓扑改变, 如图 4 所示; 如果法向发生变化, 则判断其 2 个对角线端点的位置关系, 当出现对角线 AD 在 BC 的同一侧且 BC 也在 AD 的同一侧的情况, 则当前面的拓扑发生改变, 如图 5 所示。

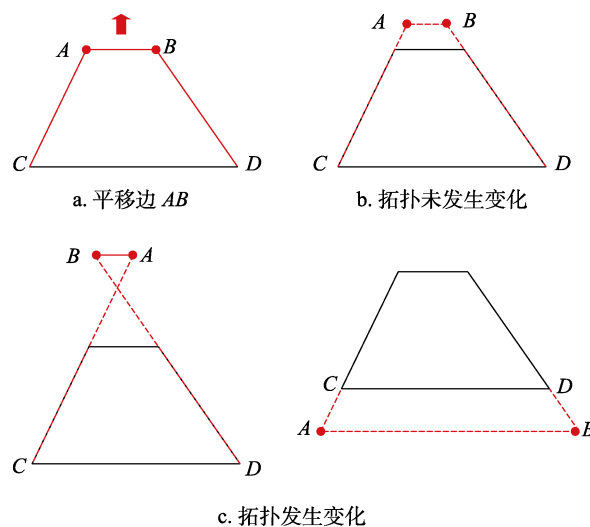


图 4 柱面法向不变的情况

3.2 保持柱状体特征的面编辑

对柱状体非柱面的直接编辑存在 2 类编辑语义, 分别是图 6a 所示保持目标面的形状大小不变和图 6b 所示保持柱面的法向不变, 即维护柱状的形状不变。

保持目标面的形状大小不变时, 目标平面移动过后, 可能会导致原本柱面上的顶点不再共面。考虑如图 7a 所示的六棱台, 将图中用红色标注的非柱面 $ABCDEF$ 往某个方向平移过后, 沿着直线

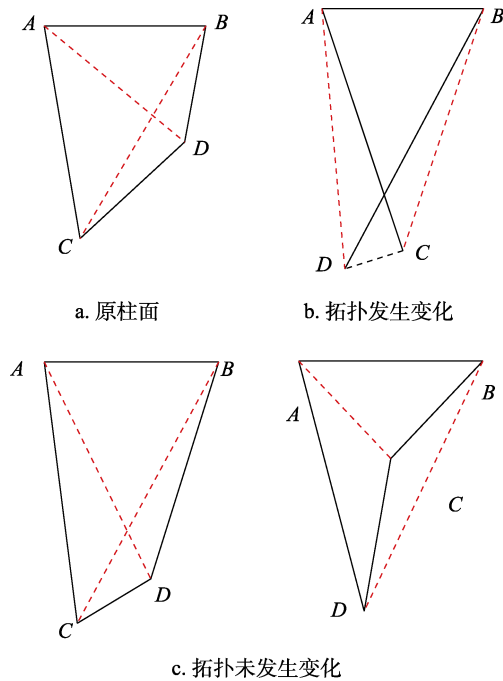


图 5 柱面法向变化的情况

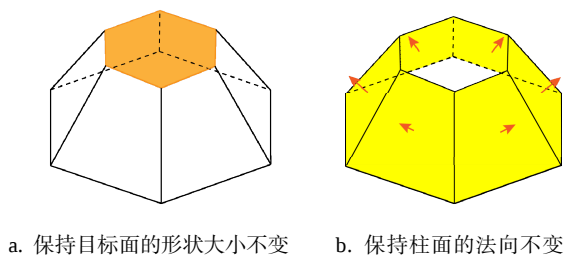


图 6 面编辑的 2 类语义

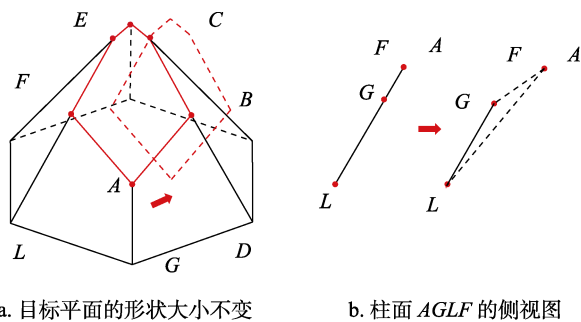


图 7 柱面的约束冲突

AF 的方向观察可以发现, 柱面 AGLF 的 4 个顶点在编辑过后显然已经不共面, 如图 7b 所示. 当编辑模型中的某个元素时, 需要维持原模型所有平面内的所有元素在编辑之后仍然处于同一平面之中, 这也是本文方法需要解决的问题之一.

由于 3 点确定一个平面, 对于包含 4 条边的柱面, 在保持目标面的形状大小不变的情况下, 每个柱面上都有 2 个顶点同时发生变化, 此时任何一个

柱面上都只有 2 个顶点的位置是已知的. 因此针对这种情况, 除了待编辑的非柱面形状大小不变外, 指定其相对的另一个非柱面上的其中一个顶点的位置不变且另一个非柱面的法向不变, 称这个位置不变的顶点为锚点. 默认情况下将距离目标面最远的顶点作为锚点. 锚点确定之后, 其所在的柱面上已有 3 个顶点的位置已知, 如图 8b 所示的面 S_1 和 S_2 . 求解当前柱面上最后一个待确定位置的顶点的策略是: 使用当前柱面的新位置与原顶点所在的另外 2 个平面求交(以下简称三面求交), 求交得到的解就是最后一个顶点的新位置, 如图 8c 所示的顶点 H 和 L .

对于其他待确定顶点的位置, 采取传播的策略求解, 即将先确定的变量作为已知量参与到后续求解变量的过程中. 算法 1 给出了保持目标面形状大小不变的编辑操作的伪代码, 传播过程如图 8 所示.

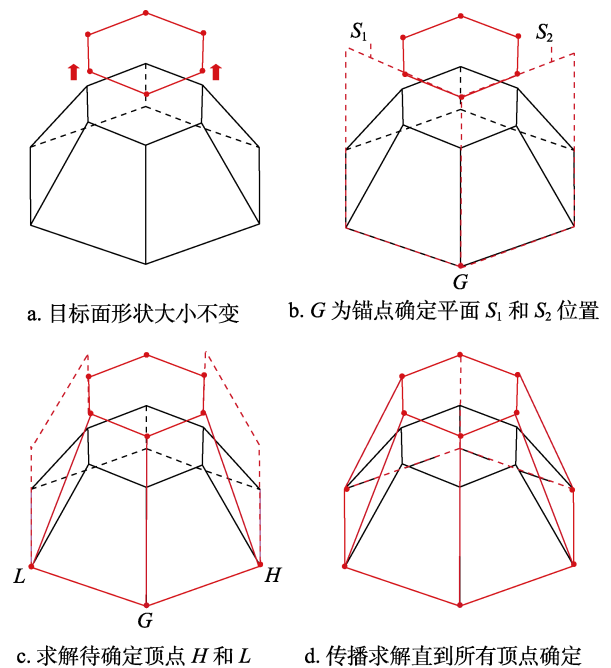


图 8 维持目标平面形状大小不变的情况

算法 1. KeepFaceUnchanged.

输入. 目标非柱面 F , 移动向量 T .

输出. 编辑后的模型 M' .

$N_{\text{face}} \leftarrow \emptyset$, $N_{\text{vertex}} \leftarrow \emptyset$

for each vertex $\in F$ do

add vertex.Trans(T) to NewKnownVertexPosition

$V_{\text{new}} \leftarrow \text{FindAnchor}()$

$F_{\text{col}} \leftarrow \text{GetColumnarFaces}()$

for each F_{col} do

$F_{\text{new}} \leftarrow \text{BuildNewFace}(V_{\text{new}}, \text{NewKnownVertex-}$

Position)

```

 $V_{\text{new}} \leftarrow \text{IntersectionOfThreeFaces}(F_{\text{new}})$ 
if IsTopoChanged( $F_{\text{new}}, V_{\text{new}}$ ) then return
add  $F_{\text{new}}$  to  $N_{\text{face}}$ 
add  $V_{\text{new}}$  to  $N_{\text{vertex}}$ 
 $F.$ Transform( $T$ )
 $M' \leftarrow M.$ update( $N_{\text{vertex}}$ )
 $M' \leftarrow M'.$ update( $N_{\text{face}}$ )
return  $M'$ 

```

传播的策略也可以应用于柱状特征生成中. 传统的构建柱状特征的方式一般需要完整的轮廓曲线作为输入, 会出现基于输入轮廓无法生成有效拓扑几何形状的问题, 在一定程度上限制了建模的灵活性. 在使用算法 1 生成柱状特征时, 只需要确定其中一个非柱面上的顶点位置以及一个锚点的位置, 即可自动计算生成柱状特征的其余所有侧面.

对于柱状体非柱面的第 2 类编辑语义, 先求出目标平面的新位置, 再用这个新位置与所有柱面的交线求交, 可以得到所有待确定顶点的位置, 如图 9 所示.

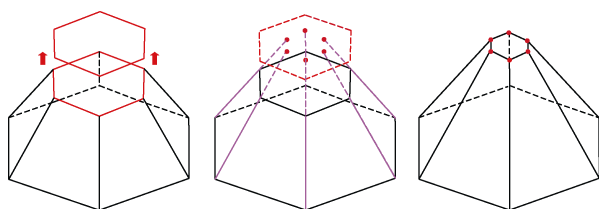


图 9 维持柱面的法向不变的情况

3.3 保持柱状体特征的顶点编辑

待编辑的顶点保持其在非柱面所在平面内且不改变模型拓扑结构的情况下自由移动, 如图 10a 所示. 指定非柱面上与目标顶点 A 相邻的顶点 B 和

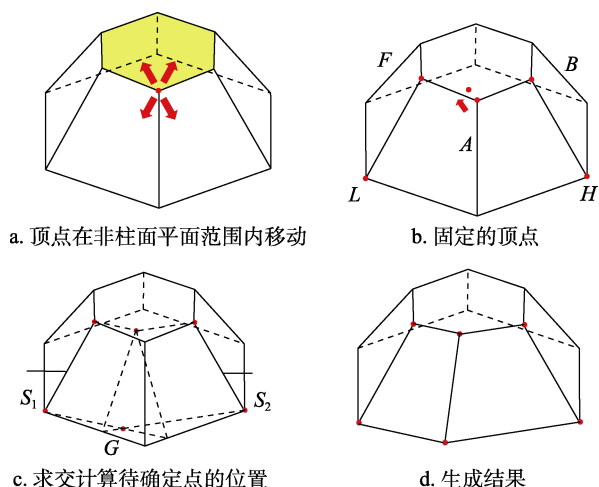


图 10 点的编辑

F , 以及 2 个柱面上与目标顶点呈对角线的 2 个顶点 H 和 L 位置不变, 待确定的顶点是与目标顶点相邻的另一个点 G , 如图 10c 所示. 与目标顶点相邻的 2 个柱面分别有 3 个点的位置是确定的, 从而可以分别确定这 2 个柱面的新位置, 即图 10c 所示 S_1 和 S_2 , 再用新平面通过三面求交来计算待确定顶点的新位置. 算法 2 给出了顶点编辑操作的伪代码, 最终结果如图 10d 所示.

算法 2. MoveVertex.

输入. 目标顶点 V , 要进行的移动 T .

输出. 编辑后的模型 M' .

```

 $N_{\text{face}} \leftarrow \emptyset, N_{\text{vertex}} \leftarrow \emptyset$  NewKnownVertexPosition  $\leftarrow V.$ Trans( $T$ )
 $F_{\text{col}} \leftarrow \text{GetColumnarFaces}()$ 
 $F_{\text{nei}} \leftarrow \text{GetNeighboringFaces}(V)$ 
 $V_{\text{nei}} \leftarrow \text{GetNeighboringVertices}(V)$ 
for each face  $\in F_{\text{nei}} \ \&\& \in F_{\text{col}}$  do
     $F_{\text{new}} \leftarrow \text{BuildNewFace}(V_{\text{nei}}, \text{NewKnownVertexPosition})$ 
     $V_{\text{new}} \leftarrow \text{IntersectionOfThreeFaces}(F_{\text{new}})$ 
    if IsTopoChanged( $F_{\text{new}}, V_{\text{new}}$ ) then return
    add  $F_{\text{new}}$  to  $N_{\text{face}}$ 
    add  $V_{\text{new}}$  to  $N_{\text{vertex}}$ 
 $M' \leftarrow M.$ update( $N_{\text{vertex}}$ )
 $M' \leftarrow M'.$ update( $N_{\text{face}}$ )
return  $M'$ 

```

3.4 保持柱状体特征的边编辑

对于柱状体的边, 如图 11a 所示, 保持非柱面的边在其非柱面所在平面内且不改变模型拓扑结构的情况下自由移动. 与第 3.3 节中顶点的编辑不同的是, 在非柱面所在平面内移动一条边时, 当前边所在的柱面 $ABHG$ 上有 2 个点的位置同时发生变化. 这时需要在当前柱面上找到一个“平衡点”, 如图 11b 所示, 目标边分别与所在柱面上另外 2 个顶点确定 2 个平面 S_1 和 S_2 , 它们和底面三面求交得到平衡点的位置. 之后, 如图 11c 所示, 平衡点和目标边确定一个新平面的位置, 称之为“平衡面”; 再用平衡面通过三面求交来计算待确定顶点的新位置, 最终结果如图 11d 所示.

3.5 面向复合柱状体的方法拓展

复合柱状体特征是对单一柱状体特征的拓展. 图 12 所展示的模型均为复合柱状体, 贴合面在复合柱状体中以图 12a 所示环形平面的形式出现或者如图 12b 所示不出现.

如果贴合面是环形面, 可以直接应用第 3.2 节~3.4 节的算法, 只需要判断编辑过后的结果是否仍然满足复合柱状体的定义即可. 如果贴合面不存在, 则需要将单一柱状体上的传播过程扩展

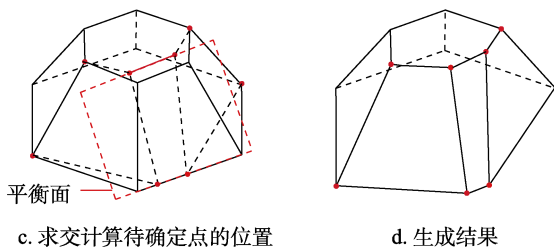
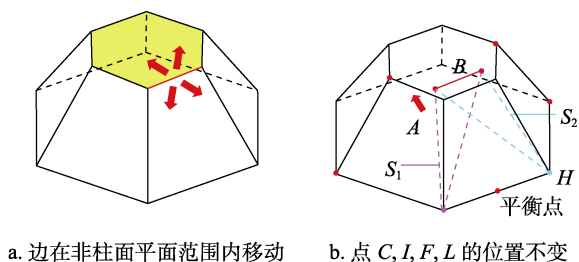


图 11 非柱面边的编辑

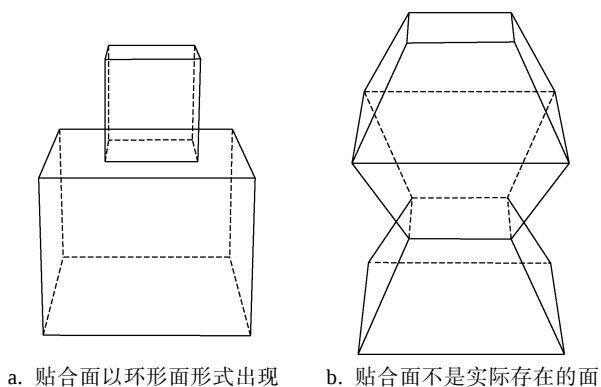


图 12 2 种复合柱状体的示例

到逐层传播.

第 3.2 节详细描述了保持非柱面形状大小不变的语义下移动非柱面的方法, 对复合柱状体的非柱面的编辑也需要应用传播的思想, 并且需要进行逐层传播.

对于图 12b 所示的复合柱状体, 首先将其视为如图 13 所示由多个单一柱状体构成. 如果保持非柱面 S_1 的形状大小不变并对其进行移动, 则先对黄色的单一柱状体应用算法 1 求解出平面 S_2 上 4 个顶点的位置. 现在, 对于绿色的单一柱状体, 平面 S_2 发生变化且顶点的位置已经确定, 再次使用算法 1 求解出平面 S_3 上 4 个顶点的位置, 重复上述过程, 直到所有顶点位置全部确定. 同样可以对贴合面进行编辑, 如果编辑的目标平面是贴合面, 则需要往 2 个方向同时进行传播.

同理, 上述将复合柱状体视为由多个单一柱状体构成并逐层进行传播的思路也适用于对顶点和边的编辑.

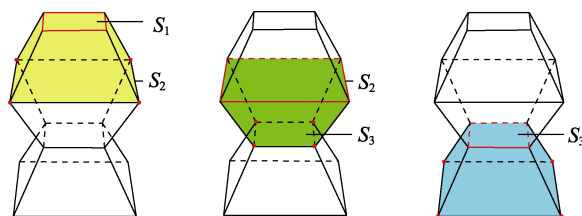


图 13 复合柱状体的传播

4 实验结果与讨论

4.1 实验结果

本文实验的数据为 STEP 中性数据, 数据内存表示基于通用的 B-Rep 表示, 实现中使用了 OCC 内核拓扑几何模块, 但所实现的直接编辑功能独立于 CAD 内核的建模操作. 本文工作在实现过程中, 对通用拓扑元素封装适配屏蔽不同 CAD 内核的数据访问接口的命名差异, 同时扩展拓扑元素类型, 以更好地描述柱状体特征. 图 14 展示了本文方法在正六棱台上的若干直接编辑的结果.

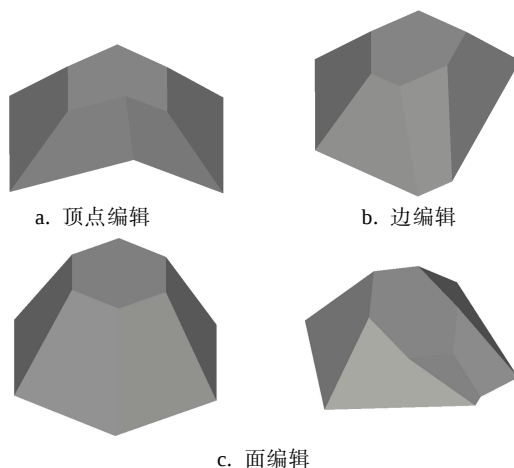


图 14 顶点、边、面若干直接编辑结果

图 15 展示了对同一个油缸附件模型(图 1 右), 分别在 SolidEdge 软件中和本文实现的原型系统中进行相同的面编辑呈现出相同的结果.

图 16 展示了本文方法对表座模型的点和边进行直接编辑的结果. CAD 软件中不支持对这类顶点和边的编辑, 而三维内容创作软件中对点和边的编辑只能适用于没有拓扑约束的网格模型. 此外, CAD 软件中的直接编辑通常只允许目标面沿其法线方向进行移动, 本文基于传播策略的方法可以支持目标面保持形状大小不变的情况下任意移动, 如图 17 所示. 图 18 展示了本文方法对电路板局部进行直接编辑的结果.

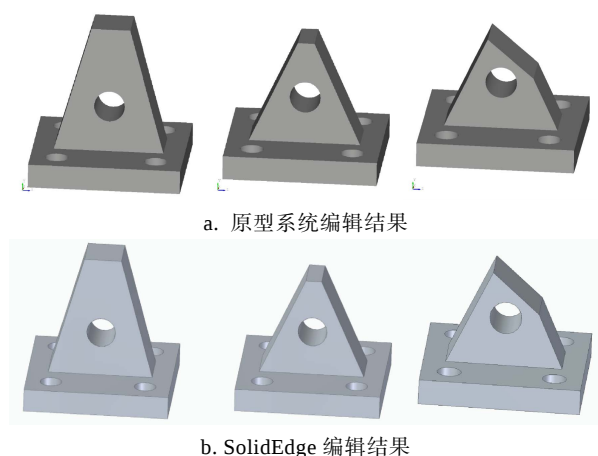


图 15 本文方法与 SolidEdge 对比

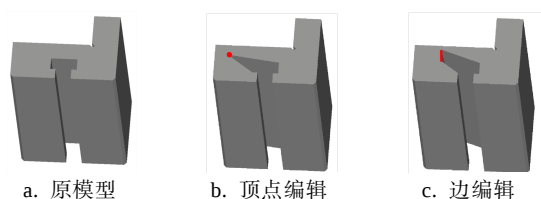


图 16 表座模型直接编辑

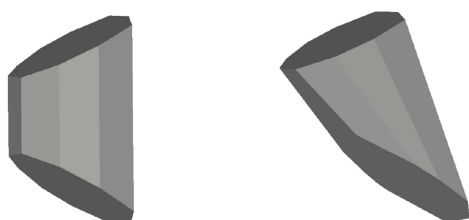
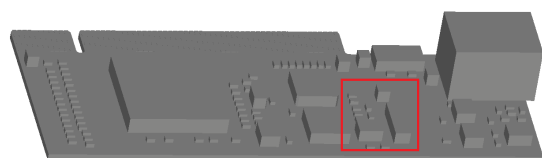
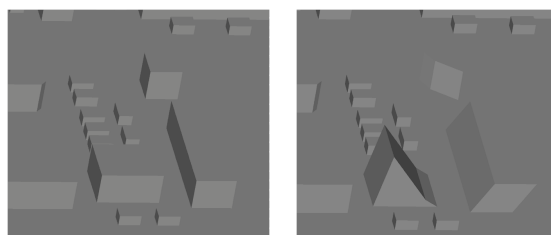


图 17 平面沿非法线方向移动



a. 电路板原模型



b. 原模型局部

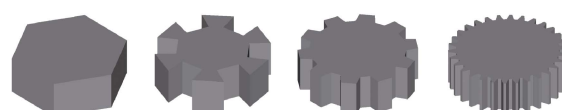
c. 局部编辑后

图 18 电路板模型直接编辑

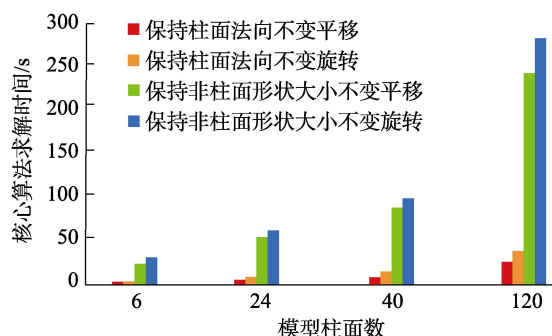
图 19 展示了对不同复杂度的齿轮模型采用第 3.2 节的算法执行 1 000 次的核心算法求解时间, 性能满足实时要求。

4.2 锚点选择策略

对模型边和面的直接编辑算法中都涉及指定



a. 不同面数的齿轮模型



b. 执行1 000次的耗时折线图

图 19 性能测试

锚点, 如果在某个待确定位置的柱面上的 4 点中有 2 个顶点的位置在编辑过程中同时发生变化, 此时就需要确定锚点。

在第 3.2 节描述的算法 1 中, 手动指定了一个待确定点作为锚点。任意点作为锚点都不会影响算法的执行, 但对直接编辑结果产生影响。例如, 图 7 中的平面 $AGLF$ 在点 A 和点 F 移动一定距离的情况下, 用距离较远的点 (L) 作为锚点生成的新平面 (AFL), 比用距离较近的点 (G) 作为锚点生成的新平面 (AFG) 与原平面的角度差异更小, 如图 20a 所示。新平面与原平面的角度差越小, 编辑后的模型视觉效果与原模型的差异就会相对越小。本文方法计算了所有待确定点与目标元素的欧几里得距离, 选取距离最远的点作为锚点进行后续的计算或者是传播过程。图 20c 和图 20d 展示了对相同模型进行相同的编辑而选取不同的顶点作为锚点所产生的差异, 图 20b 中青色表示的面是目标平面, 点 A 是距离其最近的顶点, 点 B 是距离最远的顶点, 以距离最远的顶点作为锚点更能保持原柱状体的形状特征。

4.3 传播策略

图 8 展示向锚点的两侧同时传播, 如果只从一侧进行传播, 则会得到不同的结果, 因为面的角度的变化幅度会随着传播逐步放大。使用双向传播策略比单向传播可以更好地保持柱状体的形状。图 21 展示了 2 种传播策略所产生的差异。

一般情况下, 本文方法与 SolidEdge 结果一致。然而欠约束情况下可以有多个解, 不同的策略可以得到不同的解。在 SolidEdge 软件中和在本文开发的原型系统中, 对同一个正六棱台进行相同的面旋转操作, 呈现出如图 22 所示不同的结果。

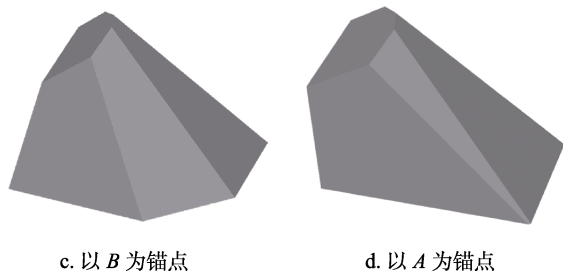
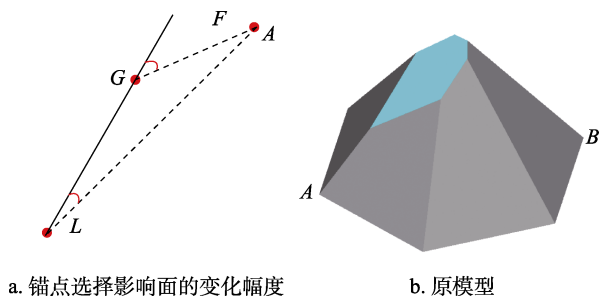


图 20 选择不同的锚点面的变化幅度不同

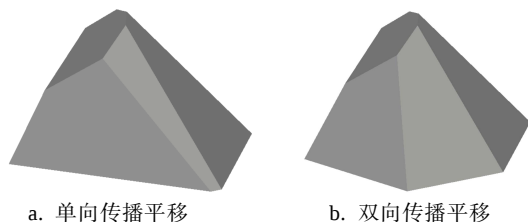


图 21 传播方式影响柱状体形状

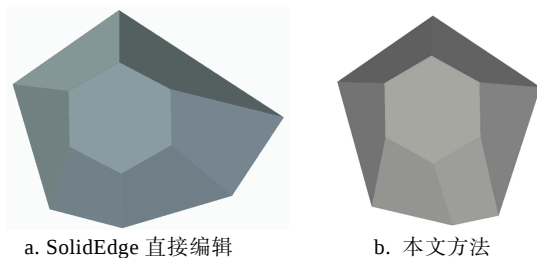


图 22 不同策略对应不同解

4.4 三角形柱面

在第 2 节提到, 某些情况下, 柱面不一定是四边形, 也有可能是三角形, 如图 23 列出的几种情况. 对于三角形柱面, 算法会有细微的差异, 只需确定 3 个点的位置就可以确定当前平面的新位置. 如果是在传播过程中遇到三角形的柱面, 求交确定了 3 个点的位置之后就可以直接确定当前平面, 进入到下一个平面的传播过程. 如果是保持目标平面所有相邻面法向不变的语义对非柱面进行编辑, 且目标平面的相邻面中含有三角形柱面, 则移动之后拓扑必然发生变化. 因此保持目标平面所有相邻面法向不变的语义不能支持含义三角形柱面的柱状体.

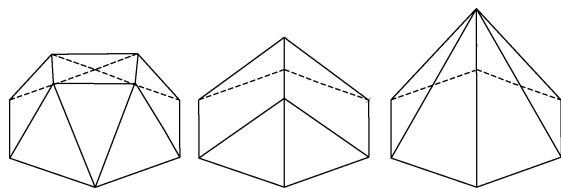


图 23 三角形柱面情况

4.5 局限性

本文的工作在保持柱状体拓扑不变的前提下实现了顶点、边和面的直接编辑, 然而目前的工作仍然有一定局限性. (1) 目前方法只能适用只含平面的柱状体, 对于包含曲面的柱状体, 需要将曲面离散化为平面后才能使用本文方法, 但这会改变柱面的拓扑表示以及几何表示. (2) 在编辑柱状体时, 只能对非柱面及其子元素进行编辑, 并没有提供对柱面以及柱面的交线进行编辑的算法. (3) 本文方法独立于 CAD 内核, 但前期的实验过程基于 OCC, 暂未在其他 CAD 内核上实现, 后续工作基于国产 CAD 内核进行算法验证.

5 总 结

直接编辑技术已经在一些商用 CAD 软件中使用, 然而, 这些 CAD 商用软件中基本只提供了对三维模型的面的推拉直接编辑, 不能够支持单独编辑一条边或者是一个顶点. 本文为编辑三维柱状模型的边和顶点提供了一种维持模型拓扑不变的求解方法. 对于柱状模型面的直接编辑, 提出了一种传播的策略, 通过选择锚点和传播求解的策略, 可以在保持拓扑的基础上保持形状最小变化. 未来工作期望允许发生变化的面上含有特征, 以实现保持特征的顶点、边和面的直接编辑.

参考文献(References):

- [1] Liu Jing, Chen Zhengming, Gao Shuming, et al. Design intent maintenance and topological entities naming in design process[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(8): 1106-1117(in Chinese)
(刘景, 陈正鸣, 高曙明, 等. 设计过程中设计意图维护和拓扑元素命名[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(8): 1106-1117)
- [2] Shah J J, Mäntylä M. Parametric and feature based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995
- [3] Camba J D, Contero M, Company P. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability[J]. Computer-Aided Design, 2016, 74: 18-31

(下转第 2002 页)