

实体模型

布尔操作

产品设计

CAD/CAM

机械设计

24

90-92

高效的实体模型布尔操作*)

An Optimum Method for Boolean Operator of Solid Models

唐敏 董金祥 葛建新

TH122

(浙江大学人工智能研究所 CAD/CG 国家重点实验室 杭州310027)

摘 要 To improve the efficiency of geometric processing in geometric systems, the paper here proposed a new method of geometry index, feature-based hierarchy spatial index(FBHSI), depending on the hierarchy structure of form feature in a feature-based modeling system, and the boundary locality of features in solid models. The method which has been applied in the Boolean operator of solid models has been used in a feature-based modeling system ZD-MCAD 1.

关键词 Feature, Feature hierarchy, Spatial index, Boolean operator

1 引言

三维实体几何造型是实现产品设计、分析以及加工的集成化 CAD/CAM 系统的几何基础。利用实体模型不仅可以方便产品的三维形状设计,同时还可以进行产品的分析工作,如物性计算、有限元分析等。因此,目前国际上主要机械 CAD 开发商所开发的 CAD 系统的大部分以实体模型为基础。实体造型算法计算繁多,一个实体造型系统设计者面临的主要问题之一是引入适当的机制,将实体造型算法的速度提高到一个可以接受的水平。

在三维实体造型系统中,实体的集合操作是一个功能强大的形体操作,以此为基础可以实现用户的大量用户所需的形体操作,如几何特征的创建、实体的剖切、以及机械加工中刀具与工件的碰撞检测等。实体的集合操作也称为布尔操作,类似于数学中集合的并、交、差运算,完成两个实体的并、交、差运算^[1]。在特征造型系统中布尔操作是特征实现的基本算法。

虽然实体的集合操作有很强的形体造型能力,但在实际应用中却面临着效率问题,因为集合操作在运算过程中首先将两个实体进行求交计算,涉及了两个实体面、边、顶点的两两求交,当实体复杂度较高时,求交计算的效率有可能满足不了实际用户的要求。

为提高实体集合运算的效率,国内外研究人员进行了一些有益的工作,主要从两方面改进集合运算的效率:一方面利用交线的相关性,通过跟踪交线,以及分析交线相临的几何拓扑元素,将几何计算控制在某个局部^[2]。这种方法可以大幅度提高集合操作的运算速度,但这种方法实现较为复杂,必须首先找出交线的初始点,而且必须处理许多几何拓扑元素重合或重叠的奇异情况。在[2][7]中讨论了该方法。另一方面利用空间索引技术^[3],这种技术最早是用在曲面线框消隐显示算法中用于提高算法的效率^[4]。在[3]中,Mantyla 采用了网格索引技术,其基本思想是将空间按一定规则划分为不相交的非重叠三维单元,每个单元中存放着与这个单元相交的所有几何元素,在进行几何计算时,例如,射线与实体的求交,若发现射线与单元无交,则可忽略射线与包含在该单元中几何元素的求交工作,因而使算法效率得以提高。

但是单纯的网格索引技术在某些实际情况中运用得不是很好,关键在于这种技术对网格划分是根据网格单元中几何元素的个数来自适应完成的,有可能最终产生的网格并不是最优或接近最优的。为克服这个问题,本文提出基于特征的空间索引技术,其特点是空间索引单元以形状特征来划分,索引单元包括某个特征的所有几何元素,索引单元之间允许相互重叠。

*)本研究得到国家自然科学基金资助。唐敏 博士生,主要从事 CAD、几何造型等领域的研究工作。董金祥 教授,主要从事 CIMS、用户界面、图形学等领域的研究工作。葛建新 博士后,主要从事 CAD、几何造型等领域的研究工作。

2 基于特征的空间索引技术

2.1 层次索引

层次对象描述属于计算机图形学中表示复杂对象的标准技术。层次对象描述的树结构为加速几何查询提供了一些明显的机制。对每个树节点来说,应包含一个封闭的盒子,即表示最小长方形块各结点,该长方体完全包含以那个节点为根的子树所表示的对象。有了这个信息,整个子树的修剪变成可能。例如,当处理一射线查询时,我们可在考查子树前检查射线与封闭盒的相交情况。若该射线不与该封闭盒相交,则可立即忽略那个子树,这种方法可以推广到边界计算中。

2.2 模型表示

在下面的讨论中,几何对象采用半边数据结构表示,见图1。显然,半边数据结构本身已经包含了一个基本的层次几何索引,该数据结构的节点 Solid 和 Face 分别利用包围盒属性项,形成了二级层次。

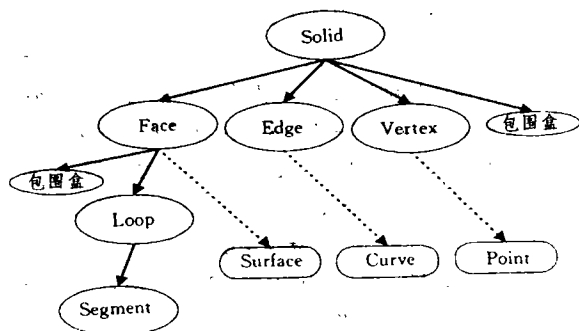


图1 半边数据结构

2.3 ZD-CAD I 中的形状特征建模

形状特征仅涉及零部件的形体形状,而无特定的应用背景。形状特征的应用背景无关性是由于形状特征在众多应用领域中都是适用的,如果赋予形状特征特定应用含义,则其适用范围将受限制,因而形状特征是一个建立在基本几何和拓扑元素之间的低层次的特征。

ZD-CAD I 的形状特征建模主要参照 STEP 有关形状特征的建模^[8],ZD-CAD I 形状特征的主要结构如图2。

形状特征根据形状的复杂度首先分为基本形状特征、组合特征和复合特征三大类,这三类特征的基本内容如下:

(1)基本形状特征:用于表示零部件上局部的简单形状,具体又分为增量形状特征、减量形状特征和

过渡形状特征三类。

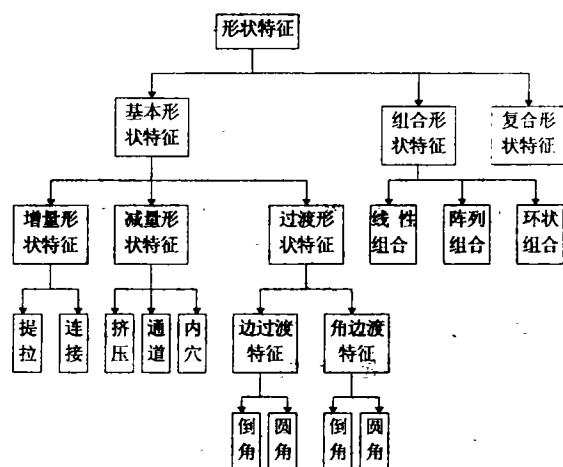


图2 形状特征建模

(2)组合形状特征:指同一特征按某种排列规则多次出现在同一形体上,基本的排列规则包括线性、阵列和环状。

(3)复合特征:由一个或多个基本形状特征构成的复杂特征,例如阶梯孔,相交的槽等。

2.4 特征边界局部性

在这里,特征特指形状特征,特征边界的局部性是指构成一个基本特征的所有几何元素都聚集在空间中一个较小的区间内,复合特征和组合特征又都是由一系列基本特征所组成。在进行几何求交时,若不与某个特征包围盒相交,则该特征所属的几何元素都可排除。

2.5 基于特征的空间索引

利用特征的层次结构和特征边界局部性,我们建立空间索引,如图3所示。

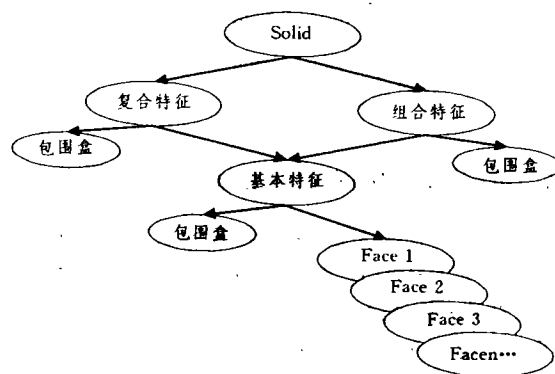


图3 特征层次空间索引

复合特征、组合特征、基本特征都包含了包围盒属性项,复合特征、组合特征都可归结到基本特

征,每个基本特征包含组成该特征的所有 Face 的指针链表。由于实体通过特征造型建立,每个 Face 属于且只属于一个特征。

2.6 包围盒求交技术

通过引入基于特征层次的空间索引,通过包围盒求交进行剪裁,面面求交的效率可以大幅度提高。对于包围盒求交的效率,通过引入静态区间树,采用线性拉伸法(line-sweep paradigm), n 个包围盒之间相互求交的效率可以达到 $O(n \log^2(n) + J)$,其中 J 为实际相交的面对数目。这方面的研究参见文[5]。

2.7 索引的建立和维护

相对于 EXCELL 的建立和维护,特征层次空间索引的建立和维护要简单得多,在 ZD-CAD I 中,特征层次空间索引的建立完全可以通过对应的特征模型来得到,从而减少了每次进行 Boolean 操作后所需的索引重构过程。

3 改进的 Boolean 算子算法

通过引入特征层次空间索引,采用包围盒求交技术,我们设计了新的 Boolean 算子的算法,下面给出面面求交部分的伪代码。首先进行特征查询,特征包围盒求交,去掉特征不相交的情况;然后对于可能相交的特征对,进行面查询,面面包围盒求交,去掉面面不相交的情况;最后进行面面求交,对于相交的面对,分割处理。

```
procedure Face-Face-Intersection(sldA,sldB;Solid)
begin
  Open-feature-query(sldA);
  Open-feature-query(sldB);
  for Each feat-A of sldA do
    for Each feat-B of sldB do
      feature-box-intersection
      Open-face-query(feat-A)
      Open-face-query(feat-B)
      for Each face of feat-A do
        for Each face of feat-B do
          face-box-intersection
          face-face-intersection
      .....
  end
```

4 特征层次空间索引与 EXCELL 的比较

首先,特征层次空间索引与 EXCELL 所建立的层次不同,EXCELL 完全建立在几何层上,而特征层次空间索引通过特征层次概念和求交技术,兼顾了特征层和几何层。其次,运用两种方法实现的 Boolean 操作效率也不同,对于简单的、特征数目小或中等程度的零件进行 Boolean 操作时,EXCELL 方法仍然占优,而对于复杂、特征数目巨大的大型零件,特征层次空间索引方法则体现出优越性。两种方

法的实例比较如下。对于图4和图5的两个零件,当随着造型过程的深入,特征数目不断增加,同时提高模型的分割精度,特征层次空间索引(FBHSI)方法与 EXCELL 方法的效率比较如下表:

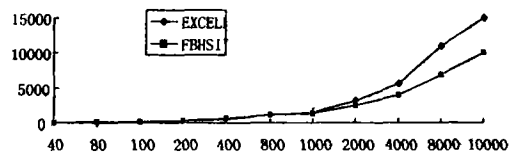


图4 轴类零件

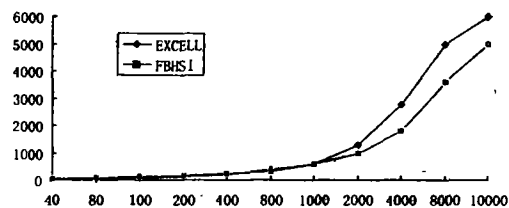


图5 箱体零件

结论 利用特征边界的局部性特点,我们采用了基于特征的空间索引技术,充分利用了特征本身的层次性。在进行包围盒求交时,通过引入静态区间树,采用线性拉伸法, n 个包围盒之间相互求交的效率达到 $O(n \log^2(n) + J)$ 。该算法已经在 ZD-MCAD I 中得到实现,通过对于大型零件的造型实践,证明了对于复杂零件的大量特征造型,效率明显提高。

参考文献

- [1] J. E. Mortenson, Geometric Modeling, John Wiley & Sons, Inc., 1985
- [2] 葛建新、董金祥,基于交线存储的快速实体边界生成算法,CAD & CG 学报,1995,4
- [3] M. Mantyla, M. Tamminen, Localized set operations for solid modeling, Computer Graphics, 17(3) 1983
- [4] J. H. Clark, Hierarchical geometric models for visible surface algorithms, Comm. of the ACM, 10(19) 1976
- [5] K. Mehlhorn, Data structures & Algorithms, Multi-dimensional Search & Computational Geometry
- [6] F. P. Preparata, M. I. Shamog, 计算几何,科学出版社,庄心谷译
- [7] 唐敏,参数化特征造型系统中特征实现算法的研究和实现,硕士论文,6,1996
- [8] Pratt, M. J., Representation and Communication in Geometric Modeling in: Straper, W. and Seidel, H. P. (eds.), Theory and Practice of Geometric Modeling