

语义特征建模系统中布尔算法的研究

金瑛浩^{1,2} 孙立镭²

(通化师范学院学生工作处 通化 134002)¹ (哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150080)²

摘 要 为了提高语义特征建模系统中布尔操作的运行效率,提出了一种基于语义表示法的布尔操作算法。该算法用语义表示法表示特征模型,用细胞元模型组织和管理特征元素,用语义面替代几何面来提高特征的交互检测效率,通过细胞分裂和语义面分解来生成新实体。该算法不仅可以快速准确地生成布尔实体,还可以避免几何面的丢失及“孔洞”等错误的发生。实验证明,该算法具有广泛的使用前景和实用价值。

关键词 CAD,语义表示法,布尔操作,细胞元模型,特征

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Research on Boolean Operation in Semantic Feature Modeling System

JIN Ying-hao^{1,2} SUN Li-juan²

(Students' Affairs Division, Tonghua Normal University, Tonghua 134002, China)¹

(College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)²

Abstract To improve the efficiency of boolean operations in semantic feature modeling system, a semantic representation based method was proposed. It represents feature models with semantic representation, manages feature elements by cellular model, improves detect efficiency of features interaction and builds new the feature entity by splitting intersectant cells and semantic faces. This method can not only build the boolean entity rapidly and exactly, but also avoid errors such as holes and losing geometry faces. Experiments on computer show that this new method is more adaptable and practicable.

Keywords CAD, Semantic representation, Boolean operation, Cellular model, Feature

布尔运算^[1,2]是计算几何、计算机图形学中的基础问题之一,在各种造型领域都有广泛的应用,是最主要的造型手段之一。通过布尔操作不仅可以通过简单的方法创造十分复杂的产品模型,还可以大大提高设计工作的效率,因此所有成熟的CAD系统都提供了布尔操作这一功能。然而,目前常用的布尔算法都是通过取近似值、降维或分类计算的方式进行的,不仅生成模型的精确度和效率较低,而且使用范围有一定的局限性,甚至有些时候产生的模型会出现孔洞的错误^[3-6]!

本文提出了一种基于语义表示法^[7,8]的布尔操作算法。它不仅解决了提高布尔算法精确度和执行效率的问题,还扩展了布尔操作的使用范围;并在自主研发的语义特征建模系统——HUST-CAID上进行了验证,得到了满意的结果。

1 相关概念

1.1 语义表示法

语义表示法是基于细胞元模型语义特征建模系统、为了提高特征保存语义及各种信息能力而提出的一种特征表示及数据管理方法。语义表示法的实质就是将产品模型看作由语义依赖图(SDG)组织起来的各种特征的集合。而特征则是由一个或多个“表面”组成的封闭实体。在特征语义表示法中,

特征是由四元组 $F(P, S, A, R)$ 来表示的。其中, P 是为特征的各个表面提供建模依据的参数的集合,也可看作三维坐标系中若干个点的集合; S 是特征 F 的语义,它决定了 P 中各点的使用方法以及特征实体各个表面的构建方法,是由一系列方法和参数序列组成的,表明了构造特征 F 的 n 个“表面”所使用的方法,以及这些方法所使用的参数序列(一个参数可能被多个方法所使用); A 是特征的属性集合,用来表示特征在产品模型中具有的各种性质(如增属性或减属性等); R 则是特征的约束集合,用以确定特征在建模过程中所能接受的各种方法和操作等。这一点与传统的表示不同,传统的表示法并没有对特征的受动性进行约束,因而要等用户操作结束后,通过对产品模型的所有特征进行约束求解才能确定用户操作的有效性。而特征语义表示法使用约束集合 R 对所有特征的受动性进行约束,可以在设计者对某一个或多个特征进行某个操作前就确定其有效性,从而节约了大量有效性维护的计算时间,大大提高了系统的性能。

1.2 细胞元模型

细胞元语义特征造型系统(如 HUST-CAID)就是以细胞元模型为基础的语义特征造型系统。它分3层结构:底层是数据模型,即设计者全面设计特征实体,并且把所有的特征信

到稿日期:2011-08-21 返修日期:2011-11-24 本文受国家自然科学基金(60173055),黑龙江省教育厅科学技术研究项目基金(12511095)资助。

金瑛浩(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为计算机图形学与CAD、细胞元语义特征造型及人工智能, E-mail: cnxiaobai@163.com; 孙立镭(1944—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学与CAD。

息及相互之间的联系保存在数据模型中;中间层是细胞元几何模型,能够全面、完整地把特征显示出来,但不是面向用户的,只是一种过渡性几何模型;最上层是视图模型,视图是根据用户的需要(如面向生产或面向加工等),从细胞元几何模型映射出来的模型,它面向终端用户,最接近真实效果。这种分层结构不仅可以保留语义特征造型系统的所有优点,还可以通过特征依赖图(FDG)使特征修改不依赖于历程树,因而在造型过程中能更有效地维护特征的语义(特征模型有效性维护)。

细胞元模型将实体描述成相互邻接或离散的细胞元集合。细胞元是一个关于点集合的描述,这个点集包含于模型各个面的所有形状特征中。因此,每个形状特征都是由一组相关细胞元的子集表示的。各子集之间的关系由各自的所属列表来维护。

2 基于语义表示法的布尔操作

2.1 基于细胞元模型的特征元素管理

在传统的特征建模系统中,虽然组成特征实体表面的所有几何面都是通过细胞元模型来组织和管理的,但是在细胞元模型看来,所有几何面都是等价的。也就是说,在细胞元模型监测特征交互以及模型有效性的时候,特征实体的所有几何面都要经过计算才能确定特征交互是否发生以及模型是否有效。由于语义特征建模系统在用户的每一步操作后都要进行特征交互检测和模型有效性验证,因此对于包含几何面数量巨大的高精度模型,系统的效率就会大大降低。而语义表示法将特征表示成为由一个或多个语义面组成的封闭实体,就是将多个具有相同或相似约束条件的几何面看成一个语义面来进行统一的管理。这样,在特征交互监测和模型有效性验证方面就会大大减少对几何面的计算次数,从而提高系统的性能。如图1所示,(a)是传统方法中特征实体通过细胞元模型的所属列表来保存几何面的方法,(b)是使用语义表示法后细胞元模型对几何面的间接管理方法。

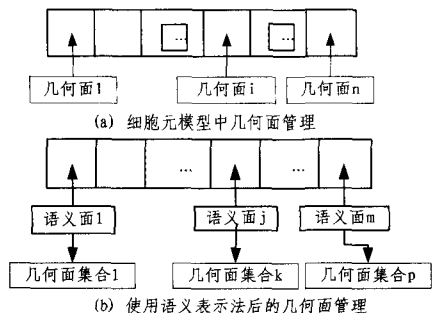


图1 几何面管理方法与语义面管理方法的比较

由于使用语义表示法的细胞元模型可以将多个相同或相似约束的几何面归并为一个语义面,因此建模系统为有效性维护所计算的面就会大大减少。如图2所示,使用语义表示法后,在细胞元模型中,柱体特征实体就可以简化为3个语义面:顶面C1、底面C2和侧面C3;而球体特征实体就可以简化为一个球面S。当系统计算某个语义面满足约束条件时,该语义面所包含的所有几何面也必然满足约束条件,因此该语义面内的所有几何面都不会引起特征模型语义失效。相反,当某个语义面引起特征模型语义失效,那么该语义面内的所有几何面都需要被修改,即便该几何面内不是所有的几何面都不满足约束条件。这是因为语义面内的所有几何面都具有

相同或相似的几何性质,如果不作为整体来修改,就会改变特征本身所具有的语义。假设柱体特征实体顶面C1内包含 n 个几何面,而其中一个几何面与其他特征实体发生相交导致整个模型语义失效。只修改发生相交的几何面虽然可能使整个特征模型语义有效,但是很可能导致被修改的几何面与其他 $n-1$ 个面不在一个平面内,从而改变C1面的子语义。因此,在语义特征建模系统中,语义面内的几何面必须进行整体修改。由此可见,通过语义表示法,不仅可以大大提高特征管理特征元素的效率,还可以更加精确地确定被修改几何面的范围,从而提高建模系统修改特征的能力。

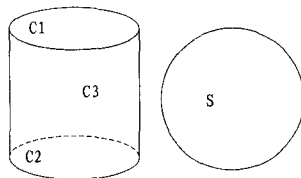


图2 使用语义面简化的特征实体

2.2 基于细胞元模型的特征元素管理

由于只有发生体交互的特征实体才能引起模型语义的失效,因此维护特征实体语义的第一步就是特征交互的检测。传统的细胞元模型中,是通过几何面相交计算来代替特征交互计算的。这是因为细胞元模型不允许特征实体自身的几何面发生相交。但是现代工业设计往往需要非常复杂且精度很高的产品,因此这种模型会包含数量相当庞大的几何面,若仍然通过计算几何面相交来检测特征相交,就会大大降低系统的运行速度。

使用语义表示法的细胞元模型,通过语义面将所有具有相同或相似的约束条件的几何面归并成为一个面,因此这些几何面对特征实体的语义作用是相同的。如图3所示,(a)中的两个球特征实体是由很多几何面拼接而成的表面。当传统系统通过细胞元模型监测这两个实体的相交情况时,就需要对S1中的每个几何面与S2中的所有几何面的相交情况全部计算一遍,才能确定这两个实体的相交情况。假设S1和S2中的几何面数量分别为 f_1 和 f_2 ,那么需要计算几何面相交的次数为 $f_1 * f_2$ 。所以,当这两个球特征实体精确度较低时,由于其所包含的几何面较少,使得系统的计算代价也不高。但是,当系统实体特征数量较多且每个特征的精确度又很高时,模型所包含的几何面数量就会大大增加,计算其相交情况的代价也就会按几何级数增长,成为影响语义特征建模系统性能的瓶颈之一。使用语义表示法的细胞元模型,可以使用语义面的相交情况来代替几何面相交,而语义面的数量大大少于几何面的数量,且语义面数量不会随着特征实体精确度的变化而变化,因此可以大大减少几何面计算的数量,从而提高系统的计算性能。如图1(b)所示,在语义表示法中,球体特征只有一个几何面,也就是说这个两个球体特征的相交监测只需要考虑两个语义面是否相交就可以了。可见,使用语义面来代替几何面,不仅可以大大提高系统对特征元素的管理能力,还可以大大提高系统在特征交互检测以及模型有效性维护方面的性能。

另外,使用语义表示法还可以保持特征交互操作后新模型的精确度。由于细胞元模型只负责特征元素的组织和管理,不负责特征语义的维护,因此传统的细胞元模型为了提高管理效率,在细胞分裂的过程中会舍弃一些较小的几何面。

这样就会造成新特征实体精确度的下降,甚至会导致特征语义的失效。而使用语义表示法后,细胞分裂时会根据新的细胞边界和系统所允许的精确度使用语义面创造方法重新生成边界内的所有几何面,这样就不会出现舍弃微小几何面的情况,当然也就不会降低新特征实体的精确度或导致模型语义的失效。

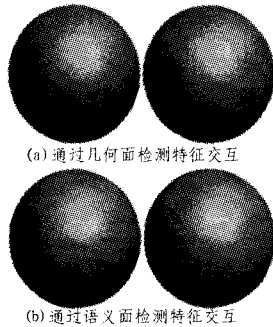


图3 特征交互检测方法对比

2.3 细胞分裂与语义面分解

当参与布尔运算的两个实体发生交互时,细胞元模型就使处于实体交互范围内的细胞发生分裂。如图4(a)所示,两个球体特征的实体 $S1$ 和 $S2$ 在发生交互前,分别由细胞 $C1$ 和 $C2$ 表示和管理。当 $S1$ 和 $S2$ 发生实体交互时, $C1$ 和 $C2$ 都处于发生交互的范围内,因此都发生分裂。其中 $S1$ 和 $S2$ 交互的部分形成一个新的细胞 $C3$,而原来的细胞 $C1$ 和 $C2$ 在分裂后转变成新的细胞 $C1'$ 和 $C2'$ 。这样新形成的3个细胞所代表的3个实体就只处于邻接(即面相交)状态,从而消解了特征的体交互。因此,当细胞元模型进行下一次特征交互检测时,只要对新创建的特征进行监测即可,这大大增加了特征交互检测的效率。

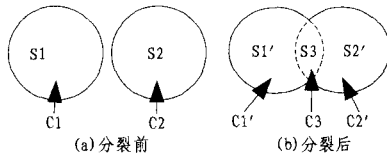


图4 细胞分裂

在传统的细胞元模型中,当 $C1$ 与 $C2$ 发生分裂时,其内部所包含的几何面所属列表也发生分裂。 $C1$ 的几何面所属列表分裂成 L_{1i} 和 L_{1o} 两部分。其中 L_{1i} 指向 $S1$ 中被 $S1'$ 保留的几何面,而 L_{1o} 指向 $S1$ 中不被 $S1'$ 保留的几何面。同样, $C2$ 中的几何面所属列表也自动分裂成 L_{2i} 和 L_{2o} 两部分。其中 L_{1o} 和 L_{2o} 是被共享使用的。然而,在细胞的分裂过程中处于交界处的几何面几乎都是发生相交的,所以为了保证生成实体的精确性,必须对这些交界处的几何面进行剖分并插入到相应的所属列表中。如图5所示, $\triangle ABC$ 是一个交界处的几何面,线段 DE 是处于该几何面上的交线。也就是说,细胞分裂后, $\triangle ADE$ 和四边形 $DECB$ 应属于不同的细胞中。虽然目前已经有了多种剖分算法,但是当顶点和线段 DE 的距离十分小的时候,由于精确度的原因,系统会把 A 、 D 和 E 3个点误认为是一个点。这样,原来的一个三角片就变成了3个点,从而在新的实体中出现了破损或孔洞的现象。

使用语义表示法的细胞元模型,是通过语义面分解来实现细胞分裂的。也就是说在细胞分裂时,细胞元模型不再计算几何面的相交位置以及剖分几何面,而是通过特征实体的语义面重新确定新细胞语义面的范围。从图4中可以很容易

看出,特征交互前后特征的所有语义面的创建方法没有改变,只是语义面的范围发生了改变。比如对于球体特征实体 $S1$,在细胞分裂前后,其语义面的创建方法仍然是球面函数。只是在细胞分裂前 $S1$ 的语义面范围是球面全部,而分裂后 $S1'$ 的语义面范围是 $Sub(S1)$ 与 $Sub'(S2)$ 之和。其中 $Sub(S1)$ 是 L_{1i} 所包含几何面的精确语义范围, $Sub'(S2)$ 则是 L_{2o} 所包含几何面的精确语义范围。在整个细胞分裂过程中,不需要处理任何几何面的所属列表,也不需要对接交界处的几何面进行必要的剖分操作,只要通过相交语义面计算语义面的交线位置,从而确定分裂后细胞语义面的范围,然后修改新生成的细胞的语义面所属列表,即可生成正确的细胞。例如 $C1'$ 的语义面所属列表为 $Sub(S1) + Sub'(S2)$, $C3$ 的语义面所属列表为 $Sub'(S1) + Sub'(S2)$,而 $C2'$ 的语义面所属列表为 $Sub'(S1) + Sub(S2)$ 。

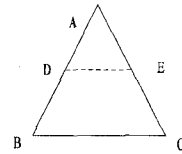


图5 交界处的几何面

2.4 几何面构建与新实体生成

当布尔操作类型(交、并和差3种)与参与布尔操作的特征实体确定后,使用语义表示法的细胞元模型生成新实体的工作就可简化成为一个操作——选择细胞。例如,当球体特征实体 $S1$ 与 $S2$ 做布尔交操作时,生成的实体的语义面就应该由 $Sub'(S1)$ 和 $Sub'(S2)$ 两部分组成,这些语义面正是由细胞 $C3$ 来表示和管理的。因此,只要选择 $C3$ 细胞,删除 $C1'$ 和 $C2'$ 两个细胞,就可以完成布尔交操作了。同理, $S1$ 并 $S2$ 操作,保留 $C1'$ 和 $C2'$ 两个细胞,同时删除 $C3$ 细胞即可; $S1 - S2$ 保留 $S1'$,删除 $C3$ 和 $S2'$; $S2 - S1$ 保留 $S2'$,删除 $C1'$ 和 $C3$ 。

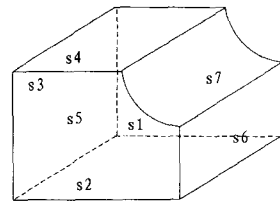


图6 新实体的语义面

细胞分裂过程中,细胞所包含的某些语义面可能与其他细胞的语义面发生交互,而这些语义面所包含的几何面必须经过相应的剖分操作才能重新插入正确的所属列表中。而几何面的剖分既非常耗费计算时间,又很容易导致错误发生,因此通过精确的语义面创建方法及其范围重新构建这些发生交互的几何面,不仅可以提高布尔操作的计算速度,还可以提高新生实体的精确度,减少错误的发生。操作步骤是:首先选取交互语义面对应的几何面所属列表,删除其中的所有几何面。然后根据语义面的创建方法及其范围重新构建几何面,并插入到对应的几何面所属列表。而对于那些没有发生交互的语义面所包含的几何面,则可不做任何操作。因为语义面没有发生交互,所以其包含的几何面也必然没有发生交互。如图6所示,图中的实体由基体和柱体通过布尔差操作生成,共由7个语义面构成。其中 $S5$ 语义面是原来基体的语义面,没有与柱体发生交互,因此不需要重新构建 $S5$ 所包含的几何面。而 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$ 和 $S6$ 虽然也是由基体语义面而来,

但是都与柱体的侧面发生交互,因而都不完整,因此其中的几何面需要重新构建。同理,S7也是一个发生交互的语义面,因此其所包含的几何面也需要重新构建。这样,当细胞的交互语义面所包含的几何面构建完成,新实体也就构建完成了。

3 实验与分析

图7是在HUST-CAID系统中利用语义表示法对球体特征和柱体特征两类封闭实体进行布尔操作的结果。为了方便观察,所有布尔操作都是在中心点对齐后进行的。从结果中可以看到,本算法在计算新生成实体时是与几何面无关的,因此不会因几何面片剖分等原因产生微小的几何面片,使得由精确度等原因导致几何面丢失和实体“孔洞”的错误。

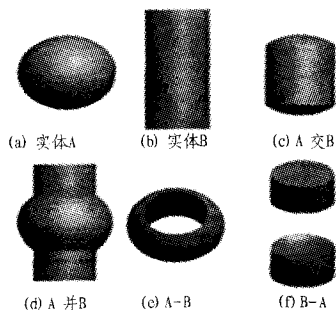


图7 布尔操作生成的实体

图8是封闭实体与非封闭实体以及非封闭实体与非封闭实体之间的布尔操作结果。由于在HUST-CAID系统中,非封闭实体的厚度为0,因此封闭实体与非封闭实体布尔差的结果仍然为原封闭实体。同理,非封闭实体之间的差操作仍为原非封闭实体,而非封闭实体间的交为曲线。因此这类操作结果都无法从渲染图中看到,也没有被列在图8之中。但是从图8中可以看到,由于本文讨论的布尔算法是基于语义面来生成新实体的,与实体本身的封闭性没有关系,因此本算法不仅适用于封闭实体间的布尔操作,对封闭实体与非封闭实体以及非封闭实体与非封闭实体之间的布尔操作同样适用,从而提高了布尔操作的健壮性。

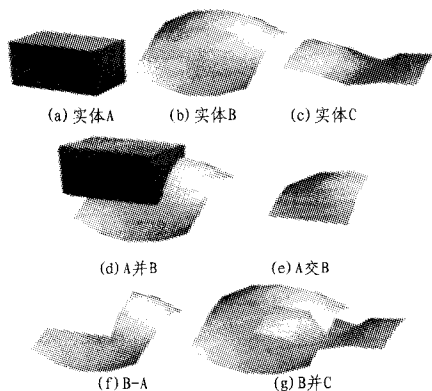


图8 非封闭实体参与的布尔操作

图9是传统方法与本文方法生成布尔实体的比较。虽然实体(a)和实体(b)的父实体都是相同的实体(为了方便观察结果,父实体的精确度设置较低),但是传统布尔算法是通过几何面剖分来进行的,因此生成的实体会出现一些不规则的几何面,且精确度只能由父实体决定。而实体(b)是通过语义面来构建的实体,因此可以重新创建本身的几何面。所以实体(b)的表面可以通过语义重新生成平滑的表面。

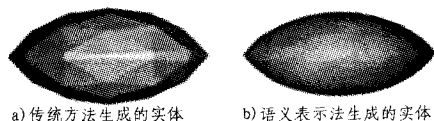


图9 布尔操作实体比较

目前常用的实体布尔运算方法都是通过计算三角面片或多边形面片的相交情况来进行的。比如,崔璨^[9]提出利用面片剖分的思想,用扫描线将一个多边形分解为多个梯形面片,然后将多边形布尔运算转化为梯形面片间的布尔运算。王红娟^[10]提出利用带拓扑信息的交边对实体区域进行分类,避免面片在实体内的判断,然后通过体积判断和面积判断来预处理存在的奇异情况。朱二喜^[11]提出通过图形内角概念来分析和避免布尔运算中出现的奇异情况。虽然这些方法可以有效地处理存在的奇异情况,并提高计算多边形面片布尔运算的效率,但是对于特征实体来说布尔操作的效率仍然依赖于面片数量的多少。同时,对于误差等原因删除“微小”几何面片所引起的“孔洞”错误,仍然无法完全克服。而本文提出的布尔操作算法采用了语义表示法以及语义面重构的方法,不仅可以有效避免奇异情况的出现,还可以减少相交面片的数量,因此更加适合复杂特征实体间的布尔运算。

结束语 从拓扑学的角度看,传统的布尔运算就是通过拓扑运算和几何运算,重新生成一个新的拓扑结构的过程。这种方法没有充分利用语义特征建模系统中特征的语义这一重要信息,并且将特征的表面与其自身的语义分开考虑,因而效果和效率都不能令人满意。而本文提出的布尔算法不仅充分利用了细胞元模型这一特征元素组织和管理工具,还从特征的本质着手将特征实体的布尔操作看作是特征的语义操作,因而可以大大提高布尔操作的计算效率和增强新生成实体的语义。因此从模型语义维护的角度看,本文提出的算法不仅有更强的健壮性,且更加适用于语义特征建模系统。

参考文献

- [1] 袁鸿,刘浩,廖文和. 基于Catmull-Clark细分的曲面布尔运算基础研究[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(5): 1259-1268
- [2] Gong Yong-Xi, Liu Yu, Wu Lun. Boolean operations on conic polygons[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(3): 568-577
- [3] 刘红军,王从军,黄树槐. 带有孔洞的多边形的布尔算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2003, 31(8): 18-20
- [4] Rivero M, Feito F R. Boolean operations on general planar polygons[J]. Computers and Graphics, 2000, 24(6): 881-896
- [5] 张学明,施法中. 非流形几何造型及其布尔运算研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6): 714-717
- [6] Sun Li-juan, Jin Ying-hao, Sun Da-song. Research on cube-based Boolean operation in cellular semantic feature modeling system[J]. Information Technology Journal, 2010, 9(5): 956-961
- [7] Bronsvoort W F, Bidarra R, Nyirenda P J. Developments in feature modeling[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2006, 3(5): 655-664
- [8] Bidarra R, Bronsvoort W F. Semantic feature modeling[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2000, 32(3): 201-225
- [9] 崔璨,王结臣. 一种基于梯形剖分的多边形布尔运算方法[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 104-110
- [10] 王红娟,张杏莉,卢新明. 三维复杂地质体的布尔运算算法研究与实现[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 16-18, 21
- [11] 朱二喜,何援军. 一种利用图形内角的多边形布尔运算新算法[J]. 工程图学学报, 2011(2): 10-19