基于特征语义的模型表示法研究

金瑛浩 孙立镌
(哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150080)

摘 要 为了更好地适应语义特征建模系统的需要,使CAD/CAID系统能够在特征中封装更多更复杂的语义,提高传统特征建模系统的效率,提出了一种基于特征语义的模型表示法。这种表示法通过特征语义来构建特征外形的各个表面,用细胞元模型来管理特征的各种元素,采用"面的完整性验证"代替传统的约束求解来验证用户操作的有效性。因此这种表示法不仅可以有效地表示产品模型的复杂语义,还可以大大提高语义特征建模系统的性能。实验表明,这种表示法有更强的实用性和适应性。

关键词 特征语义,表示法,语义特征建模,细胞元模型,特征依赖图
中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Research of Representation Based on Feature Semantic for Models

JIN Ying-hao SUN Li-juan
(College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract To fit the request of feature semantic modeling system better, encapsulate more complex semantic with features in the CAD/CAID system, and increase the modeling efficiency, a feature-semantic-based representation was proposed. It built all features' faces by the feature semantic, managed all the features' elements on the cellular model, and verified the validity of the feature semantic by testing the wholeness of faces instead of constraint solving used in the modeling system which is based on the traditional representation. This representation can not only represent complex semantic of product models, but also enhance the performance of the semantic feature modeling system greatly. Experiments on computer show that this new algorithm is more adaptable and practicable.

Keywords Feature semantic, Representation, Semantic feature modeling, Cellular model, Feature dependent graph

进入21世纪,CAD/CAID系统在应用技术和实用技术上取得了巨大的进展,然而造型理论方面却没有取得人们期待已久的重大突破。尤其在模型表示方面仍然沿用早期的方法,严重影响了CAD/CAID系统性能的进一步提高[1]。目前常用的表示法有:边界表示法、CSG表示法、FDT表示法以及混合表示法等[2]。边界表示法(Boundary Representation, B-rep, BR, BRep)的基本思想是把实体定义为封闭边界表面所围成的有限空间,然后通过边界的集合来表示物体。这种方法虽然易于通过人机交互的方式对物体模型进行局部修改,但是无法提供保持有关物体生成的原始信息的方法,同时对实体描述所需要的信息量过大,并有较多的冗余信息,因此难以适应复杂、快速的高层语义建模。CSG表示法(Constructive Solid Geometry)又叫构造实体几何法,是利用二叉树来记录构成实体的所有体素及其拼合过程。这种表示法不仅可以唯一地定义一个实体,还可以支持所有的实体几何性质计算。然而CSG树只能定义所表示实体的构造方式,既不反映实体的边界信息,也无法显示地说明三维点集与所表示物体在空间中的对应关系。因此CSG表示的模型又被称为隐式模型或构成模型,无法存储产品的高层语义及相关工程信息。FDT(Feature Dependence Tree)表示法,将实体表示成一棵多叉树,记录对应的CSG树结点的特征及与其相关的约束关系,并允许有多个父特征和子特征[3]。另外还有多种混合模式的表示法,主要是用前述几种方法来联合表达实体的各种信息,例如常见的有CSG法与边界表示法相混合。这些表示法虽然应用比较广泛,但提出的时间都比较早,在设计之初没有考虑如何全面、有效地保持产品从设计、分析到制造各个阶段的信息。因此虽然国内外的学者对这些表示法多有改进,但它们也越来越难以适应现代语义特征建模系统的需要了[4-6]。

本文提出了一种基于特征语义的模型表示法(Feature-Semantic-based Representation, FSR),它不仅可以有效地保持产品模型中各个特征的语义信息,还可与细胞元模型相结合,提高了系统有效性维护的效率,实现了基于语义的高效建模。

1 相关概念

1.1 细胞元模型

细胞元语义特征造型系统[7-9](如HUST-CAID)就是以

到稿日期:2010-02-26 返修日期:2010-04-25 本文受国家自然科学基金(No. 60173055),黑龙江省教育厅科学技术开发项目资助。
金瑛浩(1978-),男,博士生,讲师,主要研究方向为计算机图形学与CAD, E-mail: cnxiaobai@163.com;孙立镌(1944-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学与CAD。

细胞元模型为基础的语义特征造型系统，它分三层结构：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，它能够全面、完整地把特征显示出来，但它不是面向用户的，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所表示的。各子集之间的关系由各自的所属列表来维护。

1.2 特征依赖图

特征依赖图是细胞元模型中组织特征和表示产品的一种最重要的方法。细胞元模型中，若两个特征间没有任何约束，则称它们为相互独立的特征；若两个特征之间存在任何约束关系，则把作为约束的参考基准存在的特征叫做主特征，把另外一个依赖主特征而存在的特征叫做客特征。这种主客依赖关系叫做特征依赖关系（依赖关系通过各种约束来实现）。这样特征实体及其特征依赖关系就组成了一个有向图，即特征依赖图。在特征依赖图中，结点表示模型中的特征和各种约束的实例，有向边表示特征之间的依赖关系。另外在特征依赖图可以找到对应的相关集，某一特征实体的相关集定义为：

G(feature)＝{e|e 是 feature 的所有客特征，包括直接客特征和间接客特征}

根据特征依赖图的相关集进行模型重构时，不必对整个模型进行遍历重构，而只需对相关集遍历重构即可。也就是说，在细胞元模型中对模型的重构只与在更新过程中受到关联的特征有关，而与其它特征无关，因此可以提高重构的效率。产品模型与特征依赖图的对应关系如图 1 所示。a 为产品模型，b 为与产品模型对应的特征依赖图。

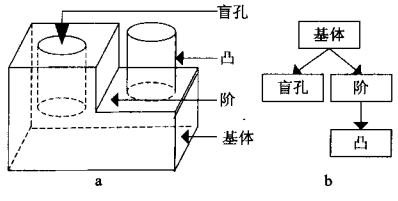

图 1　产品模型与相应的特征依赖图

2　基于特征语义的模型表示法（FSR）

目前常用的模型表示法均将表示的重点放在实体外形的几何结构和拓扑结构上，往往导致模型表示的数据量过大，却对产品语义的支持不够完善。尤其当产品模型比较复杂，特征数量较多时，会严重影响系统对特征语义有效性验证的效率。另外传统表示法对保持各种工程信息的能力也相对较低，不仅难以满足协同设计的各种要求，还对多视图功能的支持严重不足。而 FSR 的目标就是降低存储产品几何信息的复杂度，提高产品工程信息与特征语义的表达能力。

FSR 的实质就是将产品模型看作由特征依赖图（FDG）组织起来的各种特征的集合。而特征是由一个或多个“表面”组成的封闭实体。在 FSR 中，特征也可用一个四元组 $F(P,S,A,R)$ 来表示。其中，P 是为特征的各个表面提供建模依据的参数的集合，也可看作为三维坐标系统中若干个点的集合；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。语义 S 表明了构造特征 F 的 n 个面所使用的方法，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所具有的各种性质（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 FSR 使用约束集合 R 对所有特征的受动性进行约束，就可使设计者在对某一个或多个特征进行某个操作前确定其有效性，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。

通过定义我们可以看到，在 FSR 中，特征的最终几何外形不再由点、线、面等几何元素构成，而是由该特征的点集 P 及其特征语义 S 来共同确定的，因此使得特征表示更加简约、灵活和丰富。如表 1 所列，当点集 P 相同，语义 S 不同时，特征实体的几何外形也随语义变化发生改变。

表 1　不同语义所对应的实体

点集 P	语义 S	实体几何外形	语义对应方法
p1,p2,	线段	——	segment(p1,p2)，以 p1,p2 为端点做线段
p1,p2	圆	○	circle(,p1,p2)，以 p1,p2 确定的线段为直径做圆
p1,p2	球	●	sphere(p1,p2)，以 p1,p2 确定的线段为直径做球

特征的属性集合 A 包含了所有有关特征实体面和体的各种性质。比如体的性质包括正（增加体积）或负（减少体积）等，面的性质包括是否接受变形等。通过改变某些属性可使具有同样外形的特征具备不同的语义。例如当一个圆柱体特征的体积属性标记为正时，其特征语义可能是“凸”，当其体积属性标记为负时，其特征语义可能就是“盲孔”或“通孔”。而凸、盲孔和通孔的特征外形是相同的（如图 2 所示）。约束集合 R 则包括了限定父特征与其他特征之间所要满足的点、线或面间距离或角度等条件。比如“通孔”的两个面都要附着在父特征的两个外表面上等。

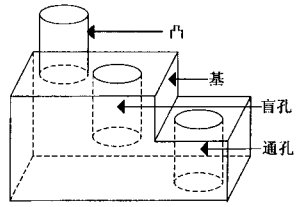

图 2　属性对语义的影响

由于这种表示法只要通过一个点集及特征语义就可以表示特征的外形，因此在存储过程中省略了大量的三角片等几

何元素信息以及这些图形元素间的几何关系和拓扑关系等信息，不仅大大减少了产品模型的存储空间，还使得设计人员可以更好地将精力集中在特征语义及高层信息的处理上，因而更加有利于产品的开发和设计。

另外由于这种表示法是通过一组构造面的方法来表示特征语义的，因此虽然这些方法所使用的参数会影响特征的最终外形，但对特征的语义却没有影响。这些参数与点集 P 存在如下的关系：$P=PA(M1)\cup PA(M2)\cup\cdots\cup PA(Mi)\cup\cdots\cup PA(Mn)$。其中 $PA(Mi)$ 表示方法 Mi 所使用的所有参数的集合；Mi 是构造特征 F 某个面 i 所使用的方法（F 由 n 个面构成）。如图 3 所示，一个圆柱体特征的点集 P 由 4 个元素组成：$p1$，$p2$，$p3$，$p4$，其顶面和底面分别由 CreatePlane 函数来构造，区别就在于所使用的点集不同（顶面的参数使用 $p1$ 和 $p2$，而底面的参数使用 $p3$ 和 $p4$）。而侧面是通过扫掠来实现的，分别用 $p1$ 和 $p2$ 构成的圆作为扫掠轮廓，由 $p1$ 和 $p3$ 构成的线段由扫掠路径扫掠而成。面构造函数 Createscanner 的第一和第三个参数是点集的链表，第二参数表示扫掠轮廓的语义（这个语义使用第一个参数中的所有的有序点），第四个参数表示扫掠路径的语义（这个语义使用第三个参数中的所有的有序点）。当然这个扫掠面也可以看成是由 $p1$ 和 $p3$ 确定的线段围绕 $p1$ 和 $p2$ 构成的圆扫掠而成的曲面，那么 $pl1$ 链表指向的就是 $p1$ 和 $p3$，而 $pl2$ 链表指向的就是 $p1$ 和 $p2$，当然第二和第四参数的语义也要改为 LINE 和 CIR。

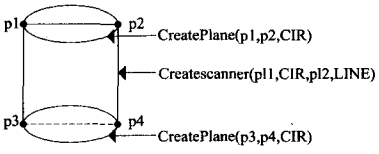

图 3　圆柱体特征的点集与面构造方法

由上面的例子及构造方法的实现特点，可以确定点集 P 中元素必然属于以下几种情况之一：

①直线的端点或折线的拐点；

②曲线或曲面的控制点；

③扫掠面轮廓和轴线的拐点（包括端点）或控制点。

3　FSR 在细胞元模型中的应用

细胞元模型受到研究人员喜爱的一个原因就是其通过一系列体积邻接（quasi-disjoint）的细胞以及相关操作机制，使得对特征元素的管理和操作变得简单而又快捷。由于细胞元模型也是通过点集来表示细胞的体积空间的，因此在细胞元模型中使用 FSR，不仅可以继承细胞元模型的所有优点，还可以弥补细胞元模型对语义支持的不足，避免使用其他表示法所存在的各种问题。

为了在细胞元模型中更好地使用 FSR，我们为细胞元模型添加了两个函数：ReadFSR() 和 SaveFSR()。ReadFSR() 函数的功能是将 FSR 所表示的产品模型数据以细胞的形式添加到细胞元模型中。而 SaveFSR() 函数的功能则是将细胞元模型中产品模型的数据（以细胞形式表示的）以 FSR 的形式保存到文件中。现以 ReadFSR() 函数为例，说明一下 FSR 数据到细胞元模型数据的转换过程：

1）根据 FSR 的格式，找到特征的语义标识（ID）和特征名称（NAME），并根据细胞元模型的命名机制为新的细胞元模型命名。

2）根据该特征的属性集合 A 对新细胞元模型的各种属性进行赋值。

3）从该特征的语义方法集合中，取出第一个面构造方法，然后根据点集 P 中的参数及语义来构造特征的第一个表面。构造完成后，将该表面的指针和相关信息插入到细胞元模型的所有者列表中。然后从语义方法集合 S 中取出下一个面构造方法，按照上述方法构造下一个特征面，直到遍历完全 S 中的所有方法。

4）根据该特征的约束集合 R，将相关的约束条件插入到细胞元模型的约束链表中。

从这一个过程我们可以看到，使用 FSR 不仅可以很好地与细胞元模型相结合，还可以避免使用其他表示法时因兼容性问题引起的近似操作和替换操作。比如合并一些相近的三角片，删除或增加一些辅助性的线和面等等。

4　特征语义的有效性维护

目前用于表示特征语义的表示法是在几何外形表示法的基础上经过改进而来的，因此只能处理特征数量较少的产品模型，或应用在对语义要求不高的产品模型中。而在表示语义复杂的产品模型时，系统往往由于反复调用相关的语义定义（Semantic Definition）及表面处理函数，导致性能的迅速降低甚至出现系统崩溃的现象。这是因为传统表示法一般是先定义特征外形的几何信息和拓扑信息，然后根据这些信息抽象出特征语义的。所以其在单一语义对应多个几何外形时性能尚可，而在某一几何外形对应多个语义时（传统表示法经常出现的一种情况）就会导致算法复杂度迅速提高，甚至出现错误的现象。而 FSR 首先是确定特征的语义，然后根据这些语义来构造特征表面，因此不仅可以充分保证特征的语义，还可以避免一个表面对应多语义的情况出现。另外，对于同样一类特征，在语义处理方面，FSR 比其它表示法简单快捷得多。；

在传统的表示法中，对每个特征语义的维护，是通过额外的约束条件来进行的。如图 4 所示，要确定盲孔 a 的语义在设计者的某个操作后是否仍然有效，需要计算两个高度：盲孔 a 的高度 $h1$ 和基体的高度 $h2$。若 $h1<h2$，则语义满足（用户上一步操作有效），若 $h2\geqslant h2$，则语义不满足（用户上一步操作无效）。这在简单的模型中尚可接受，但是在稍微复杂的情况中，则需要考虑和计算的因素就会复杂得多。比如盲孔 b 的语义，由于盲孔 b 的轴与基的任何一条边都不平行或垂直（可能是经过变形等操作处理后的结果），因此不仅要计算盲孔和基体的高度和倾斜度，还要考虑顶面、底面和侧面与基体其余 4 个面是否有交点，这就大大增加了语义维护的难度。

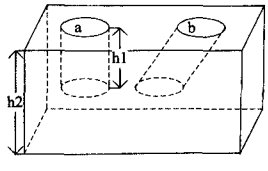

图 4　盲孔语义的有效性验证

而在 FSR 中，特征的表面是根据特征的语义来构造的。因此，这些表面就是特征语义的外在表现，只要这些面都保持完整，则特征的语义就不会发生变化。如图 5 中的盲孔特征 c，由于表征其语义的 3 个表面（顶面、底面和侧面）没有被其他操作或特征破坏，因此其语义也保持完整，即有效的。而盲孔特征 d，由于其他操作或特征使得其侧面的完整受到破坏，且底面丢失，因此其“盲孔”的语义被破坏了，即语义无效。

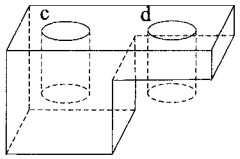

图 5　特征语义的有效性验证

因此采用 FSR 系统的语义维护，只要验证所有特征面的完整性即可。而在细胞元模型中，一个重要的元素管理机制就是在删除、修改或剖分特征面时要对细胞中的所属列表进行相应的修改。也就是说，对某一特征语义的验证只要检索相关特征的所属列表即可。如果所属列表中某一项的数据域指针指向的不是表面元素而是另外一个列表或 NULL，则说明该特征的这个表面在操作中发生了剖分或删除，特征的语义也就被破坏了。因此必须撤销最近一步用户操作，或要求用户修正最近一步操作，直到所有特征语义保持有效为止。反之，如果所属列表中的所有数据域指针指向的都是表面元素，则特征语义是有效的，用户可以直接进行下一步建模操作。所以用 FSR 表示产品模型，不仅有利于特征语义的保持，还可通过“面的完整性验证”代替原有的有效性验证方式，大大提高用户建模操作的效率。

5　实验与分析

图 6 是在自主研发的特征建模系统 HUST-CAID 系统上，用 FSR 对凸、盲孔、通孔、槽等几个简单语义特征的模拟。我们可以看到，使用 FSR 不仅可以高效、完整地表示特征的语义，还可以很好地定义特征外形的几何信息和拓扑信息。另外 FSR 定义的特征，由于其外形表面只依赖于特征自身的语义，而与所使用的表面无关，因此可以动态调整计算精度，以自动适应不同环境下不同精度的要求。另外，不需要曲面细分等处理就可以实现产品模型显示精度的动态调整（如图 7 所示），甚至可以实现高精度计算、低分辨率显示等要求，因此更加适用于高精度要求的大型工业设计领域中。

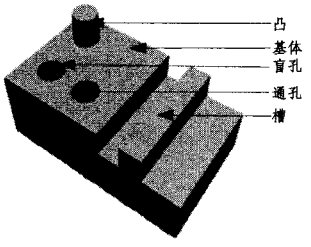

图 6　用 FSR 表示的几种语义特征

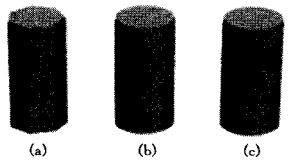

图 7　不同精确度下的语义特征

通过表 2 可以看到，使用 FSR 表示的产品模型中，三角片要大大少于用传统表示法表示的产品模型。因而使用 FSR 可以提高系统处理速度和性能。另外，由于细胞元模型使用了最值空间及特征交互充分性原理等技术，使得 FSR 表示的特征语义在特征交互检测及特征有效性维护等方面性能更加突出。

表 2　FSR 与 B-rep 表示的模型比较

特征	B-rep 模型中的三角片数	FSR 模型中的三角片数	节省存储空间
锥	50	45	10.0%
凸	55	49	10.9%
槽	55	28	49.1%
球	100	85	17.6%
阶梯	80	42	47.5%
圆管	200	179	10.5%
螺旋体	350	309	11.7%

结束语　基于特征语义的表示法由于是以建模过程中产品的高层语义和工程信息为主要表示对象，因此更加适合现代计算机工业辅助设计的需要。基于特征语义的表示法不仅能够很好地支持多视图功能和协同设计功能，还可以大大减少有效性验证的复杂度。所以这种表示法有更加广泛的应用前景。笔者下一步将深入研究 FSR 中对自由特征和自定义特征的支持。

参 考 文 献

[1] 李浙昆，胡志勇，李勇平，等. CIMS&CAID 的发展及 CAID 的信息构成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2000，12(11)：835-838

[2] 吴湘，赵万生，魏莉. 三维几何表示法[J]. 航天制造技术，2002(04)：40-43

[3] Bidarrat R，de Kraker K J，Bronsvoort W F. Representation and management of feature information in a cellular model[J]. Computer-Aided Design，1998，30(4)：301-313

[4] Bronsvoort W F，Bidarra R，Nyirenda P J. Developments in feature modeling[J]. Computer-Aided Design and Applications，2006，3(5)：655-664

[5] Bidarra R，Bronsvoort W F. Semantic feature modeling[J]. Computer-Aided Design，2000，32(3)：201-225

[6] Gu Peihua. A Feature Representation Scheme for Supporting Integrated Manufacturing[J]. Computers in Industry，1994，26(1)：55-71

[7] Raghothama S，Shapiro V. Boundary representation deformation in parametric solid modeling[J]. ACM Transactions on Graphics，1998，17(4)：259-286

[8] Bidarra R，Bronsvoort W F，Neels W J. Efficiency of boundary evaluation for a cellular model[J]. Computer-Aided Design，2005，37(12)：1266-1284

[9] 孙立镌，高雪瑶. 协同语义特征造型系统的研究[J]. 计算机工程与应用，2007，43(15)：50-192