

跟踪对象族模型拓扑结构变化研究

孙立镛¹ 刘宪国¹ 于春风² 高尚民¹

(哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150080)¹ (海军航空工程学院青岛分院 青岛 266033)²

摘要 提出了跟踪对象族模型拓扑变化的新算法,以建立参数和拓扑结构之间的关系,计算参数的临界值,确定模型的依赖实体,计算出模型参数的稳定区间和参数区间,最终系统准确地跟踪对象族模型拓扑结构的变化。该算法运用于自主研发的 HUST-CAID 系统中,提高了系统的智能性,为设计者确定参数范围提供了依据。

关键词 对象族,参数模型,拓扑约束

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Research on Tracking Topological Changes in Family of Objects Model

SUN Li-juan¹ LIU Xian-guo¹ YU Chun-feng² GAO Shang-min¹

(Department of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)¹

(Naval Aeronautical Academy Qingdao Branch, Qingdao 266033, China)²

Abstract A novel algorithm of tracking topological changes of family of object models was imposed, relations between parameters and topology of models were established, critical values of parameters were computed, dependent entities of models were determined, stable intervals and parametric ranges were computed, and at last topological changes of family of object models were tracked accurately in this system. The algorithm was used in our HUST-CAID system, and intelligent of system was improved, parametric ranges was determined for designers.

Keywords Family of object, Parametric model, Topological constraint

1 引言

现有的 CAD 模型都是双重表示模型,即参数化表示和几何表示,参数化表示描述参数和模型几何的相互关系,几何表示是通过特征描述几何形体和拓扑形体。对 CAD 系统用户来说参数值和模型的拓扑之间的关系还不清楚,通过声明约束和用户直接指定参数值来建立模型的几何表示,几何表示又决定模型的拓扑表示;反过来,模型的拓扑表示不仅取决于几何表示,还与特征的建立顺序有关,且这种影响是不可预知的,所以建立参数值和拓扑之间的关系对设计者来说非常有必要。

对于双重表示模型来说,参数空间和表示空间是有区别的^[1],一个表示空间族通常与一个参数化空间族的子集相对应,即子集中所有的参数值与拓扑结构模型相似。一个模型参数化空间族与多个表示空间族相对应,即不同的拓扑结构表示同样的几何结构。研究人员已经对不同几何表示的不同空间族进行了定义^[2-4]。但是在这些研究中,没有考虑拓扑结构和参数的关系。所有现代 CAD 系统都是通过几何约束把参数关联到特征造型中。在文献^[5]中,叙述了对于一个单一的变量参数,如何结合一个几何约束系统的方法来找到参数值的范围。这个参数的范围能够帮助用户结合特征造

型探索出参数化空间族。但是这个方法没有考虑模型的拓扑结构。

跟踪拓扑结构变化的基本方法如下:用几何表示创建一个几何约束系统来关联参数化模型和拓扑实体。将这个约束系统分解为刚性子系统,确定哪些实体依赖变量参数(Variant Parameter, VP)。对每个依赖实体,通过添加几何约束构造退化实例(Degenerate Case, DC)。这个退化实例能够用几何约束求解器求解,这个变量参数相对应的值也可被计算(即计算临界值)。对于这个模型的不同拓扑变量重复这个过程,直到所有的临界变量被发现。

2 陈述式对象族模型及其相关定义

陈述式对象族模型(Declarative Family of Objects Model, DFOM)是语义特征模型(Semantic Feature Model, SFM)的扩展。在 DFOM 中,模型的几何和拓扑不必全部指定,一般情况下,一个 DFOM 表示一个对象族(Family of Object, FO)。通过求解拓扑约束来确定族成员(Member of Family, MF)。

对象族模型由几何变量和拓扑变量组成^[6],其中几何变量被称为载体,拓扑变量称为结构体。载体定义了分隔空间的面,比如平面载体定义了一个平面和平面的两个侧面。结

到稿日期:2010-01-24 返修日期:2010-03-21 本文受国家自然科学基金项目“基于细胞元表示的语义特征造型研究与应用”(编号:60173055)资助。

孙立镛(1944—),男,硕士,教授,主要研究方向为计算机图形学与 CAD;刘宪国(1981—),男,博士生,主要研究方向为计算机图形学与 CAD, E-mail: qdlxg5639@163.com(通信作者);于春风 硕士,讲师;高尚民 硕士,讲师。

构体主要表示点集,比如体、曲面、曲线和单个的点,由载体定义子空间相交的方式构造。载体和结构体通过子空间约束建立联系。载体上的几何约束详细说明了对象族的几何属性,结构体上的拓扑约束详细说明了对象族的拓扑属性。这种表示方式可以使设计者以陈述式方式详细说明所有的对象族。

定义 1(有效模型) 与给定的原型模型具有相同拓扑约束的模型。

定义 2(参数空间) 使有效模型满足拓扑约束和几何约束的所有的参数集合。

定义 3(参数的临界值) 变参的临界值定义为,对任意的参数值 c , 存在任意小的值 ξ , 其中 $|\xi| > 0$, 对 c 和 $c + \xi$ 来说, 模型的实现具有不同的拓扑结构, 那么参数值 c 就是临界值。

3 跟踪拓扑结构改变算法

3.1 建立参数和拓扑之间的关系

这里考虑的特征造型是基于语义的特征造型, 参数化表示是一个规范化形状模型。几何结构以载体和半空间定义^[7]。满足等式 $f(p) = 0$ 的 p 点集合定义为一个载体。结合一个载体是两个半空间, $f(p) < 0$ 和 $f(p) > 0$, 这里的载体限制在平面、圆柱和球体表面。特征被几何形体参数化, 通过半空间布尔运算组合。相应的载体在一个几何约束系统中是可变的, 它确定了大小及相关的位置和原点。

参数表示和几何表示之间的关系在文献[8]中已经做了深入的研究, 主要是发现模型族参数空间和表示空间之间的映射关系, 但是没有给出准确的拓扑表示改变和参数值之间的映射关系。

在文献[5]中研究了二维矩形的参数区间问题, 只考虑了垂直和水平线段及其距离约束方面, 为单个距离参数确定多边形拓扑没有改变的参数区间。作者考虑的约束系统非常简单, 没有考虑通用的问题, 一次只考虑一个参数, 对于 n 个参数的多个参数区间不适用。

为了建立参数和拓扑之间的关系, 必须考虑特征几何之间的关系, 因为特征几何确定模型的拓扑, 再加上参数值确定模型的特征几何。如果模型的特征几何是基于历程的, 很难利用特征几何建立拓扑改变和参数值之间的关系^[9]。本文提出的方法需要陈述式特征几何, 利用几何变量和约束表示的模型, 也就是陈述式对象族模型。

模型的拓扑通过边界表示或者单元模型表示, 模型包含拓扑实体, 如顶点、边、面和体单元, 以及拓扑实体之间的关系, 如某个面在体单元的边界上等, 对特征形体进行布尔运算构造这些表示形式。通常实现这些运算相当复杂, 但是通过特征几何的交运算就可以确定拓扑实体。每个实体是特征几何交运算的子集, 需要说明的是, 每个实体不一定是特征几何交运算描述的唯一实体, 其它实体也可以使用已经存在的相同的描述。这样可以声明, 如果交集消失了, 一定在模型中删除实体。

为了跟踪拓扑改变, 需要以特征几何的交集表示拓扑实体。大部分 CAD 系统没有创建这样的拓扑表示, 在自主研发的 HUST-CAID 系统中, 利用边界表示和单元模型为几何表示创建了拓扑。

参数和载体之间的几何约束构造了参数模型 (Parametric Model, PM), 通过单元模型 (Cellular Model, CM) 实现这些 PM, 在 CM 中的每个实体都可以利用子空间约束建立 PM 中载体之间的关系, 对应于图 1 所示的陈述式对象族模型, 这些参数、载体和拓扑实体之间的关系约束图表示, 如图 2 所示。通过约束图表示参数模型, 如图 2(a) 所示。参数模型定义了 4 个线性载体 l_1, \dots, l_4 , 一个圆形载体 c_1 , 载体之间的关系通过对参数 h, w, x, y 和 d 以及施加于它们上的几何约束表示。对应于 PM 的实现, 单元模型的表示如图 2(b) 所示。约束图中包含单元模型实体和载体的子空间约束, 类似于构造陈述式对象族模型, 通过载体子空间交集确定实体的几何, 例如边 e_1 是通过圆形载体 c_1 和由 l_3 和 l_4 产生的半空间的交集确定的, 顶点 v_1 和 v_2 分别通过载体 c_1 和 l_3, l_4 的交集确定。面 f_1 由载体 c_1, l_1, l_2, l_3 和 l_4 产生的半空间的交集确定。

在 DFOM 中, 表示的是参数、载体和结构之间的关系, 而不是参数、载体和单元模型的关系, 后三者的关系在单元模型产生之后, 在完备约束的 DFOM 中确定。

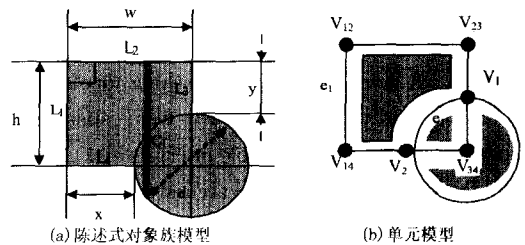


图 1 特征、拓扑和载体关系图

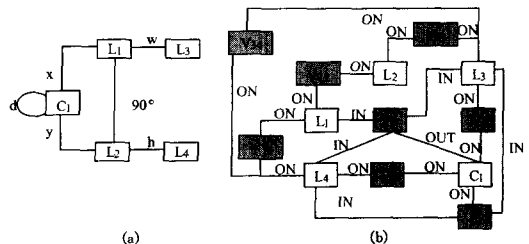


图 2 陈述式对象族模型约束图

3.2 计算临界值和参数区间

尽管模型的拓扑是通过单元模型表示, 但是不能将这些单元模型同拓扑改变作比较, 因为在一个单元模型中的实体不能简单地映射到其它模型中的实体。为不同的参数值构造单元模型并处理这些模型, 也不能确定导致拓扑变化的参数值。我们的确定拓扑改变的方法是首先分析载体和实体间的子空间约束系统, 规划出实体的退化实例, 然后利用几何约束求解器求解这些退化实例。

对每个实体来说, 可以根据几何约束规划一个或多个退化实例。向模型中添加几何约束, 求解这些模型, 以此来确定对应的参数值。如果系统是完备约束的, 有有限个解, 那么在一个参数值上会发生退化事件, 则这个参数值就是临界值。

计算临界值的基本方法如下: 首先删除对应于变参的约束, 即在几何约束系统中删除此约束, 然后就可以确定依赖于这些变参的实体, 这些就是发生退化实例的范围。针对每个实体的每个退化实例, 向系统中增加特定的约束强制发生退化事件。通过求解这个约束系统, 就可以为发生退化事件的变参确定确切的参数值, 这样模型的拓扑一定会改变, 就确定

了该变参的临界值。为每个依赖变参的实体重复这个过程，可以确定所有的临界值。

为了跟踪所有的拓扑变化，很有必要利用单元模型实体将欧几里得空间分成各个单元，因为这些单元覆盖了整个空间，任何拓扑变化都一定发生在单元的边界上，这样不会产生新的拓扑实体，除非一些单元分裂、组合或者删除了。

显然，只有依赖变量参数的实体(即当一个变量参数值改变时几何特征变化的实体)才被分解。为了确定一个实体是否依赖变量参数，我们将一个几何约束系统分解为刚性子系统，叫做群。这个分解决定了哪个顺序的子问题能够解决，这对于几何约束求解器是非常重要的方面，参看文献[10]。

如果我们移除模型中约束对应的变量参数，那么由规范化形体模型定义的约束系统变成了无约束的系统。在分解中，有关系的自由度的载体将在不同的群中。通过依赖变量参数不同群中的载体来确定实体。

图3显示了对图2(a)所示载体的约束系统的分解，参数 x 是变量参数，并结合了图2(b)中的特征点。 c_1 是一个群(Cluster)， l_1, l_2, l_3, l_4 形成一个群。实体 $v_{12}, v_{23}, v_{34}, v_{14}$ 只依赖一个群。实体 v_1, v_2, e_1, f_1 依赖两个群，这些实体依赖变量参数。

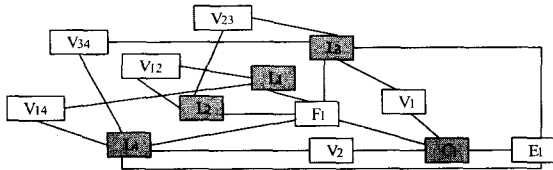


图3 变参 x 的群

对于变量参数值，当前的参数值产生单元模型和约束系统。接下来，确定哪个实体依赖变量参数，并求解这些实体的所有分解用例。之后确定当前单元模型中哪些拓扑结构的间距没有改变，这些间距称为稳定区间。而它们介于最大的临界值小于当前参数值和最小临界值大于当前参数值之间，如图4所示。

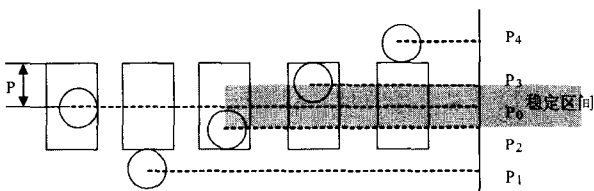


图4 变参 p 的稳定区间

当单元模型产生不同的参数值时，可能包含不同的实体，因此可能找到不同的临界值。为了获取所有的临界值，单元模型必须重新生成变量参数值，使得所有实体的分解用例都能够被求解。跟踪算法在先前确定的稳定区间范围外任意选取了一些新的当前参数值，这些参数值生成了一个新的单元模型，临界值由前面的部分确定。重复这个过程直到稳定区间完全覆盖变量参数的范围。通过这样的定义，在先前确定的稳定区间中就不能找到新的临界值。因此，当整个参数域被稳定间距覆盖时，所有的临界值也找到了。

3.3 本文用到的算法

算法1 为给定的参数确定依赖实体

Function DetermineDependentEntities(p, G)
 p : parameter

G : constraint graph

begin

E : = empty set of entities

R : = empty set of clusters

Remove p from G

R = RootClusters(G)

for each entity e in G

 If e constrained to carriers in more than one cluster in R then
 add e to E

 return E

end

算法2 为给定的参数值确定稳定区间

Function ComputerStableInterval(PM, p, x)

PM : parametric model

p : variant parameter

x : current value of p

begin

V : = empty set of parameter values

CM : = regenerate CM from PM

G : = ConstraintGraph(PM) + ConstraintGraph(CM)

E : = DetermineDependentEntities(p, G)

V : = $[-\infty, +\infty]$

for each entity e in E

C : = DegenerateCases(e)

 for each case c in C

 add constraints of c to G

 solve G

 for each solution s of G

v : = computer value of p from s

 add v to V

 remove constraints in c from G

c_1 = $\max(v \text{ in } V | v < x)$

c_2 = $\min(v \text{ in } V | v > x)$

 return $[c_1, c_2]$

end

算法3 确定给定参数的临界值

Function FindCriticalValues(PM, p)

PM : parametric model

p : parameter

begin

v : = current value of p

I : = empty set of intervals

C : = empty set of critical values

do

$[c_1, c_2]$: = ComputerStableInterval(PM, p, v)

 Add c_1 to C ;

 Add c_2 to C

 Add $[c_1, c_2]$ to I

V : = arbitrary value not in I , or None

until v = None

return C

end

算法4 确定给定参数的参数区间

Function FindParameterRange(PM, p)

PM : parametric model

p : parameter

begin

R : = empty set of intervals

G : = GeometricParameterRange(PM, p)

C : = FindCriticalValues(PM, p)

```

for each subsequent pair  $c_1, c_2$  in  $G+C$ 
  if TopologicalConstraintsSatisfied(PM, p,  $c_1$ ) then
    Add [ $c_1$ ] to R
  if TopologicalConstraintsSatisfied(PM, p,  $c_2$ ) then
    Add [ $c_1$ ] to R
  if TopologicalConstraintsSatisfied(PM, p,  $(c_1 + c_2)/2$ ) then
    Add [ $c_1, c_2$ ] to R
return R
end

```

结束语 本文针对 CAD 产品设计时设计者对模型拓扑结构改变的不可预知性问题,提出了一种跟踪模型拓扑变化的算法。该算法分两个步骤,首先构造参数和拓扑结构之间的约束系统,然后运用跟踪算法。在自主开发的 HUST-CAID 系统中引入该算法,为模型设计者带来了方便,提高了系统的智能性。

本文考虑的载体仅限于平面、圆柱面和球面,对更通用的代数几何和参数几何比如 NURBS 曲面还不适合,这也是后期的研究内容。

参考文献

[1] Shapiro V, Vossler D L. What is a Parametric Family of Solids [M]. Salt Lake City: ACM Press, 1995: 43-54
 [2] Raghorthama S, Shapiro V. Boundary Representation Deforma-

tion in Parametric Solid Modeling [J]. ACM Transactions on Graphics, 1998, 17(4): 259-286

[3] Raghorthama S, Shapiro V. Topological framework for part families [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2002, 2(4): 246-255
 [4] Raghorthama S. Constructive Topological Representations [M]. Cardiff: ACM Press, 2006: 39-51
 [5] van der Meiden, Bronsvort H A W F. A Constructive Approach to Calculate Parameter Ranges for Systems of Geometric Constraints [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(4): 275-283
 [6] 龚雄. 陈述式几何约束系统的原理与方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
 [7] Raghorthama S, Shapiro V. Consistent Updates in Dual Representation Systems [J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(8): 463-477
 [8] Hoffmann C M, Kim K-J. Towards Valid Parametric CAD Models [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(1): 81-90
 [9] Hilderick A, van der Meiden, Bronsvort W F. Solving Topological Constraints for Declarative Families of Objects [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(8): 652-662
 [10] Hilderick A, van der Meiden, Bronsvort W F. A Non-rigid Cluster Rewriting Approach to Solve Systems of 3D Geometric Constraints [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(1): 36-49

(上接第 240 页)

为完整的弹簧模型骨架。



(a) 原始模型 M_{spring} (b) 骨架模型 M_{spring}

图 9

结束语 本文基于层次渐进的思想,在提取出具有显著特征面片的指导下,对三维模型完成两次有意义的分割,然后通过反复使用带状层次区域增长法进行骨架提取,从而得到有意义的模型骨架。本文的优势在于:利用多维度标度法 MDS 提取出的特征面片,对有明显分支特征的模型提取的骨架效果最佳;充分利用面片分布均匀的三角网格模型,定义了新的带状层次区域增长算法,提高了骨架提取的效率;相比于传统的区域增长算法,层次渐进的带状区域增长法更加简单,速度较快。依据本文算法提取的骨架效果较为理想,而且模型上每个面片都在提取的骨架中有对应映,这对以后做变形等模型处理有较大的帮助。本文利用层次渐进的方法提取骨架,能较精确地体现模型的结构;对弯曲程度较大、弯曲频率较多的模型,通过本文的算法提取出的骨架较为理想,如图 6(d)、图 8(e)、图 9(b)所示。

在后分割过程中,本文提出了一个新的、基于渐次推进的层次区域增长方法。

本文的不足之处如下:对于本文的算法,要求待分割模型是单连通的,以保证有效的带状推进。对与面片分布不均匀的模型,提取出的骨架不平滑,有明显的褶皱。如何能在面片分布不均匀的模型上提取出光滑平整的骨架,是后续研究工作的研究方向。

参考文献

[1] Blum H A. Transformation for extraction new descriptors of

shape [C] // Models for the Perception of Speech and Visual Form. Cambridge, MA: [s. n.], 1967: 362-380

[2] Yi D R, Hayward V. Skeletonization of volumetric angiograms for display [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2002, 5(5): 329-341
 [3] Cornea N D, Silver D, Min P. Curve-skeleton applications [C] // IEEE Visualization Conference. [S. l.]: IEEE, 2005: 95-102
 [4] Ma C M, Wan S Y. Parallel thinning algorithms on 3D(18, 6) binary images [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 80(3): 364-378
 [5] Xie W, Thompson R P, Perucchio R. A topology-preserving parallel 3D thinning algorithm for extracting the curve skeleton [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(7): 1529-1544
 [6] Che Wu-jun, Yang Xun-nian, Wang Guo-zhao. A dynamic approach to skeletonization [J]. Journal of Software, 2003, 14(4): 818-823
 [7] Choi W P, Lam K M, Siu W C. Extraction of the Euclidean Skeleton based on a connectivity criterion [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(3): 721-729
 [8] Amenta N, Choi S, Kolluri R K. The power crust [J]. Computational Geometry, 2001, 19(2/3): 127-153
 [9] Katz S, Leifman G, Tal A. Mesh segmentation using feature point and core extraction [J]. The Visual Computer, 2005, 21(8-10): 649-658
 [10] Kruskal J. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a non-metric hypothesis [J]. Psychometrika, 1964: 1-27
 [11] Shepard R. The analysis of proximities: multi-dimensional scaling with an unknown distance function [J]. Psychometrika, 1962: 219-246
 [12] Sethian J, Kimmel R. Computing geodesic paths on manifolds. Proc. of Natl. Acad. Sci. 1998, 95(15): 8431-8435
 [13] Chen Lijun, Nicolas, Georganas. An efficient and robust algorithm for 3D mesh segmentation [J]. Springer Science + Business Media, LLC, 2006: 109-125