

子分曲面尖锐特征生成*

李桂清¹ 卢冰² 李现民¹ 李华¹

¹(中国科学院计算技术研究所 CAD 开放研究实验室 北京 100080)

²(广西大学 南宁 530004)

E-mail: gqli@ict.ac.cn

摘要 虽然生成光滑曲面是自由曲面造型的一个主要追求目标,但在某些场合却又要求能够产生非光滑的特殊效果,即所谓的尖锐特征(sharp feature).该文研究子分曲面造型中特殊效果的生成,提出一种基于网格拓扑构造的方法,把折痕、角、尖刺和锥等尖锐特征的生成统一到边界处理方法中,从而避免了为各种效果建立特殊子分规则,并在不改变已有子分模式的情况下实现特殊尖锐特征造型.

关键词 子分曲面,尖锐特征,曲面造型,CAD/CG,图形学.

中图法分类号 TP391

随着 CAD/CG 造型物体越来越复杂,参数曲面难以处理任意拓扑网格的局限性日渐显露出来.采用参数曲面表示复杂物体表面时,先逐片构造,再把曲面片缝合,需要考虑光滑拼接问题,是相当繁琐而困难的工作.对于张量积参数曲面,还要对曲面进行裁剪(trimming),不但耗时费力,而且容易引起数值误差.另一方面,由于各种 3D 数据获取技术不断完善,逆向工程在 CAD/CG 应用中越来越受重视.这些 3D 数据表面上往往以任意拓扑网格形式出现,但如何表示它们以便于进一步的处理,如存储、修改、传输以至加工,成为急需解决的问题.鉴于参数曲面存在这样的局限性,人们一直在寻找其他方法.其中,子分方法因其简洁的思想、强大的表现力而展现出蓬勃生机.子分方法又叫子分模式,由此生成的曲面称为子分曲面,可看成是参数曲面在任意拓扑网格下的扩展.子分曲面有很多很好的性质,其中层次性和递归生成特性使它与多分辨率分析紧密相连.因此在计算机辅助设计和图形学领域中越来越受到关注.

子分曲面是一种极限曲面.对给定的初始网格,通过指定新顶点生成规则和它们之间的连接关系来获得一张更密的网格,重复这一过程,网格最后收敛到一张曲面.最早的子分曲面是 Catmull 和 Clark 于 70 年代末提出的 Catmull-Clark 子分曲面^[1].Doo 和 Sabin^[2]采用离散 Fourier 变换的方法,对 Catmull-Clark 模式的收敛性和光滑性进行分析并对其规则作了改进,较著名的还有 Loop 模式^[3]、蝶形(butterfly)模式^[4]、Doo-Sabin 模式^[5]和 Kobbelt 基于变分的模式^[6]等.

虽然在收敛性、光滑性分析等理论研究方面已经取得大量成果,但要使子分方法得到广泛应用,还必须对实际应用中出现的一些具体问题提出解决办法,其中,特殊效果的生成就是重要内容之一.这里的特殊效果是指在一张光滑曲面上产生折痕、角点等诸如此类的非光滑特征.一般情况下,子分曲面都是光滑的,例如在上面提到的模式中,除蝶形模式外,都生成光滑曲面.虽然 Nira Dyn 等人的蝶形模式生成的曲面在奇异点处只达到 C^0 连续,Zorin 等人修改了奇异点处的子分规则后才达到一阶光滑^[7],但那并不是特殊效果造型所需要的,因为这样产生的非光滑特征并不可控.

已有的特殊效果生成方法,或是局部修改均匀子分模式的子分规则,或是重新构造非均匀模式,两者都破坏

* 本文研究得到国家 973 高科技项目基金(No. G1998030600)资助.作者李桂清,1966 年生,博士生,主要研究领域为计算机图形学.卢冰,1973 年生,助工,主要研究领域为 CAD,数据库.李现民,1973 年生,博士生,主要研究领域为医学可视化,医学图像处理.李华,1967 年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为 CAD/CG,计算机视觉,图像处理.

本文通讯联系人:李桂清,北京 100080,中国科学院计算技术研究所 CAD 开放研究实验室

本文 2000-02-28 收到原稿,2000-04-04 收到修改稿

了均匀子分模式的简洁性. 另外, 由于局部修改方法需对不同的特殊效果采取不同的子分规则处理, 没有统一的框架, 既不利于推广到其他模式, 也给实现带来困难. 本文借鉴参数曲线利用重节点降低连续次数的技术, 通过对边界子分规则进行分析, 采取恰当地构造网格拓扑的方法, 把各种尖锐效果的生成统一到边界情况进行处理, 从而不需要对子分规则作任何修改, 克服了已有方法存在的不足.

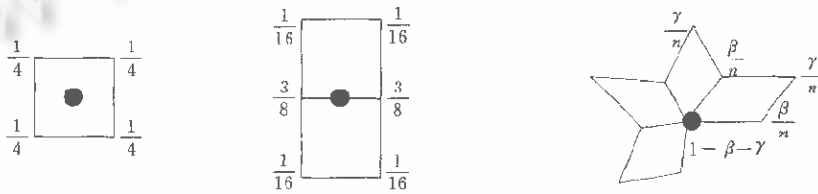
1 相关工作

为方便起见, 本文只讨论 Catmull-Clark 曲面^[1]的特殊效果生成. 本节首先较详细地介绍 Catmull-Clark 子分模式, 然后简略地描述几种子分曲面尖锐特征的生成方法.

1.1 Catmull-Clark 子分模式

Catmull-Clark 曲面是三次 B 样条曲面的推广. 生成曲面除有限个点为 C^1 外, 其余达到 C^2 连续. 对于给定控制网格 Catmull-Clark 模式, 对其每个面、边和顶点各生成一个新顶点, 分别称为面点、边点和顶点. 生成新网格点的规则如下(边界情形在第 2 节介绍):

- (1) 面点(face vertex): 由面的所有顶点求平均得到(权值如图 1(a)所示, 这样的图被称为模板);
- (2) 边点(edge vertex): 对内部边, 边点由共享此边的两个面上的顶点作加权平均(权值如图 1(b)所示);
- (3) 顶点点(vertex vertex): 对内部顶点, 顶点点由共享此顶点的所有面上的顶点作加权平均(权值如图 1(c)所示, 其中 n 为该顶点共享面的个数);
- (4) 新网格的拓扑连接方式: 面点与其所有边点连接, 顶点点与其所有边点连接.



(a) Stencil of face-vertex (a) 面点生成模板 (b) Stencil of edge-vertex (b) 边点生成模板 (c) Stencil of vertex-vertex ($\beta=3/2n, \gamma=1/4n$) (c) 顶点点生成模板

Fig.1 Stencils of face vertex, inner edge-vertex and vertex vertex
图1 面点、内部边点和内部顶点点的生成模板

1.2 几种特殊效果生成方法

Hoppe 等人首先考虑了子分曲面上尖锐特征(sharp feature)的生成^[6]. 具有尖锐特征的点是指那些切平面不连续的点. 为便于描述, 根据不连续性点附近的具体情况, Hoppe 等人把尖锐特征分成如下一些类别:

- (1) 折痕(crease): 曲面上一阶光滑曲线, 曲面沿该曲线为 C^0 , 而在其附近至少是 C^1 的;
- (2) 角(corner): 3 条或更多条折痕的公共交汇点;
- (3) 尖刺(dart): 曲面内部点, 折痕在此处终止;
- (4) 锥(cone): 折痕退化为一一点时, 称为锥;
- (5) 公共尖刺: 两条折痕的公共终止点.

Hoppe 等人的方法基于 Loop 子分模式. 具体做法是, 对给定的初始三角网格, 根据上面的分类, 给需要产生特殊效果的点或边打上相应标记, 对不同尖锐特征分别构造不同的子分规则. 在生成子分曲面时, 根据不同的标记采用相应的子分规则. Hoppe 等人用这种方法构造出了折痕、角和尖刺 3 种特殊效果.

Tony DeRose 等人在进行动画人物造型时也遇到类似问题^[9]. 例如, 人的指甲与皮肤的连接处是不光滑的. DeRose 把 Hoppe 严格意义下的尖锐特征称为无限尖锐的(irfinitely sharp). 但是实际物体并不存在这种严格意义下的尖锐特征. 同样地, 在机械制造中, 为加工方便, 零部件的不光滑槽边也不设计成无限尖锐, 而是采用圆角方法进行过渡. 现实生活中的这类尖锐特征被称为半尖锐的(semi-sharp). 为方便对人物造型, DeRose 采用基于四边形网格的 Catmull-Clark 子分模式生成曲面. 而其特殊效果的生成则继承了 Hoppe 等人的方法. 生成半

尖锐特征的想法也很自然,就是对特殊效果的点或边,采用特殊规则迭代若干次,在达到预期效果后就改用普通子分模式进行下一步的迭代,使之在较细的层次上达到光滑.这种灵活性为子分方法所特有.

Thomas Sederberg 等人在更一般的意义下处理了特殊效果问题^[10].他们提出了基于 Doo-Sabin 模式和 Catmull-Clark 模式的非均匀递归子分曲面(NURSS),从而把非均匀张量积 B 样条参数曲面推广到任意拓扑情形.具体方法是引入一系列的形状参数,并结合到子分规则中,从而通过选取不同参数来实现特殊效果.在这里,无限尖锐成了半尖锐的极端情形,体现在参数值上是,半尖锐时参数取正数,而极端情形取 0.

此外,Ayman Habib 和 Joe Warren 通过边和顶点插入算法也可得类似效果.所采用的子分模式基于四向 C^1 二次盒式样条(quadratic box spline surface),通过对矩形网格情形的子分矩阵特征根进行分析,把它推广到了任意拓扑情形.通过修改插入边的控制顶点或插入顶点本身来实现特殊效果.

上述方法基本上都是通过修改子分规则来实现的,因而把均匀(uniform)模式变成了非均匀(non-uniform)模式.前两种方法需要对不同特殊效果构造不同子分规则,这种规则的不一致性增加了实现的困难,并且不利于直接推广到其他模式.而后两种方法主要用来处理更一般的问题,仅就生成尖锐特征而言则显得过于复杂.

2 基于网格构造的尖锐特征造型

其实,在参数曲线/曲面造型中也存在类似的问题.比如,重复节点次数可以降低参数 B 样条曲线在节点处的光滑性,连续性降到 C^0 时,即产生尖点等不光滑效果^[12].插入节点实际上是修改了控制多边形的拓扑.子分曲面中的特殊效果能否通过修改或直接构造特殊的网格来实现呢?下面的讨论表明,回答是肯定的.

2.1 边界处理

一般子分模式都是针对封闭多面体而提出的,遇到带边界的网格,必须设计特殊的子分规则进行处理.对于 Catmull-Clark 子分模式,其边界上的新边点,由边的两端点取平均;边界上的顶点则由顶点本身及其两条边界上的另两个顶点作加权平均得到,权值为 $1/8, 1/8, 6/8$.其模板如图 2 所示.

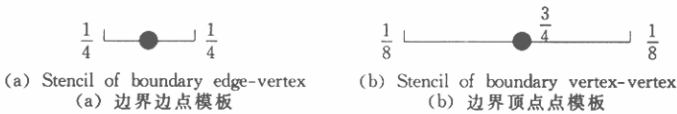


Fig. 2 Stencils of boundary edge-vertex and vertex-vertex
图2 边界上边点和顶点点的子分规则模板

经过修改后的 Catmull-Clark 模式生成的曲面边界与通常的矩形面片不同,它的整个边界是光滑的(见图 3 的右图).这是由于没有区分边界角点造成的.边界上的角点定义为只有两条边的点,它只能属于一个面.为使子分曲面在边界角点处具有同样的特点,另规定一个子分规则,即角点的顶点点取为角点本身.图 3 的中图是考虑角点后得到的效果.综上所述,边界有如下特点:

- (1) 边界极限曲线只与网格的边界顶点有关;
- (2) 边界曲线插值边界上的角点;
- (3) 边界曲线由被边界角点分开的段构成,每一段只受两角点间的顶点影响;
- (4) 如果有一条长度为 0 的边,此边的顶点总出现在新网格中.

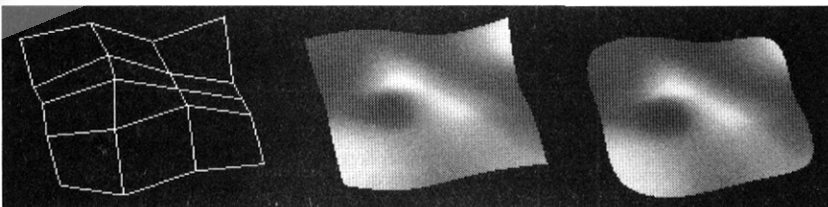


Fig. 3 Round patch without considering corner point and the counterpart
图3 原模式生成圆角曲面

事实上,边界极限曲线就是以边界点为控制多边形的B样条曲线,一般 C^1 是光滑的^[5].当网格边界有两个重复控制点时,根据参数曲线的理论,曲线在此点处的光滑性降低一次,因此只是连续而不再光滑,这正是所需要的特殊效果.下面具体讨论生成方法.

2.2 尖锐特征生成

根据第1节的分类,有锥、折痕、尖刺、角点以及有两条折痕的尖刺等常见的特殊效果.与文献[8]类似,首先给不同特殊效果的顶点作不同的标记,然后根据标记情况修改初始网格的拓扑结构,使得有标记的顶点或边成为边界点,再在这些地方采用边界规则.修改拓扑结构的基本方法是,对每个标记的顶点增加若干新顶点,其坐标值与标记顶点相同,增加的个数根据特殊效果类型确定.对标记顶点的每个网格面,适当修改其顶点序号,就是说,当某个面的顶点是标记点时,由于这个顶点已被复制,尽管复制点有相同的坐标值,但是不同的点有不同的序号或名字,应根据需要确定是否把面中这个顶点的序号改成其复制点的序号,最终目的是使原标记顶点及新增加复制顶点都成为边界点.经过这一步,就把各种类型的尖锐效果都转化成边界情况来处理了,这也就是前面提到的统一处理的含义.这样做的好处是无须分别考虑新的子分规则,避免采用新规则引起的收敛性和光滑性分析的工作,并且容易推广到其他子分模式.下面分别讨论将各种尖锐特征转化成边界情形的方法,从而达到所谓的统一到边界情形的目的.

(1) 锥

根据定义,锥是曲面内部的不光滑点,而其邻近点都光滑,因此,极限曲面在锥点附近(除锥点本身外)应是光滑的(见图4).假设与此锥点相连的边数为 n ,那么首先重复锥点 $n-1$ 次,然后依次相连形成一个 n 边形,最后把新增加的 n 条边分别插入到 n 个面中.在图5中,图5(b)为图5(a)修改后的拓扑,其中粗线内环的所有顶点实际上是重合的,因此其边长度为0.

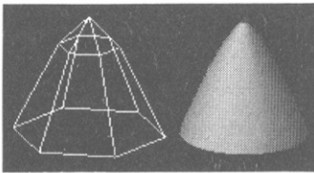


Fig. 4 Cone
图4 锥

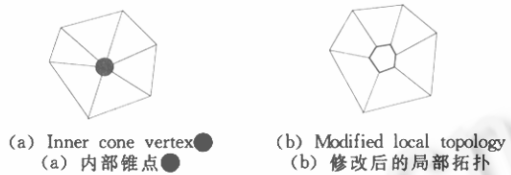


Fig. 5 Modification of mesh topology for cone
图5 锥的网格拓扑修改

(2) 折痕

在初始网格中,折痕被标记为一条网格顶点链,中间不能有间断.

把链转化成边界的方法是:首先对链上的每个顶点和边都重复一次.设其中有一条边 AB , A,B 为端点,相应地,重复点和重复边分别为 A',B' 和 $A'B'$.然后修改共享 AB 边的两个多边形的数据结构,把其中一个多边形的顶点 A,B 分别改为 A',B' ,相应的边变为 $A'B'$.此外,只共享一个顶点的多边形,比如共享顶点 A ,要根据具体情况确定是否用 A' 代替.其准则是看能否对链两侧的多边形进行解耦,使它们不共享边和顶点,并且把链一分为二,如图6(a)和(b)所示.

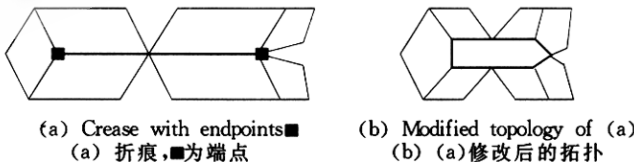


Fig. 6 Modification of mesh topology for crease
图6 折痕的网格拓扑修改

其次,对包含某个端点(链的起始或终止点)但不包含链中其他顶点的多边形,设其个数为 r ,它们构成一个扇形域.如果 $r=0$,不作任何处理; $r=1$,把上面增加的新顶点插入此唯一多边形(例如图6(a)中的左端点)中,相

应地,增加一条长度为 0 的边,其效果见图 7 的左图; $r \geq 2$,再增加一个新顶点(因此此端点总共重复了两次),扇形两边的两个多边形各增加一条长度为 0 的边,扇形中间的其他多边形则只修改原端点的序号(见图 6(a)和(b)中链的右端点),效果见图 7 的右图.图 8 的左图为封闭的折痕.

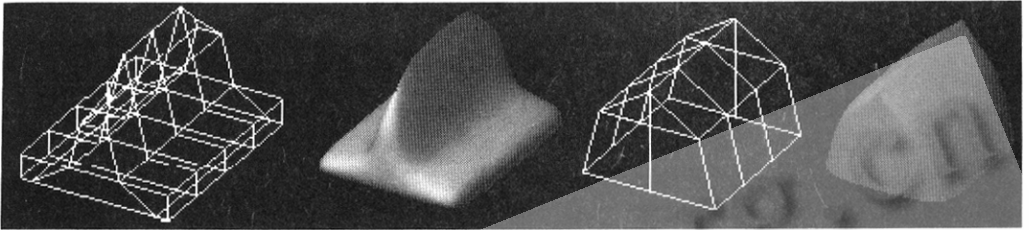


Fig. 7 Left, $r=1$ and right, $r=2$

图 7 左图, $r=1$; 右图 $r=2$

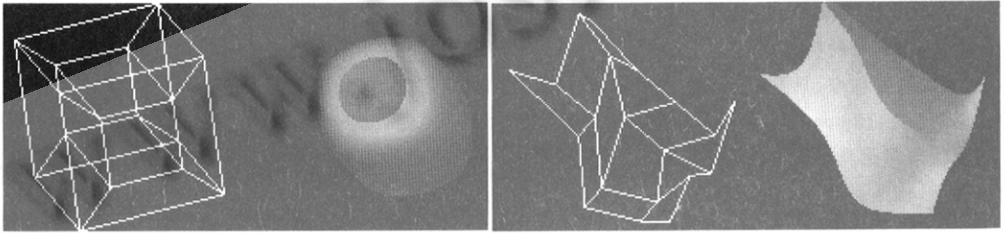


Fig. 8 Crease and dart

图 8 折痕和尖刺

(3) 尖刺

尖刺是由折痕造成的,更直观地可认为其与链的端点相对应.其生成与折痕类似,但更简单,只需对链的每个中间点都重复一次,并相应修改受影响的多边形的顶点序号,端点处不作任何改动,如图 9 所示,图 9(a)中的正方形块表示要生成尖刺的点,(b)是对(a)修改的结果.应注意到,尽管链中间的顶点从拓扑上分离了,但它们的坐标位置是相同的.图 8 的右图表现的是一个尖刺的效果.多折痕形成的尖刺类似处理.

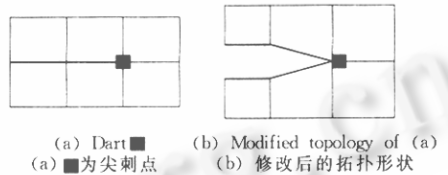


Fig. 9 Modification of mesh topology for dart
图 9 尖刺生成

(4) 内部角点

内部角点为折痕的交汇处,其中每条折痕的处理方法与折痕类似,而折痕交汇的端点处理则与锥点类似,但要稍有变通.如图 10(a)所示,中心点为网格的角点,3 条粗线为折痕链,每条折痕各新增两个端点,并把它插入与折痕相邻的两个多边形中,其修改后拓扑为如图 10(b)所示.图 11 为内部角点生成的例子.



Fig. 10 Modification of mesh topology for corner
图 10 角点生成

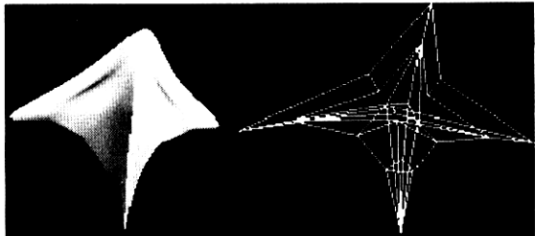


Fig. 11 Inner corner
图 11 内部角点

2.3 连续性讨论

作为一个例子,我们只考虑折痕生成的情形.只需指出如下几点:

(1) 曲面在折痕处是连续的.对原网格进行拓扑修改后,折痕链一分为二,两条链是完全重合的,并且在子分过程中互不影响,因此它们所生成的极限曲线也必定重合.这就保证了折痕在曲线处的连续性.数值计算结果也证实了这一点.

(2) 曲面沿折痕一般是不光滑的.沿折痕处只是曲面的两段边界正好相重,相互没有任何光滑性约束,因此一般情况下肯定是不光滑的.

(3) 曲面在非折痕处是光滑的.对网格拓扑修改后,折痕变成边界,与特征点相关的多边形拓扑将受影响,即原来的正则点现在有可能变成奇异点,因此可能会降低某些点的光滑性.但 Catmull-Clark 曲面在正则点处是二阶光滑的,而在奇异点处也达到一阶光滑.因此,整体上曲面仍达到一阶光滑.

3 结论

本文提出了一种尖锐特征的生成方法.其基本思想是,通过网格拓扑的修改或构造对特征点附近的多边形进行解耦,使得内部的特征点和边变成边界顶点和边,从而可以用边界子分规则统一处理,也就是说在修改后的网格中,不再有特征点,只是增加了边界点和边界边.此算法具有简洁灵活的特点,且易于推广到其他子分模式.此方法还解决了 Hoppe 没有实现的锥和两条痕共有的尖刺^[8]问题.进一步的工作可以考虑所谓的逆向问题,即用上述方法来简化具有折痕的大型网格数据.此外, Hoppe 没有考虑的更一般的尖锐效果,比如多条折痕相交于一点的情形,也是有待解决的问题.

参考文献

- 1 Catmull E, Clark J. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer Aided Design*, 1978,10(6):350~355
- 2 Doo D, Sabin M. Behaviour of recursive division surfaces near extraordinary points. *Computer Aided Design*, 1978,10(6):356~360
- 3 Loop C. Smooth subdivision surfaces based on triangles [MS Thesis]. Utah: Department of Mathematics, University of Utah, 1987
- 4 Dyn N, Levin D, Gregory J A. A butterfly subdivision scheme for surface interpolation with tension control. *ACM Transactions on Graphics*, 1990,9(2):160~169
- 5 Zorin D. Subdivision zoo. In: Zorin D, Schröder P eds. *Subdivision for Modeling and Animation*. Los Angeles, California, ACM Inc., 1999. 65~87
- 6 Kobbelt L. A variational approach subdivision. *Computer Aided Geometric Design*, 1996,13(8):743~761
- 7 Zorin D, Schröder P, Sweldens W. Interpolating subdivision for meshes with arbitrary topology. In: Rushmeier H ed. *Computer Graphics Proceedings, Annual Series*. New York: ACM SIGGRAPH, 1996. 189~192
- 8 Hoppe H, DeRose T, Duchamp T *et al.* Piecewise smooth surface construction. In: Glassner A ed. *Computer Graphics Proceedings, Annual Series*. Orlando: ACM SIGGRAPH, 1994. 295~302
- 9 DeRose T, Kass M, Truong T. Subdivision surfaces in character animation. In: Cohen M ed. *Computer Graphics Proceedings, Annual Series*. Orlando: ACM SIGGRAPH, 1998. 85~96
- 10 Sederberg T, Zheng J, Swell D *et al.* Non-Uniform recursive subdivision surfaces. In: Cohen M ed. *Computer Graphics Proceedings, Annual Series*. Orlando: ACM SIGGRAPH, 1998. 387~394
- 11 Habib A, Warren J. Edge and vertex insertion for a class of C^1 subdivision surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, 1999,16(4):223~247
- 12 Zhu Xin-xiong. *Modeling Technology of Free Curves and Surfaces*. Beijing: Science Press, 2000
(朱心雄.自由曲线曲面造型技术.北京:科学出版社,2000)

Generation of Sharp Features for Subdivision Surfaces

LI Gui-qing¹ LU Bing² LI Xian-min¹ LI Hua¹

¹(CAD Laboratory Institute of Computing Technology The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

²(Guangxi University Nanning 530004)

Abstract Though smoothness of surfaces is one of the main goals in free-form surface modeling, non-smooth effects, such as sharp features, are required in some occasion. Generation of them is investigated in this paper. A method based on the construction of mesh topology is presented to unify the generation of the sharp features such as crease, corner, dart and cone into the method of boundary process. Thereby creating special subdivision rules is avoided for different effects, and thus the sharp features are realized without updating subdivision schemes.

Key words Subdivision surface, sharp feature, surface modeling, CAD/CG, computer graphics.