

基于特征造型的自由曲面特征及约束求解的研究

王远志¹⁾ 孙立镛²⁾ 江克勤^{1),3)}

¹⁾(安庆师范学院计算机系, 安庆 246011) ²⁾(哈尔滨理工大学计算机控制学院, 哈尔滨 150080)

³⁾(中国科学技术大学计算机科学与技术系, 合肥 230027)

摘要 在对 HUST-CAID(哈尔滨理工大学计算机辅助工业造型设计)系统进行研究的基础上,首先引入了自由曲面特征,然后结合 HUST-CAID 系统定义了自由曲面特征的分类和参数化,同时系统为用户提供了—组适当的参数,使用户能够直观的设计任意曲面,而不必参与曲面的底层设计,当用户修改参数时,系统就会自动提供相应的反馈。为了求解出与约束一致的图形,还给出了一种新颖的原型驱动约束求解算法,并在 HUST-CAID 系统中进行了仿真实验,结果显示,此算法能够有效地简化约束求解和特征造型的过程。

关键词 特征造型 自由曲面特征 特征类定义 特征参数化 约束求解

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)11-1673-05

Research on Freeform Feature and Constraint Solving Feature-based Modeling

WANG Yuan-zhi¹⁾, SUN Li-quan²⁾, JIANG Ke-qin^{1),3)}

¹⁾(Computer Department of Anqing Normal College, Anqing 246011)

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

³⁾(Computer Science & Technology Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract The freeform feature modeling was introduced in HUST-CAID. Classification and parameters were defined combining with the HUST-CAID system(computer aided industry design system developed by Harbin university of science and technology); users could intuitively design any curved surface using a set of suitable parameters provided by the system without concerning the lower layer design. If users want to modify the parameters, the system will correspondingly provide feedback automatically. In order to obtain the right graphics agree with the constraint, it is provided a new novel prototype-driven constraint solving algorithm. The simulation result in HUST-CAID shows that this novel algorithm simplified constraint solving and feature modeling greatly.

Keywords feature modeling, freeform features, feature class specification, feature parameterization, constraint solving

1 引言

特征^[1]是产品某一形状的代表,它在产品生命周期中代表了一般的形状和功能信息。

一个特征的所有属性都被存储在一个相应的特征类中,而且这个特征类为它所有的实例定义了一

个模板,其一般包括特征的形状和决定图形形状的参数。用户可通过给这些参数赋予不同的值来创建模板的不同实例。一个特征实例通常依附于模型中其他特征,也就是说,特征中一些面与其他特征的面相连。在一些系统中,终端用户可以自定义新的特征类。

有效条件是特征造型的一个重要方面。在实际

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60173055);安徽省自然科学基金资助项目(2006KJ081B)

收稿日期:2006-06-06;改回日期:2006-08-01

第一作者简介:王远志(1977~),男。2005年获哈尔滨理工大学计算机应用技术专业工学硕士学位,现为安庆师范学院讲师。主要研究方向为计算机图形学与CAD。E-mail:wanguanzhil@sohu.com

造型设计中,大多数的特征造型系统都仅有一个最根本的有效性维护,但在实际工作中,即使所有的功能信息都被存储在模型中,在建模过程中,模型的有效性通常也不能被充分维护。理想情况下,所有有效条件,也就是特征的语义,将由每一个建模操作之后的系统来维护。支持这种观念的方式就是 HUST-CAID 系统所采用的语义特征模型。

显然,一个自由曲面特征类的描述比一个规则形状特征类的描述要复杂得多,因为它不仅包括通常的图形模拟,例如, NURBS,更重要的是,还要选择一组参数^[2,3]使特征可以实例化及可以通过修改参数来修改实例,这就需要在这些参数和 NURBS 实体的底层定义之间建立一张对应表。

2 HUST-CAID 自由曲面特征类定义

由于不规则几何图形复杂而且多样,因此,在自由曲面特征^[4,5]定义时,形状特征的交互性建模是非常重要的,因为这种交互性使图形直观的参数化和功能信息添加到特征类中成为可能。本节主要考虑自由曲面特征类定义方法的几个必要条件。

下面给出一个形状特征类定义的步骤:

- (1) 确定基本属性;
- (2) 创建图形形状的原型;
- (3) 定义几何约束;
- (4) 参数化;
- (5) 包含的功能信息;
- (6) 特征类的有效性

即首先,自由曲面特征类是以确定新特征类的一些基本属性开始,例如,无论是增加特征或删除特征都有明确的定义。

然后,运用自由曲面特征定义点 (freeform feature definition points, 简称 FFDPs) 来创建图形形状的原型。在 3 维空间中这些点是构造模型的基本要素,如,曲线。在此基础上,再运用扫掠法 (sweeping) 和蒙皮法 (skinning) 技术来实现图形原型化的几何形状和最终的特征实例形状,在类的定义中,一个 FFDPs 就作为一个构造配置。图 1 是由 8 个 FFDPs 构成的例子,它可以先通过修改 FFDPs 来定义一个扫掠操作的路径和剖面曲线;然后,执行扫掠操作,即可建立一个曲线形形状原型图。因此,运用普通的自由曲面建模技术就可以构造大量的图形形状。

为了使一般的特征类都能实例化,在 FFDPs 中

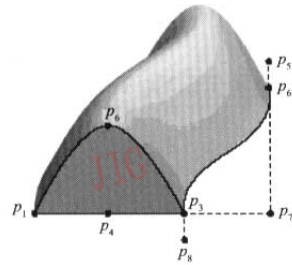


图 1 8 个 FFDPs 配置组成的原型结构

Fig. 1 A prototype from a configuration of eight FFDPs

定义了几何约束广播网。在配置 FFDPs 时,有两种约束类型是可利用的,它们就是两个 FFDPs 之间的距离和 3 个 FFDPs 之间的角度。

定义 FFDPs 的 $p_a, p_b \in \mathbf{R}^3$ 之间的长度约束为

$$\|p_a - p_b\| = d_{a,b} \quad d_{a,b} \in \mathbf{R}^+ \text{ (非负实数集)} \quad (1)$$

式(1)中 $d_{a,b}$ 可以是一个变量,也可以是一个常量。

定义 FFDPs 的 $p_a, p_b, p_c \in \mathbf{R}^3$ 之间的角度约束为

$$(p_a - p_b) \cdot (p_c - p_b) = \cos(\alpha_{a,b,c}) \quad \alpha_{a,b,c} \in [0, \pi] \quad (2)$$

式(2)中,与 a, b, c 点对应的角度 $\alpha_{a,b,c}$ 可以是一个变量,也可以是一个常量。其中,点 p_a, p_b, p_c, p_d 为一般意义上的变量。

图 2 虽表示了图 1 的角度和长度约束,但能够确保路径和剖面曲线在垂直平面上的 FFDPs 之间的潜在约束却没有显式地表示出来。

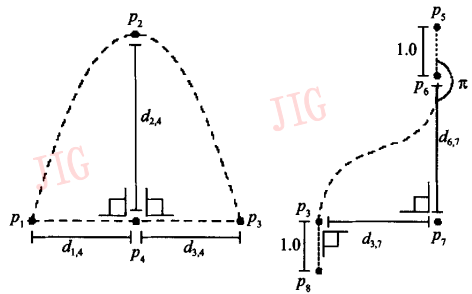


图 2 路径和剖面曲线的长和角约束

Fig. 2 Distance and angle constraints in path and profile

定义几何约束系统后,即可确定特征类参数。在系统中,定义一个好的参数系统是非常重要的,因为它涉及到能否把自由曲面特征类通过一组直观的参数实例化。

图 3 给出了图 1 的曲肋参数系,其参数与图 2

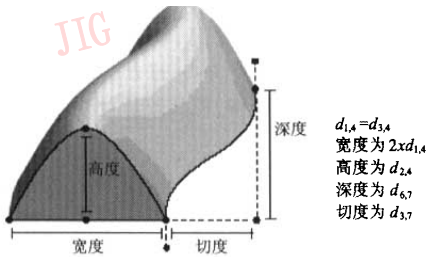


图 3 曲肋的特征类参数分配

Fig. 3 Parameters assigned to a curved rib feature class

中用代数约束表示的几何约束相关。

定义好参数系之后,即可把功能信息(如有效条件和操作指令)添加到特征类中用来定义特征的语义。

最后是特征类的有效性。用默认的特征参数值创建自由曲面特征类的实例时,有以下两个原因可能导致实例化失败,一是约束系统配置出错,二是其结果几何形状是无效的,例如:图形的自交^[6]。

自由曲面特征定义方法的一个重要方面是原型驱动,在接下来的一节将讨论这个问题。

3 HUST-CAID 原型驱动约束求解算法

大家知道,求解 3 维几何约束的基本方法是把原问题分解为多个子问题。如果每个子问题的解都不是唯一的,则求解器就为每一个子问题选择一个特定的解来合成一个简单、明确的全局解。

本节以 HUST-CAID 求解器为基础,结合 Berg 提出的自由曲面特征、3 维几何约束求解及 HUST-CAID 系统的特点,提出了原型驱动约束求解算法。此算法在求解的过程中,可自动寻找适合用户意图的解,而无需用户交互。其求解过程分为图形分析、子问题求解和全局解的构造 3 个步骤。

3.1 图形分析

通过分析约束图来寻找能被单独求解的子问题集。尽管分析算法不同,但由于运用了不同的求解约束类型,因此都可以得到以下相同的两种子问题:三角形子问题和四面体子问题。同时,此阶段也能辨别欠约束和过约束问题。

在此阶段,可对三角形和四面体子问题进行识别。为了选出具有完备约束的组合,并求出它的解,可把四面体问题分解为与四面体的 4 个面相关的三

角形子问题(如图 4 所示)。

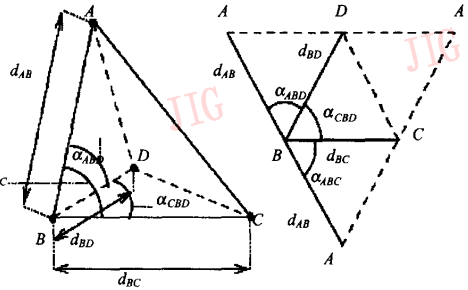


图 4 四面体约束平面图

Fig. 4 Fold-out of a tetrahedron with constraints in faces

本文把三角形子问题和四面体子问题分别称作三角形约束和四面体约束。

图形分析算法的目的是把原图中关于点的长度约束和角约束转化为关于长度变量和角变量的三角形约束和四面体约束的新图。但两者的映射要确保新图能用局部传播法求解。

图形分析算法分为以下 3 步:

(1) 把原图中长度和角约束转化为新图中的长度变量和角变量。在原问题中,如果点集有确定的长度约束或角约束,那么在新图中相应的长度或角也是固定的。

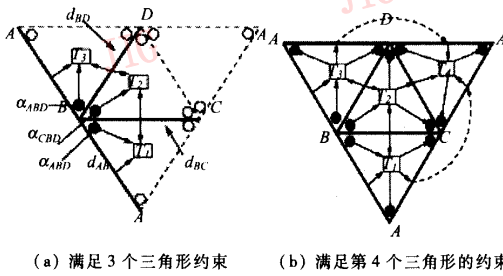
(2) 创建三角形约束和四面体约束。仅仅创建那些满足条件的约束,也就是说,只创建那些有足够的变量被确定或可以被其他的约束确定的约束。其创建的规则如下:

① 如果有一个长度和两个角、两个长度和一个角或者 3 个长度已确定以及可以通过其他的约束确定,那么就可创建一个三角形约束。

② 如果至少有 3 个面能被三角形约束确定,那么就可确定为一个四面体约束。

如与 $\triangle ABC$ 相一致的三角形约束,可用变量 d_{AB}, d_{AC}, d_{BC} 代表三角形 3 条边的长度, $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ 代表三角形的 3 个角。图 5 表明了添加三角形约束的过程。在原问题中,3 条边长 d_{AB}, d_{AC}, d_{BC} 和 3 个角 $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ 是约束条件。在新图中已知一个长度变量和一个角变量。根据这些变量,图中 3 个三角形子问题就可以被求解,并可在新图中创建三角形约束 T_1, T_2 和 T_3 (如图 5(a)所示)。

显然,在图中,三角形约束确定了三角形另外 3 条边的长度: d_{AC}, d_{AD} 和 d_{CD} 。用这 3 个变量即可以



(a) 满足 3 个三角形约束 (b) 满足第 4 个三角形的约束

图 5 添加三角形约束的过程

Fig. 5 Three triangle constraints added

求解第 4 个三角形子问题和创建三角形约束 T_4 (如图 5(b) 所示)。重复上述过程直到没有其他的三角形约束产生为止。

(3) 创建四面体约束广播网。每一个四面体确定一个 4 点子结构。除了没有已知的长度和角,其创建四面体约束的过程和三角形约束的过程类似。

3.2 子问题求解

运用局部传播法 (local propagation) 求解上一步即得到新的约束图,即首先求解三角形约束问题;然后即可运用求得的结果来求解四面体约束问题。

当求解一个详细的三角形约束时,一些变量是约束求解之前确定的,即输入变量;而另一些变量则是由已知约束确定的,即输出变量。对于一个完备约束的三角形约束,由于三角形有 3 条边的长度或一条边的长度和两个角或两条边的长度和一个角是已知的,因此在一个完备约束的三角形中有 19 种输入变量组合。这些组合可以用 5 种方法中的任一种求解,这 5 种方法是由不同的输入和输出变量(如表 1 所示)组合所决定的,其他的排列可以通过旋转或镜像三角形得到。其中有 4 种方法都设计到简单的圆和(或)线相交;当用一种方法进行计算时,则不需任何相交。

表 1 三角形约束求解法

Tab. 1 Triangle solving methods

输入变量	输出变量	交点
d_{AB}, d_{AC}, α_A	$d_{BC}, \alpha_B, \alpha_C$	—
d_{AB}, d_{AC}, d_{BC}	$\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$	圆—圆
d_{AB}, d_{AC}, α_B	$d_{BC}, \alpha_A, \alpha_C$	圆—线
$d_{AB}, \alpha_A, \alpha_B$	d_{AC}, d_{BC}, α_C	线—线
$d_{AB}, \alpha_A, \alpha_C$	d_{AC}, d_{BC}, α_B	线—线

如果三角形的解不止一个,则必须依据一定的准则选择一个解,这个标准是:被选解与原型相似。这种情况只在圆—线(circle-line)方法中出现,虽然其他的方法也会有多个解,但其解是对称的,且具有相等的长度和角。

图 6 给出了圆—线(circle-line)相交方法中的 $\triangle ABC$ 的结构。如果输入变量:两个边 d_{AB}, d_{AC} 和一个角 α_B ,那么点 C 就是以 A 为圆心、以 d_{AC} 为半径的圆和边 BC 所在直线的交点。如果 $d_{AC} \geq d_{AB}$,且只有唯一解满足角 α_B ,则不需要选择。然而如果 $d_{AC} < d_{AB}$,则有零个、一个或者两个解。如果线与圆没有交点,则问题没有解,即三角形是过约束的;如果线与圆的交点是单一的,也就是说,线与圆相切,则问题有唯一解(图 6);如果有两个交点,那么分居 AT 线的两边。在 AT 线左边的点 C_1 有一个锐角;在 AT 线右边的点 C_2 有一个钝角。形式上,本文把三角形中点 Q 的锐角定义为

$$sharpness(\angle Q) = \begin{cases} sharp & 0 \leq \angle Q \leq \pi/2 \\ blunt & \pi/2 \leq \angle Q \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

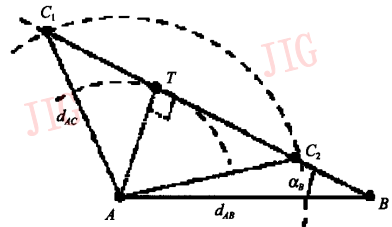


图 6 圆与线交点法构造解

Fig. 6 Constructing solutions using circle-line intersection

3.3 全局解的构造

求解算法的最后阶段是把四面体子问题的单个解组合构造出原问题的全局解,也就是全局解的构造。全局解是一个点的 3 维结构,四面体约束的解是在其局部坐标系里的 4 点结构。由于具有 3 个公共点的两个四面体能够通过翻转和旋转子问题解来确定,因此也可能产生和任何其他四面体都不共面的四面体。这样的系统是欠约束的,因为在系统中有多余的自由度。

为了在两个都有可能的三角形结构中选择一个,在求解单个四面体时,运用了右(左)手法则,但在全局解中,这种选择受到一对邻近四面体是否重叠或相比邻的影响(如图 7 所示)。

当求解一个自由曲面特征时,FFDPs 的结果配

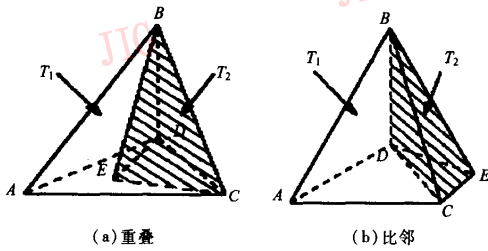


图 7 重叠邻近四面体及比邻四面体

Fig. 7 Neighbouring tetrahedral are either over-lapping or adjacent, as shown left and right respectively

置可用来产生一个新的自由曲面特征实例。由于在特征类定义中的长度和角约束与特征类一样,且三角形和四面体约束的同一图形可能产生不同参数值的特征实例,因此,图形分析算法的效率是不容置疑的。

4 仿真实验

在类的定义中,3 维空间中的一般自由曲面特征形状都可以用约束自由曲面特征定义点来完全定义。构造法(如扫掠法和蒙皮法)是用 FFDPs 定义的模型原理创建特征的几何形状。而在类定义和类的实例化过程中,则是用一种新的、有效的原型驱动约束求解方法来求解相应的约束系统。

这种算法在 HUST-CAID 系统中得到证明。图 8 表明了一个穿孔特征的参数和结构化原型。由参数和原型结构图生成的模型如图 9 所示。

尽管原型驱动约束求解算法得到的结果比较符合设计者的意图,但还是有几个方面需要进一步提高,如:①用附加几何约束法进一步扩展自由曲面特征类的种类;②用更高层约束使自由特征类定义更方

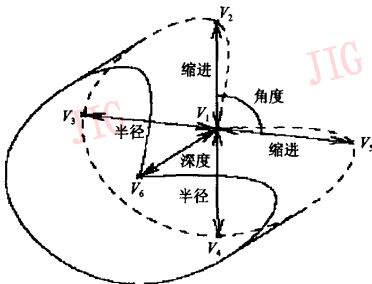


图 8 自由曲面特征穿孔的原型结构和参数

Fig. 8 Configuration prototype and parameterization of a freeform through hole feature

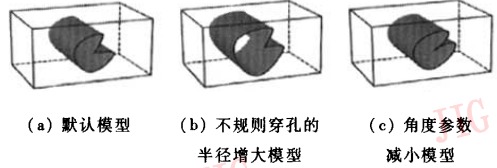


图 9 具有 3 个变量的自由曲面穿孔特征的特征模型
Fig. 9 Feature model with three variants of a freeform through hole feature

便;③用更先进的方法把自由曲面特征实例添加到模型中;④对特定的特征属性使用新的有效性维护设备。

5 结论

在 3 维几何约束求解的基础上,采用 FFDPs 定义,提出了原型驱动约束求解算法,并把求解过程分为 3 个阶段。此算法为用户提供了一组直观的参数,以避免其参与底面设计。并为用户提供了把自定义的特征添加到类库的功能。此算法虽然得到了比较满意的解,但如上节最后所述,有些功能还不是很完善,需要进一步研究,使其功能得到改进和完善。

参考文献 (References)

- 1 SUN Jia-guang, YANG Chang-gui. Computer Graphics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. [孙家广,杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.]
- 2 GE Jian-xin, YANG Li. Principles and implementation techniques for parametric design in a differential point of view[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(3):261~269. [葛建新,杨莉. 微分观点下的参数化设计原理和实现方法[J]. 计算机学报,1998,21(3):261~269.]
- 3 ZHANG Xin-fang, LUO Hao. Reasoning based automatic parametric drawing management system[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 1996, 8(1):68~74. [张新访,罗浩. 基于推理的自动参数化图形库管理系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1996,8(1):68~74.]
- 4 Vergeest J S M, Horvath I, Spanjaard S. Parameterization of freeform features[A]. In: A. Pasko, M. Spagnuolo (Eds.); Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications, Shape Modeling International [C], Genoa Italy: IEEE Piscataway, 2001: 20~29.
- 5 Vanden Berg E, Bronsvort W F, Vergeest J S M. Freeform feature modeling: concepts and prospects [J]. Computers in Industry, 2002, 49(2):217~233.
- 6 Parametric Technology Corporation. pro/CONCEPT product information[EB/OL], <http://www.ptc.com/>,2003.