

基于多分辨率模型的三角曲面特征线辨识技术

贾明 吕震 柯映林

(浙江大学机械与能源工程学院, 杭州 310027)

摘 要 由于特征线在反求工程 CAD 建模中具有非常重要的作用, 因此利用图形图像处理中的多分辨率模型概念, 通过研究三角曲面模型的特征线, 提出了一种三角曲面特征线的计算方法, 将计算得到的初始特征线通过编辑、修改等手段进行处理, 得到清晰的特征线, 并将其作为进一步划分重构 B 样条曲面边界的依据和参考, 从而为实现基于三角曲面模型的 B 样条曲面重构奠定了基础. 实验结果表明, 该算法能够在三角曲面上提取出令人满意的特征线, 并据此重构出拓扑划分合理的 B 样条曲面.

关键词 多分辨率模型 三角 Bezier 曲面 特征线 反求工程

中图分类号: TP391.41 **文章标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)10-1043-05

Feature Curves Extraction of Triangular Bézier Patches Based on Multiresolution Modeling

JIA Ming, LU Zhen, KE Ying-lin

(Department of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Feature plays an important role in reverse CAD modeling. Based on the multiresolution modeling, a series of approximation models and algorithms for feature curves extraction from the triangular Bézier patch is studied. First, a near coplanar merging algorithm based on Gauss sphere is used to generate superfaces. Then the outer and inner boundaries of every superfaces are extracted, which are original or coarse feature curves. Taking account of the complexity and arbitrary of triangular Bézier patches model, editing operation applying on feature curve is inevitable during practical application. The feature curves are the important reference for rectangular boundaries definition. This research has laid a good fundamental for fulfilling the local B-spline surface reconstruction from triangular Bézier patches. Some experimental results show that the above method is feasible and satisfying, and reasonable rectangular topological B-spline surfaces can be reconstructed according to the feature curves extracted from the triangular Bézier patches.

Keywords Multiresolution, Triangular Bézier patches, Feature curves, Reverse engineering

0 引言

随着 CAD 技术应用领域的不断扩大和深入, 以及数字化测量技术的普及, 以数字化测量、CAD 建模为基础的反求工程(RE, Reverse Engineering)技术日益受到重视^[1,2]. 定义在三角形区域上的三角 Bézier 曲面(Triangular Bézier Patches, 以下简称 TBP)建模方法因其具有插值于任意边界内散乱点

数据的能力, 而在 RE 领域受到青睐. 但是该方法出现时间不长, 缺乏足够的商用软件支持, 因此, 常常需要把 TBP 模型转换为传统 CAD/CAM 软件可以接收的、定义于四边域的 B-Spline 曲面模型, 以便充分利用丰富的、基于 B-Spline 建模方法的商用 CAD/CAM 软件完成进一步设计与制造任务. 在转换过程中, 能否按照 B-Spline 曲面建模要求, 据零件模型表面特征线对 TBP 模型正确完成四边域分割(即 B-Spline 曲面分割), 将直接关系到这种转换

的成败与效果^[3],因此,研究如何从零件 TBP 模型中自动识别出零件表面特征线,并提取出相应数据,对于快速完成 TBP 模型的四边域分割,实现从 TBP 模型到 B Spline 曲面模型的转换具有重要意义。

通过引入多分辨率模型的概念,利用 TBP 模型中的三角平面片及其法矢,可使用相应算法得到零件 TBP 模型表面的特征线,为 TBP 模型向更为通用的 B-Spline 曲面模型转换提供至关重要的曲面分割依据。

1 三角曲面模型的特征线计算方法

针对曲面特征线(尤其是三角曲面特征线)计算的理论和方法尚不多见。在实际工作中,局部特征的初始位置和大致形状主要由设计人员据曲面的形状来确定,计算和分析只起到辅助评价和求精的参考作用^[4]。

多分辨率模型是对场景中的景物进行多层次表示的一种方法,它可以在不同层次上体现物体的细节,提高计算机处理图形、图象的速度。多分辨率模型技术主要分为简化(Decimation)和细化(Refinement)^[5,6]。简化是对模型细微结构的去除,同时保留模型的主要特征区域,有些算法还可以保证物体拓扑结构不变;细化是通过递归地向原始模型中插入数据点,使物体的细节部分不断得到体现。

特征计算是多分辨率简化过程。常用的多分辨率模型简化算法有多种^[7-9],其中“超面”算法和基于 Gauss 球的多分辨率模型简化算法是针对三角平面片模型,基于共面准则,将整个模型的三角平面片分成若干连通区域,利用多边形面片代替各个区域使原来的模型得到简化。与其他算法比较,它计算简单,时间复杂度低,可以有效地控制近似误差,能够很好地保持模型的几何特征。

基于这一思想,据三角曲面的特点,在此提出了一种基于多分辨率模型的三角曲面简化特征线提取算法,即利用三角曲面模型中的三角网格(即三角平面片)及其法矢,利用法矢比对的方法,将可以合并的三角片进行合并,进一步提取合并区域的边界,最终得到区域的边界,即曲面的特征线。

2 算法原理

利用多分辨率模型的概念,对三角曲面模型中

的三角网格进行基于区域合并的简化处理,算法基本原理为

(1) 首先建立一个用于法矢比对的标新高斯球(Gauss Sphere,单位立方体的外接球),并对高斯球进行层次分割(如图 1);

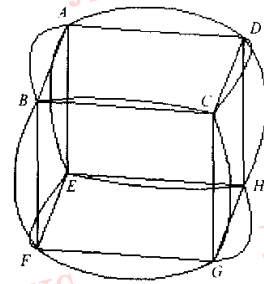


图 1 立方体向高斯球的映射

(2) 以每个三角网格为处理对象,将三角网格的法矢与高斯球分割球面的代表法矢进行比对,将法矢落在同一个高斯球分割球面上的三角网格进行合并得到非平面多边形,称为超面(Surface),如图 2 所示;

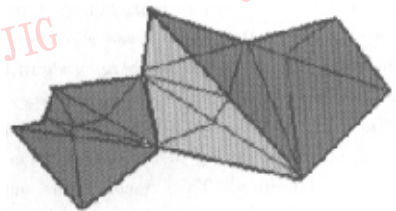


图 2 合并的三角网格形成超面区域

(3) 最后对超面边界进行提取,计算出三角曲面的特征。

由于算法是以单个的三角网格(即三角平面片,以下简称三角片)为处理对象,对于三角曲面模型来讲,由测量数据构成的三角网格不够细密,对这种粗大网格模型进行简化计算,效果不是很好。为此,提出了将三角曲面按照误差精度进行三角片离散的方法,将三角曲面模型表达为在一定误差精度控制下的三角片模型,为多分辨率模型简化算法提供一个较原始三角网格更精确的三角片模型。图 3 是由原始测量数据构成的网格模型,图 4 是在 0.01mm 精度下离散的三角片网格模型。显然利用图 4 的网格模型进行特征计算,结果应好于原始网格模型。

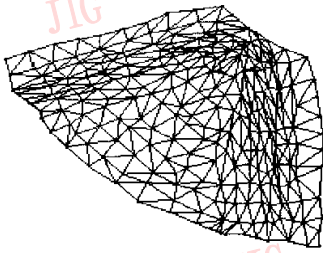


图 3 原始测量数据连接的网格



图 4 0.01mm 精度下的三角片网格

2.1 高斯球的层次分割

首先,将单位立方体与其外接球建立映射.映射的方法是利用立方体的 6 个对角平面 ABGH、CDEF、AFGD、BCHE、BFHD、AEGC 分别与球面求交,得到立方体的 12 条棱线在球面上的映射.这些交线将球面分割为 6 个面积相等的球面(见图 1).在每个分割好的 1/6 球面上,按照平面九叉树进行再次映射,得到的结果是将该球面分割为球面节点.

映射的方法是对每张 1/6 球面,根据九叉树的结构进行等弧度划分(如图 5).平面九叉树表示一种层次数据结构.正方形为树的根节点,将正方形分为 9 个小正方形,其边长为原来的 1/3.如果将小正方形再进行分割,就得到深一层次的分割,如图 5 中层次 1 将整个球面映射为 54 个球面节点,层次 2 将球面映射为 486 个球面节点.

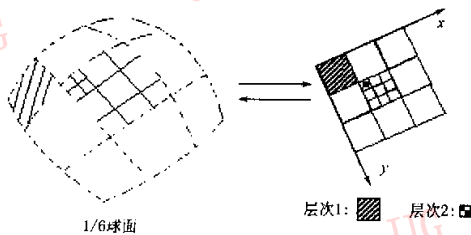


图 5 球面与平面九叉树的映射关系

不同分割层次代表了高斯球的不同分割模型,按照不同分割模型对曲面进行简化得到的就是不同分辨率下的简化模型.分割的层次越少,代表的模型分辨率越低,只能保留最主要的特征;分割层次越深,模型分辨率越高,细微的特征也可以保留住.一般来讲,利用层次 1 的分割关系进行简化就可以了,提高分割层次会造成最终提取的特征过于零散.

对于三角曲面上的任意一个三角片,利用三维数组 (d_1, d_2, d_3) 进行分类记录.其中, d_1 取值范围是整数 $0 \sim 5$,表示三角面片法矢位于单位立方体的哪一个面上; d_2, d_3 分别表示位于面上的平面九叉树节点的编号,其取值与分割的层次有关.

2.2 建立共面片集合

共面面片集合就是三角片法矢同属一个球面节点的三角片集合.建立近似共面面片集合的过程就是根据每个三角片的法矢确定其归属的球面节点的过程.如图 6,如果将三角片的法矢均移到高斯球的球心 O 处,则所有法矢通过一个球面节点的三角片成为一个共面片集合.

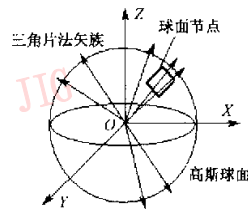


图 6 共面片集合的建立

因此,对所有三角片进行一次遍历后,就可以确定共面片集合.该算法较基于代表树 (Representative Tree) 算法^[5,6]在时间复杂度上有较大提高.具体算法如下:

设三角片 i 的单位法矢为 (x, y, z) ,则首先根据法向三分量的大小判断三角片的法向所在球面节点的编码 d_1 的值,即确定法矢在立方体的哪一表面,判断准则如下:

- if $(|x| > |y|)$ and $(|x| > |z|)$ and $x > 0$; then $d_1 = 0$
- if $(|x| > |y|)$ and $(|x| > |z|)$ and $x < 0$; then $d_1 = 1$
- if $(|y| > |x|)$ and $(|y| > |z|)$ and $y > 0$; then $d_1 = 2$
- if $(|y| > |x|)$ and $(|y| > |z|)$ and $y < 0$; then $d_1 = 3$
- if $(|z| > |x|)$ and $(|z| > |y|)$ and $z > 0$; then $d_1 = 4$
- if $(|z| > |x|)$ and $(|z| > |y|)$ and $z < 0$; then $d_1 = 5$

确定三角片 i 在 d_1 面内后,由法矢对应的高斯球面上的点在坐标轴上的投影确定 d_2, d_3 .

使用表来存储属于某一球面节点编码的所有三

角片,遍历所有的三角片,这样便将所有的面片归类到了所属的高斯球面节点中.

2.3 搜索超面边界

建立共面片集合后,对每个集合内的三角片的边界进行提取,以获得超面的内外边界.属于某一个高斯球面节点的所有三角片可能连通,也可能不连通,即在某一节点上可能存在多个分离的超面,所以首先要将不同的超面分离出来,然后提取超面的边界.

该过程主要分为两步:第 1 步分离出超面;第 2 步提取超面的边界,并建立拓扑关系.

(1) 超面分离算法

采用种子生长算法.从三角片集中的任何一个三角片开始,作为种子,搜索与它相连通的所有三角片,并作为新的种子.继续搜索与新种子连通的所有三角片,循环迭代直至三角片集中没有任何三角片与任何种子三角片相连通.此时所有的种子三角片从原集合中分离出,成为一个超面.用一个动态数组存放种子三角片,在算法执行过程中,数组的大小会动态增加,而三角片集合的大小会动态减少.算法实现如下:

```

对某一个高斯球面节点上的所有三角片集合 S:
BEGIN
初始化种子数组,清空;取三角片集合中一个三角片作为种子加入数组,并从集合中删除该三角片;
FOR i=0 to N(种子数组大小) do
  FOR j=0 to M(三角片集合大小) do
    IF 三角片 Si 与 Sj(S 中的第 j 个三角片)相邻;
      三角片 Sj 作为新种子,加入种子数组尾部,并从三角片集合中删除该点;
      j=j-1;M=M-1;N=N+1
    END IF
  END FOR
END FOR
动态数组中的三角片即为分离出来的超面
END

```

在三角片集合中,选择一个新的种子,重复以上算法,进行下一个超面的分离,直至三角片集合为空.此时所有超面被分离开来.

(2) 超面边界提取算法

超面的边界有内边界和外边界之分.采用给三角片的边赋予权值的方法,可以在算法中对超面内外边界不加区分地统一处理.算法的基本思想是:遍历某个超面所包含的全部三角片,读取每个三角片的 3 条边,并给每条边赋初始权值 1;对两个相邻的三角片,合并公共拥有的边,将该边的权值修改为两边权值的和;遍历过程完成后,超面内部三角片的边的权值为 2,而位于超面边界上的三角片其中有一条边仅属于该三角片,因此该边的权为 1;提取出所有权为 1 的边,并建立拓扑关系;对某一个超面所包含的全部三角片进行以下过程:

```

BEGIN
FOR 所有三角片 do 三条边的权赋值为 1
FOR 所有三角片 do
  IF 有相邻边 then 边的权值 + 2
END FOR
FOR 所有三角片 do
  IF 边的权值 = 1
    在超面边界数据结构中记录该边,处理超面边界数据结构,建立正确的超面边界
  END IF
END FOR
END

```

3 算法示例

利用上述算法就可以在三角曲面上确定初始特征线,为下一步重构曲面区域划分提供判断依据.图 7 为利用该算法对一三角曲面模型进行的初始特征计算结果,从图 7(b)中可以看出,初始特征线基本反映了该处曲面的结构特征情况.

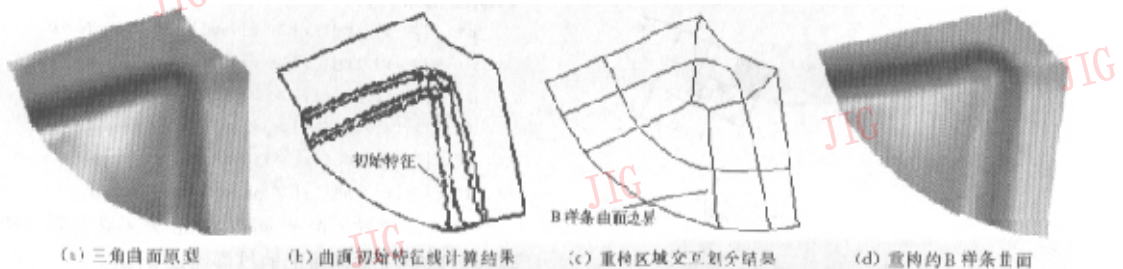


图 7 本文算法对一三角曲面模型进行初始特征线计算的结果

在很多情况下,由于曲面形状较复杂,通过上述方法计算出的特征线可能会较凌乱,因此需要通过编辑、修改等手段进行处理,以得到清晰的特征线,利用这些特征线可以对进一步的交互划分提供判断依据。

4 结 论

在分析当前反求工程 CAD 建模现状以及通用 CAD/CAM 软件,在处理反求工程建模方面的特点和不足的基础上,引入图形图象处理中多分辨率模型的概念,实现了三角曲面模型上特征线的快速计算。依据特征线计算结果,在保持曲面特征的要求下,将三角曲面模型划分为若干四边形区域,进一步实现三角曲面模型的 B 样条曲面重构。

通过实例说明,利用多分辨率模型计算出的三角曲面特征线,完全能够反映模型自身的特征部分,能够为 B 样条曲面重构区域的划分提供可靠的依据。该算法已经在自主知识产权的反求工程软件 RE-SOFT V4.0 中实现。

参 考 文 献

- 1 李江雄. 复杂曲面反求工程 CAD 建模技术研究[D]. 杭州:浙江大学,1998.
- 2 柯映林. 离散数据几何造型技术及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1992.
- 3 陈志杨. 基于三角曲面原型的 B 样条曲面重构理论及其在反求工程中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- 4 卢秉恒等. RP 技术与快速模具制造[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998.

- 5 Alan D Kalvin, Russell H Taylor. Surfaces: Polyhedral approximation with bounded error [A]. In: Image capture, Formatting, and Display [C]. Newport Beach, California, SPIE, 1994.2164;2~13.
- 6 Charles Loop, Tony DeRose. Generalized B-spline surface of arbitrary topology[J]. Computer Graphics, 1990, 24(4):347~356.
- 7 Keil J M. Decomposing a polygon into simpler components[J]. SIAM J. Computer, 1975, 14(4):799~817.
- 8 Schmitt Barsky B, Du W H. An adaptive subdivision method for surface-fitting from sampled data [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4):179~188.
- 9 曹卫群. 保持几何特征的复杂景物多分辨率模型技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2000.



贾 明 1974 年生,现为浙江大学机械工程系博士研究生,主要研究领域为反求工程、计算机辅助几何设计等。



吕 震 1972 年生,现为浙江大学机械工程系博士研究生,主要研究领域为反求工程、计算机辅助几何设计等。



柯映林 1963 年生,浙江大学机械工程及自动化系生产工程研究所常务副所长,教授,博士生导师,主要研究领域为 RE/RP, 计算机辅助几何设计(CAGD), CAD/CAE/CAM 等,发表论文 90 多篇。

本刊特别征集 2001 年第 2 期启事

尊敬的各界读者、各位老师和同学:

如果您处现在有不用的过刊《中国图象图形学报》2001 年第 2 期,愿能赐赠我们,以便旧物新用,再利学子。本刊编辑部为装订过刊合订本,满足来函院校和研究单位存档与阅读之急需,恳请各界读者积极帮助征集。为表敬意,本刊将惠赠新的一年即 2003 年全年 12 期学报作为酬谢,请各界读者予以大力支持。

本刊编辑部启