

基于 CAD 模型的 3D 散乱数据点三角剖分方法

陈慧群, 陈少克

(汕头大学智能制造技术教育部重点实验室, 汕头 515063)

摘要: 提出了一种针对空间大规模散乱数据点三角剖分的方法。该方法基于可用的CAD模型, 采用“分而治之”的思想。对齐测量数据点与CAD模型、记录数据点及在CAD裁剪NURBS曲面实体上投影点。分别对每块实体的参数区域(u,v)相应点 2D-Delaunay三角化、根据 R^2 区域的连通结构反构造出 3D三角网。进行冗余三角形删除和网格片缝合等优化处理。与其他方法不同的是, 它不受测量数据的分布方式和物体曲面形状的拓扑结构限制。实际的算例结果表明, 该方法高效且可靠实用。

关键词: CAD 模型; 散乱数据点; 三角剖分; 裁剪 NURBS

Triangulation Method for 3D Scattered Data Points Based on CAD Models

CHEN Hui-qun, CHEN Shao-ke

(Key Laboratory of Intelligent Manufacture Technology of Ministry of Education, Shantou University, Shantou 515063)

【Abstract】 A new method of triangulation for large scale scattered 3D points is proposed. This method is based on the available CAD model, with the thought of DC (divide and conquer). Alignment between the data and the CAD model, registration which establishes correspondence between the data points and those on the CAD trimmed NURBS surface entities; 2D Delaunay triangulation, performed on the corresponding points in the parametric domains(u,v) of each entity, application of the connectivity structure to the 3D data points for each mesh patch; Elimination of redundant triangles of each 3D mesh patch and stitching of patches together. Unlike many other methods, it is not constrained by certain types of measurement distribution or object shape. The experimental results testify that the approach is feasible and efficient.

【Key words】 CAD model; scattered data points; triangulation; trimmed NURBS

1 概述

自 20 世纪 80 年代以来, 离散数据三角网格曲面逼近技术始终是CAGD领域的一个研究热点, 它主要包括离散数据的三角剖分和整体光滑曲面构造两部分^[1]。随着工程制造、航空航天、汽车和模具工业的发展以及激光快速成型技术的兴起, 基于实物样件的反求工程的应用越来越多。在工程制造中特别是在处理自由曲面成型类的零件如机翼、涡轮机组件、汽车面板等, 这些零件的一般CAD模型经常用NURBS (non-uniform rational B-Spline) 来定义^[2], 特别是用多张裁剪NURBS曲面拼接组成, 最终的零件模型可以通过测量出大量的数据点云来描绘、进行形状代替(点云密度越大越精确)。在对零件质量评估、有限元分析及快速成型研究时经常要进行点云三角剖分。

目前国内外学者针对 3D散乱数据三角剖分提出了多种有效的方法, 如文献[3]提出了一种基于曲面映射的三角剖分方法, 其思路是确定一个合适的实体曲面的微分同胚映射(diffeomorphic) R^2 区域, 使点数据一对一地投影到该区域, 在 R^2 区域进行投影点三角化, 再把 R^2 区域的网格的连通结构反映到 3D数据点云。Boissonant算法中 R^2 区域是个平面, 通过相邻的k个点拟合派生出该平面, 这k个点剖分完后, 网格再逐渐扩展到稍远k个点, 每一步迭代派生出来的三角剖分平面都被利用。这种方法的缺陷是对数据点云分布有一定的要求, 如每次相邻的点间最大距离必须比原曲面模型的最大曲率小、点集须等向性及点密度要高以确保没有点落在物体的

相反面等, 显然这使一些分布较乱或曲面形状拓扑结构较复杂的模型点云三角剖分受到了限制。

本文提出一种改进的Boissonant三角剖分算法, 采用一个基曲面作为 R^2 区域, 空间散乱数据点的投影点都落在该区域并在该区域进行二维三角剖分, 这个基曲面就取CAD模型的裁剪NURBS曲面, 算法过程如下:

- (1)进行测量数据点和 CAD 模型间对齐;
- (2)记录数据点及在 CAD 曲面实体上投影点(在 ICP 算法中也称最近点)的对应关系;
- (3)对每块实体的参数区域(u,v)相应点分别进行二维 Delaunay三角化。根据 R^2 区域的连通结构反构造出 3D 三角网;
- (4)网格合并处理及优化, 包括冗余三角形删除和网格片缝合。

本文提出的这种改进算法除适用于原 Boissonant 算法适用的一切点云外, 还适用于一些模型结构较复杂的空间点云。

2 对齐和记录

实体的 CAD 模型经常用平滑曲面来描绘, 即用多张相邻的 NURBS 裁剪曲面通过光滑拼接而成, 本文中这些裁剪曲面也是未裁剪 NURBS 基面的重叠面, 借助 IGES 标准的几何数据交换文件格式导入模型几何参数。

作者简介: 陈慧群(1982 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机辅助设计与制造, 反求工程; 陈少克, 副教授

收稿日期: 2006-08-21 **E-mail:** dyhe@stu.edu.cn

通常测量数据点和CAD模型由不同的坐标系统提供,有必要把两者对齐以保证微分同胚映射,本文采用的是基于改进的迭代最近邻点算法 (iterative closest point, ICP)^[4],该算法实质是通过奇异值分解找到一个旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使得下列目标函数 F 值最小:

$$F = \min \sum_{i=1}^N |Q_i - (RP_i - t)|^2$$

其中, P_i 是第 i 个测量数据点; Q_i 是名义曲面模型上最近的点; N 是测量数据点数目。

这是一个迭代最小化所有模型-零件距离的过程,获得合适的几何变换,使两物体对齐。

对每一个测量数据点,建立它在CAD模型上对应点的关系并记录在 R^2 区域分配给它的 (u,v) 参数地址,这个也可看作是所描述的ICP算法对齐程序的工作,本文给出它的代码样式如下:

```

for 每个测量数据点
  for 该测量数据点邻近区域的所有剪裁曲面实体
    找出未裁剪基面上的最近点;
    检验这个最近点以保证剪裁区域上该点的有效性;
    if 这个最近点在剪裁区域内
      该点是正确的对应点;
    if 这个最近点在剪裁区域外
      找出剪裁曲线边界上最近点;
      令该最近点为正确的对应点;
  比较该实体上相应点和邻近区域的其他实体上点间距离;
  定义该相应点为正确剪裁曲面实体上最短距离点;

```

3 三角剖分

在前面 (u,v) 地址记录的基础上,可以在 R^2 区域进行三角剖分以建立所需点的连通性结构。相对其他方法,二维Delaunay三角剖分能够较好地达到合理的三维三角网格,而且对后面的三维网格优化处理计算量较少。

本文采用“分而治之”(divide and conquer, DC)的方法分块对参数曲面的参数域进行Delaunay三角剖分,该方法具有可靠性和高效性,同时DC也包括了把区域迭代细分为几个几乎相等的子区域算法,生成每个子区域的连通信息,再把这些结果合并从而获得最后的三角剖分,此外,该方法也认可边组成网格的分界,这将在网格缝合中用到。从 (u,v) 域得到的连通性结构将直接应用在最初的三维点云 (x,y,z) 上,因为此时点的对应关系都已经确定。

4 三角网格优化

上述三角剖分方法对CAD模型的每个曲面块都生成了一个特定的网格片,还需执行以下操作:

- (1)剔除网格片边界的冗余三角形;
- (2)把网格片缝合起来构成一张连续的网格;
- (3)网格平滑处理以便最终获得Delaunay质量的三角形。

4.1 删除冗余三角形

冗余三角形是在凸域内严格执行三角剖分在网格片边界直接产生的结果。在凸域内将碰到两个问题:(1)生成的网格片边界在某处可能有某个凹度与相应的CAD模型块轮廓外形不一致,以致给后面网格片缝合过程造成困难;(2)在出现了折叠曲面的情况下,网格不能更好地匹配该区域的物体形状。为了使两个网格的边很好地相接,首先需要删除冗余三角形。图1(a)是未删除冗余三角形的网格,图1(b)是删除了冗余三角形后的效果。

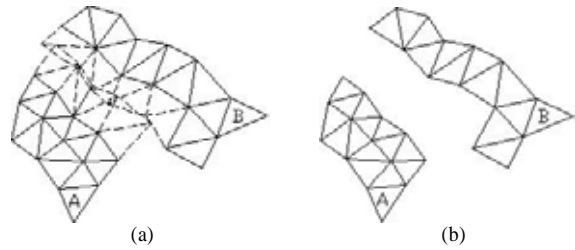


图1 删除冗余三角形

4.2 缝合三角网格片

网格缝合包括缝合线生成和缝合面生成两个步骤。

4.2.1 缝合线生成

缝合线是待合并网格的公共边界,它由前面提到的孤立顶点得到。缝合线的生成算法如下所述:首先计算孤立顶点两两之间的距离,将距离过近的顶点合并成一个顶点,如图2所示(图2(a)中小短线连接点表示过近的孤立顶点对),然后用最近点扩展法连接所有顶点得到一条单一的缝合线(图2(b))。

最近点扩展法初始时所有顶点都是未连接的。首先,找到距离最近的两个顶点,构造一条边将它们连接起来。然后再在剩余的未连接的顶点中找出离已连接顶点最近的顶点,如果离该顶点最近的已连接顶点是内部顶点,则删除它,否则连接它。重复进行上述操作,直到所有的顶点都被连接或删除为止,如图2(b)所示。这样便得到了一条单一的缝合线。

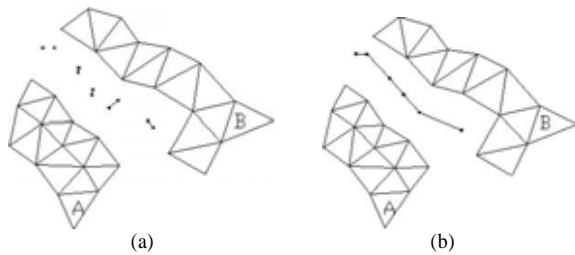


图2 合并过近的点对

4.2.2 缝合面生成

待合并网格的相交界面被删除之后,产生了一些新的边界边,将在这些新边界边和缝合线之间构造缝合面将两个网格缝合起来,如图3所示(虚线表示新边界)。

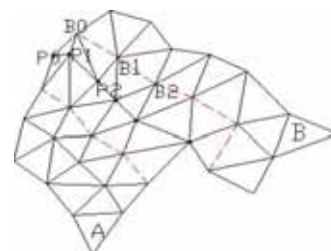


图3 构造缝合面

对于每个网格,都从其新边界的一端出发依次为每条新边界边构造缝合面。设缝合线上的顶点依次为 P_0, P_1 到 P_n ,网格的新边界的顶点依次为 B_0, B_1, \dots, B_m , P_{prev} 表示上条新边界边的最佳缝合点, P_{pres} 表示当前新边界边的最佳缝合点。则缝合面的构造算法描述如下:

```

置所有的缝合点为可用,  $P_{prev}=P_0$ ;
For  $i=0$  to  $m-1$ 
  在可用的缝合点中为新边界边 $B_i B_{i+1}$ 查找最佳缝合点 $P_{pres}$ ;

```

构造缝合三角形 $B_i P_{\text{pres}} B_{i+1}$;

if $P_{\text{prev}} = P_{\text{pres}}$

对 P_{prev} 和 P_{pres} 之间的每一条缝合边 $P_j P_{j+1}$ 构造缝合三角形

$P_j P_{j+1} B_i$;

end if

置 P_{pres} 之前的缝合点为不可用, $P_{\text{prev}} = P_{\text{pres}}$;

end for

5 实验结果

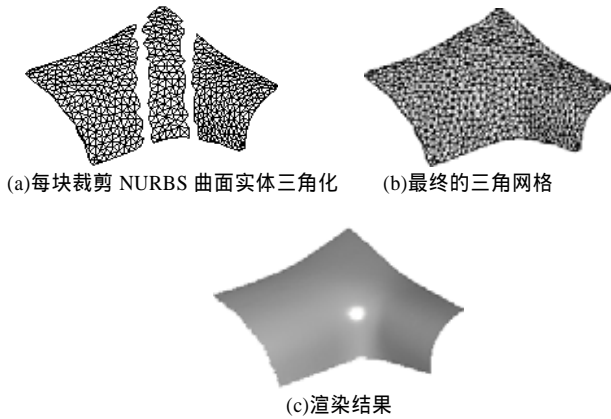


图4 双边曲面模型实例

图4为一个双边曲面模型的零件测量点采用本文算法编程实现三角剖分的结果。程序实现时采用了基于 Visual

C++语言及其可视化集成图形开发环境 OpenGL 图形库, 计算结果调用 OpenGL API 函数在屏幕上显示输出。

该 CAD 模型包含 3 张裁剪 NURBS 曲面块, 对 2 069 个测量数据点进行三角化操作。每曲面块模型三角剖分如图 3(a) 所示, 图 3(b)、图 3(c)分别显示了缝合和渲染结果。

6 结束语

本文提出了一种基于 CAD 模型的空间散乱数据三角剖分新算法, 采用裁剪的基曲面作为 R^2 区域, 对 Boissonant 方法进行了改进。该方法对零件质量评估、有限元分析及快速成型等应用可发挥重要的作用。同时为了适合在工程制造和反求工程中的广泛应用, 对网格的质量也提出了较好的优化方法。并已成功应用于笔者开发的 CAD/CAM 曲面重构及加工系统, 算法健壮性好、运算平稳、生成网格布局合理。

参考文献

- 1 孙玉文, 王晓明, 刘 健. 密集散乱数据的三角形网格曲面逼近方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(4): 281-285.
- 2 李 强, 王红梅. 实物反求工程中的模型重建技术[J]. 机械制造与研究, 2003, 17(4): 17-20.
- 3 Boissonant J D. Geometric Structures for Three-dimensional Shape Representation[J]. ACM Trans. on Graphics, 1984, 3(4): 266-286.
- 4 Audette M A, Ferrie F P. An Algorithm Overview of Surface Registration Techniques for Medical Imaging[J]. Medical Image Analysis, 2000, 4(3): 201-217.

(上接第 61 页)

(11) 延迟时间=服务开始时间-服务建立时间, 其中, 服务开始时间为 TS 线程获得请求的时间; 服务建立时间为 BROT 线程建立服务请求实例的时间。

实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

实验次数	用户优先级 =10 的服务请求延迟/ms	用户优先级 =20 的服务请求延迟/ms	用户优先级 =30 的服务请求延迟/ms	用户优先级 =40 的服务请求延迟/ms	超优先级服务请求延迟/ms
1	1 839	1 372	1 206	1 186	5
2	2 691	1 524	938	559	215
3	1 991	1 344	1 132	1 174	49
4	1 885	1 382	1 155	1 030	22
5	2 222	1 597	1 227	905	228
6	2 163	1 512	960	614	105
7	2 459	1 436	829	389	59
8	2 263	1 401	890	490	69
9	2 366	1 401	918	574	130
10	2 564	1 563	833	458	45
平均延迟	2 244.3	1 453.2	1 008.8	737.9	92.7

由表 1 可知, 用户等级越高, 所提出的服务请求的响应延迟越小, 该结果证明了模型能够根据用户的优先等级决定为其提供服务的次序, 高优先级别服务请求优先响应; 超优先级服务请求没有参与排序, 其服务延迟是由于 TS 线程、BROT 线程和一级堆 TSC 线程(共计 32 个线程)对于临界资源——待服务请求缓存的同步与互斥造成的, 而多线程的同步与互斥也会耗费一定时间, 因此, 超优先级服务请求的服务延迟不为 0。

7 结束语

先来先服务调度策略可以适用于绝大多数数据交换平台的服务请求调度工作, 但对于有特定需求的交换平台就显得力不从心。这时就需要面向特定需求的服务请求调度模型。本文针对这种需求, 提出了适用于多等级用户数据交换平台的服务请求排队管理模型, 探索多等级用户服务请求的调度、排序解决方案。在实验过程中发现, 服务请求的优先级设置对于其响应延迟有较大影响, 下一步笔者将对这种影响进行更为细致的研究。

动态优先级服务请求队列管理模型并未涉及安全问题, 而这又是应用过程中不可忽略的重要因素。因此, 未来的研究工作是在进一步改善模型效率的同时, 考虑验证服务请求自身的完整性、审查服务请求权限的合法性等安全问题, 并在 RDT 或 BROT 线程的工作范围内补充和完善相应功能。

参考文献

- 1 唐开山. 二次堆排序算法和提高排序效率的途径[J]. 计算机工程与应用, 1998, 36(5): 45-47.
- 2 吴尚智. 改进的堆排序算法及其复杂度分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2002, 38 (3): 24-26.
- 3 殷人昆, 陶永雷, 谢若阳, 等. 数据结构(用面向对象方法与 C++ 描述)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999-07.
- 4 结城浩. Java 多线程设计模式[M]. 博硕文化, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2005-04.
- 5 Java 2 JDK 1.4.2 Standard Edition[EB/OL]. (2006-04). <http://java.sun.com/j2se/1.4.2/download.html# docs>.
- 6 Sedgewick R. Algorithms in Java[M]. Addison-Wesley, 2003-03.