

可调自适应三角网格的细分曲面造型方法

赵付青, 艾 鑫

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了研究一种简单的有效的细分曲面方法使生成的曲面不仅光滑而且可调, 提出了一种面向三角网格的可调自适应细分曲面造型法, 该方法通过在传统的 Loop 细分模式中加入形状控制因子 λ 以使生成的曲面形状可调, 同时引入二面角作为控制误差来判断相邻三角形夹角是否满足给定的阈值, 以此实现自适应细分过程。模拟算例结果表明, 该方法不仅能用较少网格获得性能良好的曲面, 而且可以通过选取不同的 ε 值调整生成曲面形状, 满足工程需要。

关键词: 细分曲面; 曲面造型; 可调自适应细分; Loop 细分; 形状控制因子

中图分类号: TP311.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2011) 01-0232-04

Adjustable adaptive subdivision surface modeling based on triangle meshes

ZHAO Fu-qing, AI Xin

(School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To study a simple and effective method of subdivision surfaces so that the resulting surface is not only smooth but also adjustable. An adjustable adaptive subdivision method for triangle meshes is presented, by introducing shape control factor λ in loop subdivision scheme, the shape of geometry can be adjust in the process of subdivision. Furthermore, the threshold ε of neighbor dihedral angle is utilized as the control error for subdivision depth. An simulation example is presented that the method not only use fewer meshes to obtain the good performance surface, but also can adjust the shape of subdivision surface to satisfy the actual requirement.

Key words: subdivision surface; surface modeling; adjustable adaptive subdivision; loop subdivision; shape control factor

0 引言

细分方法在多分辨率分析、计算机动画、科学计算可视化、数值计算以及医学图像处理中都有广泛的应用, 目前已经有很多经典的细分模式, 包括 Catmull-clark 模式, Loop 模式, Doo-Sabin 模式等, 但是这些传统的细分模式都有两个明显的缺陷, 首先就是随着细分次数的增多, 网格的面片数将迅速增长, 同时细分后的曲面形状是固定的, 无法调节形状。由于传统的细分模式是均匀细分, 也就是说网格分裂方式是采用的均匀分裂, 那么随着细分次数的增加网格数量将呈指数级增长。为了解决这个问题, Amresh 和 Farin^[1] 等人最早提出了用二面角准则 Loop 曲面进行自适应细分的策略, 该方法以两个网格之间二面角作为控制误差, 力求以较少的曲面片来逼近曲面, 虽然该自适应细分方法能有效的减少曲面片的数量, 但是在初始网格确定的情况下, 细分后的曲面形状是确定的, 所以细分后的曲面有时候达不到我们的实际要求。任水利^[2] 等提出了一种基于四边形网格的可调细分曲面造型方法, 赵燕^[3] 提出了一种基于三角形网格的可调细分造型法, 以上方法虽然能使生成的曲面可调, 但不能有效的减少曲面片的数量。

文献[4]针对基于 Loop 型细分模式提出了一种基于区域

分割的自适应 Loop 细分算法, 该算法主要是通过分析离散点曲率, 划分控制网格为相连的多个区域, 并对划分后的各个区域进行局部细分, 以达到整体优化的效果。文献[5]充分利用均匀的 Catmull-Clark 细分和可控调 Catmull-Clark 细分规则的优点, 提出了一种新型自适应细分方法, 该方法通过分析曲面上点的曲率来控制细分, 可以有效的降低网格的数量。文献[6]提出了一种 Loop 型半静态细分方法, 该方法通过对扩展的四次三方向 Box 样条曲面离散定义的研究, 导出了半静态 Loop 细分方法。与传统 Loop 细分方法相比, 该方法有更好的灵活性, 文献[7]提出了一种基于 Loop 细分曲面的自适应等距面生成算法, 该方法通过求解方程组求出等距后的网格, 然后对等距误差进行检测, 对那些部分超过给定精度的控制网格进行局部自适应细分。文献[8]对自适应细分及其需要解决的关键技术作了详细的探讨, 对已有的自适应细分技术进行了比较归类。文献[9]提出了一种 Loop 细分模型的边界拼接算法, 该算法解决了细分曲面之间的光滑拼接问题, 并且使得两个细分模型在具有相同细分格式条件下的极限曲面可在拼接处达到 C^2 连续, 而在边界的奇异点处达到 C^1 连续。文献[10]提出了一种适用于三角形和四边形网格相混合的网格自适应细分算法, 该自适应细分算法通过相邻三角形面法向量的夹角来控制, 在拓扑分

收稿日期: 2010-01-02; 修订日期: 2010-03-03。

基金项目: 兰州理工大学博士启动基金项目 (0612)。

作者简介: 赵付青 (1977 -), 男, 甘肃酒泉人, 博士, 副教授, 研究方向为计算机图形学、计算机图像与视频处理、机器智能基础理论与方法; 艾鑫 (1984 -), 男, 河北唐山人, 硕士, 研究方向为计算机图形学。E-mail: zhaofq@mail2.lut.cn

裂时将自适应细分与混合细分有效结合起来控制网格的增长。

本文提出了一种以 Loop 细分模式为背景的细分曲面算法,通过在 Loop 细分模式中加入形状控制因子构造新的细分规则对初始网格进行自适应细分,该算法不仅可以生成 C¹ 连续的细分曲面,而且可通过调整参数方便地对细分曲面进行形状控制。

1 传统 Loop 细分模式

Loop 细分算法是美国犹他大学的 Charles Loop 于 1987 年在其硕士论文中提出的一种逼近型三角形面分裂细分算法。它是基于 Box 样条的一种策略,应用于规则网格时可以产生 C² 连续的曲面 Loop 细分模式是一种面分裂细分模式,他是基于三角网格的,不适用其他类型的网格。Loop 细分模式是 Charles Loop 提出来的,他对盒式样条(box spline)曲面进行推广得到现在的 Loop 细分模式。通常情况下,我们对一个模型进行细分可大致分为两步:分裂过程和平均过程。在分裂过程所用的方法称之为网格拓扑规则,在平均阶段所用的方法称为几何规则。这里所说的拓扑规则,其实就是在三角形的每条边上插入点,并将其两两相连,这样一个三角形就分裂成 4 个小三角形,也就是 4 倍分裂,因此,细分一次后,三角形的个数将是原来的 4 倍。那么可想而知随着细分深度增加网格数增长速度很快,几何规则是在下一层细分中计算网格上所有顶点所处的位置,一般这一过程所起的作用就是光滑。而对于在控制网格上的顶点,随着细分的深入,顶点的位置在不断地更新,最后它收敛于一个极限光滑曲面。对于每个细分前的点,计算其分裂后的新坐标、细分后所在的新的边核心的面,对于每条细分前的边,细分后分裂成两条新的边和一个新的顶点,计算新边的起点和终点及其所在的面,计算每条边上细分后新产生的点的坐标及其所在的边和面。然后连接每一新顶点与周围的新边点,连接每一新边点与相邻边的新边点。

2 可控 Loop 细分规则

细分方法是产生几何点和建立拓扑结构的过程^[7]。传统的 Loop 方法由于采用固定细分模式,用户无法对极限曲面进行有效的形状控制。为使生成的曲面形状可调,在 Loop 细分模式基础上,加入形状控制因子 λ,只生成新边点(E-顶点)和新顶点(V-顶点)。如图 1 所示,新生成的点计算如下:

(1) 新边点(E-顶点): 设三角网格内部边的两个顶点为(v₀, v₁),共享此边的两个三角形面为(v₀, v₁, v₂)和(v₀, v₁, v₃),则根据图 1(a)权值面具计算 E 顶点为

$$v_e = (v_0 + v_1) / 2 + \lambda (v_2 + v_3) / 2 \quad (1)$$

(2) 顶点(v-顶点): 若内部顶点 v 的边邻点为 v₀, v₁, ..., v_{n-1}, 其中 n = |v|_E 图 1(b)为其权值面具,则计算 V-顶点为

$$v_v = (1 - n\alpha_n)v + \alpha_n \sum_{i=0}^{n-1} v_i \quad (2)$$

其中

$$\alpha_n = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{2(\lambda+1)} - \left(\frac{\lambda}{2(\lambda+1)} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 \right) \quad (3)$$

可见,当 λ=1/3 时是著名的 Loop 细分。

(3) 边界边(v₀, v₁)上的 E-顶点,图 1(c)为其权面具,有

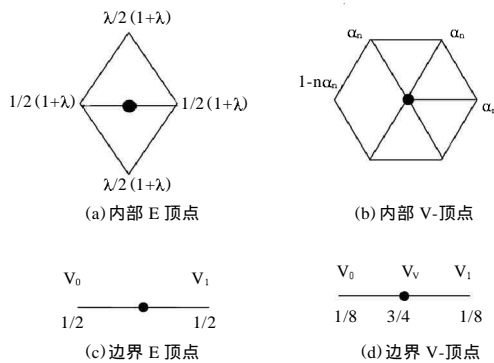
$$v_e = (v_0 + v_1) / 2 \quad (4)$$


图 1 生成各种新点的面具

(4) 边界顶点 v_v 在边界上的两个相邻顶点为 v₀, v₁, 图 1(d) 为其权面具,则 v_v 的 V-顶点为

$$v_v = (v_0 + v_1) / 8 + 3v_v / 4 \quad (5)$$

连接每条边上的新边点与该边上的两个新顶点,连接每条边的新边点。这样,每个三角形就分裂成了 4 个三角形,如图 2 所示。

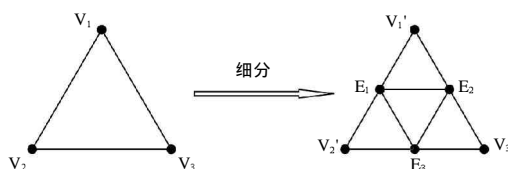


图 2 在一个三角片上的 Loop 细分过程

3 可调自适应三角网格细分算法

3.1 引入二面角计算方法自适应细分规则

我们提出的自适应细分方法就是用可控的 Loop 细分规则对初始网格进行细分采用二面角来控制细分深度,这样不仅能获得可以调节形状的理想光滑曲面,又可用相对较少的面片来逼近曲面。具体计算过程如下:

- (1) 遍历所有曲面片,计算每一个面的法向量;
- (2) 对于每个三角形面片,计算每一个三角形的相邻面的法向量的夹角;设网格面 f 的 3 个边相邻面依次为 f₀, f₁, f₂, f 的外法向为 n_f, f 的外法向为 n_i,如图 3 所示,定义如下

$$\epsilon_A(f) = \max \{ \arccos(\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{n}_i) \} \quad (6)$$

(3) 如果以上计算的二面角 ε_A(f) 满足式子 ε_A(f) < ε, 则将此三角形标记为死面,否则标记为活面。

3.2 可调自适应算法步骤

在这里使用二面角 ε_A(f) 作为控制误差来判断相邻的三角形

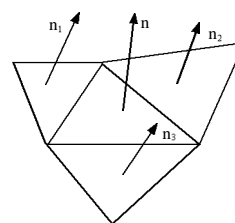


图 3 二面角

间的夹角是否满足给定的阈值 ε ,如果满足则不用继续细分;否则继续用可调 Loop 细分规则进行细分,自适应细分过程如下:

步骤 1:遍历整个的三角形网格,然后计算所有曲面片的单位法向量 n_i 。

步骤 2:遍历所有曲面片,根据式(6)计算各个曲面片相连面片间法向量的二面角 $\varepsilon_A(f)$,如果计算的二面角 $\varepsilon_A(f)$ 满足给定的阈值 ε ,则将此面标记为死面,从而不再进行下一层细分。如果不满足 $\varepsilon_A(f) < \varepsilon$,则标记为活面。对其进行下次细分。

步骤 3:产生新点。对于死面,不在其上面插入新点。对于活面,新点的插入方式及计算其位置采用的面具与可调 Loop 细分规则一样。

步骤 4:对于新产生的面继续应用二面角作为度量准则,重新计算每个网格法向从而计算二面角,直到整个控制网格均满足阈值要求。

步骤 5:重复 1-4 步骤,直至满足算法要求。图 4 为其算法流程。

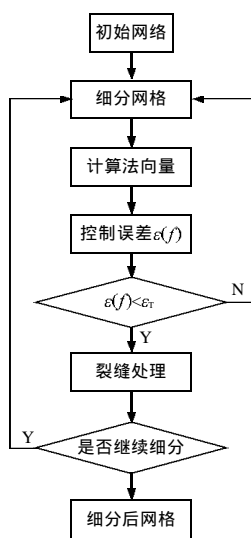


图 4 算法流程

3.3 可调自适应三角网格细分方法性质

由以上步骤就可以生成最终的极限曲面 P 。归纳起来,自适应细分曲面有以下几个优点:

(1)可调自适应细分方法加入形状控制因子,增加了曲面造型的灵活性,丰富了曲面造型的种类。

(2)可调自适应细分的一种特殊形式是自适应 Loop 细分,通过适当选取可调控制因子的值,可以得到自适应 Loop 细分方法。生成的曲面不仅光滑而且用了较少的曲面片。

(3)一般情况下,极限曲面除奇异点外,均能达到 C^2 连续,通过对可调控制因子在一定范围内取不同的值,可产生变形效果。

4 算法分析和实验结果

我们在 Visual C++2003 中实现了本文的所有方法。图 5(a)为通过 Amresh 自适应方法细分后的效果图,网格数为 425 片;图 5(b)为可调自适应细分后的网格,其中阈值为 $\lambda=1/2$,网格数为 382 片,可以看到网格数量明显减少;图 5(c)是以阈值为 $\lambda=5/8$ 的可调自适应细分后的网格,图 5(d)是以阈值为 $\lambda=3/4$ 的可调

自适应细分后的网格,表 1 为形状控制因子 λ 取不同的值得到的实验结果数据对比图,表 1 可以看出,Amresh 自适应细分方法在细分初始网格三次后得到 425 网格数,而可调自适应细分在形状控制因子 $\lambda=1/2$ 和 $\lambda=5/8$ 时得到的网格数为 382,相对 Amresh 自适应细分网格数量下降 10.1%,应该说细分后网格数量有明显的减少,并且随着 λ 取值的不同,细分的最终结果的形状也发生了变化。综上,可调自适应细分不仅可以减少面片数量,而且通过选取不同的 λ 值,可以使飞船的形状发生了变化。

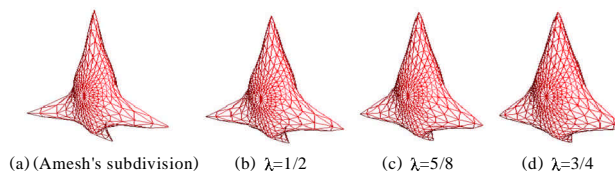


图 5 实验结果

表 1 飞船模型可调自适应细分与 Amesh's 自适细分对照

	Amesh 细分	可调自适应细分 ($\lambda=1/2$)	可调自适应细分 ($\lambda=5/8$)
三次迭代后网格数	425	382	382
网格下降率/%		10.1	10.1
是否可调	不可调	形状发生变化	形状发生变化

可调自适应细分和传统的 Amresh 方法一样,具有明显的时间效率和空间效率。但 Amresh 自适应细分方法并不能使生成曲面可调,如果用常规 Loop 细分方法进行细分,网格的数量随着细分次数的增加呈指数级增长,网格的数量会非常庞大,这就造成时间和空间上大量耗费。而自适应细分算法利用二面角来控制细分深度,如果某些网格小于给定的阈值,那么它就不再继续进行细分,而是只针对那些并未满足阈值条件的网格进行细分,那么随着细分次数的增加,将有效的减少曲面片的数量,从而极大提高运算速度并且有效降低存储空间增长率。

图 6 是用可调自适应细分初始兔子模型的实验结果,图 6(a)为 Amresh 自适应细分方法细分初始网格一次的结果,用 3D explorer 软件统计其面片数为 200,顶点数为 102,图 6(b)为用可调自适应细分细分两次的结果,其面片数为 634,顶点数为 501,并且我们取 $\lambda=1/2$,发现兔子的耳朵和嘴发生的变化,图 6(c)为用可调自适应细分 3 次的结果,其面片数为 2100,顶点数为 1800,在这里我们取 $\lambda=5/8$,发现兔子的耳朵和嘴的形状不仅发生了变化,而且有效果的减少了曲面片的数量,通过实验结果可以看到,兔子的胸和脸部比较平坦的地方只用了非常少的曲面片,而兔子的耳朵和鼻子那些不太平坦的地方用了比较多的曲面片来进行逼近。表 2 为具体数据,从实验数据可以看出兔

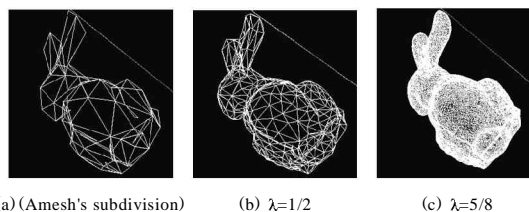


图 6 实验结果

表2 兔子模型可调自适应细分与 Amesh's 自适应对照

	一次 Amesh 细分	两次可调自适应 细分($\lambda=1/2$)	可调自适应细分 ($\lambda=5/8$)
迭代后网格数	200	634	2100
网格下降率/%		12.3	13.5
是否可调	不可调	形状发生变化	形状发生变化

子模型在被细分三次之后的模型不仅用了较少的曲面片,而且从结果上来看非常的逼真。实验结果表明,该自适应细分方法能有效的减少面片数量,在降低网格复杂性方面是非常有效的。

通过实验结果可以看出,可调自适应细分具有很丰富的表现能力,它能够通过改变可调控制因子的值构造出不同的变形效果。文中细分算法最大的优点就是网格几何操作简单,网格数据量增长相对较少同时能调节曲面形状,因此更适合应用于工程领域。

5 结束语

本文提出的一种可调自适应细分算法是基于在传统 Loop 细分方法的基础上引入形状控制因子 λ ,构造了一种新的细分模式,同时将新的细分模式应用到自适应细分方法当中,文中理论大致分析了利用上述方法的效率问题,同时,还通过实例验证了此方法的可行性,并与试验结果比较,给出实验数据,分析了可调自适应细分相对传统自适应细分的优势,可调自适应细分不仅有很好的网格下降率,而且可以使网格可调,满

足实际工程需要丰富了曲面造型的种类。

参考文献:

- [1] Amresh A, Farin G, Razdan A. Adaptive subdivision schemes for triangle meshes [Z]. Hierarchical and Geometric Methods in Scientific Visualisation, 2003:319-327.
- [2] 任水利. 基于四边形网格的可调细分曲面造型方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1119-1121.
- [3] 赵燕. C¹ 连续的可调细分曲面[D]. 西安: 西北工业大学硕士论文集, 2006.
- [4] 彭晓光. 基于区域分割的自适应 Loop 细分算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008, 18(2): 332-344.
- [5] 赵宏庆. 自适应细分方法进行曲面造型[J]. 计算机应用研究, 2006, 19(2): 73-79.
- [6] 赵向军. Loop 型半静态细分方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(7): 929-935.
- [7] 周海. Loop 细分曲面的自适应等距面生成算法与实现[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(6): 1016-1029.
- [8] 李桂清. 自适应细分技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(12): 1789-1797.
- [9] 韩越兴. Loop 细分模型的边界拼接算法[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(1): 12-16.
- [10] 王秀友. 基于网格优化的隐式曲面自适应多边形化[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 78-80.

(上接第 84 页)

5.3 ILBS 数据流缓冲器的特点

工程结构网格远程实验遥现模块采用并实现了基于索引-链表结构的数据流缓冲器 ILBS。它为海量实时数据的传输、缓存和处理提供了一个模块化的、健壮的、可扩展的解决方案,最终很好的支持了远程数据用户的在线观测。

ILBS 很好的适应了工程结构网格的需求:

(1) 采用基于面向对象的 Java 语言实现,具有跨平台的优良特性,并且具有良好的可扩展性和安全性;

(2) ILBS 服务器、数据接收者和数据提供者通过 Internet 互联构成一个支持实时数据访问和传输的 ILBS 网络,模块间使用更高效的 Hessian 协议传输遥现数据,具有较高的数据传输效率;许多模拟系统(如 Matlab, Labview 等)的 Socket 传输系统也可以在工程结构网格中使用,基于请求/应答的数据传输机制、持续的数据块传送方式、容错的传输方法,保证了海量数据实时传输的高效性与可靠性;

(3) 相比于传统的基于缓冲队列的数据缓冲结构,ILBS 的索引-链表结构保证了数据删除后,剩余数据移动的高效率。基于队列机制的缓存结构数据删除操作的时间复杂度为 $O(n)$,而链表结构数据删除的时间复杂度仅为 $O(1)$ 。

6 结束语

数据采集与遥现是工程结构网格的重要功能,本文首先介绍了工程结构网格的体系架构,并在其基础上提出了基于索引-链表结构的数据流存储器 ILBS。在对 ILBS 结构与实现

细节进行充分研究与论述后,对其优势与特点做了详细阐述,最终实现了网格遥现原型系统。下一步的工作主要对 ILBS 数据流服务器的数据发布与管理机制进行扩充与完善,实现对网格中设备、仿真程序的远程控制、协作、仿真/混合实验。

参考文献:

- [1] 许骏. 面向服务的网格计算—新型分布式计算体系与中间件[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] OGSA. Open grid service architecture [EB/OL]. <http://forge.gridforum.org/projects/ogsa-wg>, 2010.
- [3] Foste I, Kishimoto H, Savva A. The open grid service architecture, version 1.0. [EB/OL]. <http://www.gridforum.org/documents/GWD-1-E/GFD-1.030.pdf>, 2005.
- [4] 赵媛, 蒲兴彦. 基于 Web Service 的 OGSA 研究[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(6): 59-61.
- [5] 应宏, 王自全, 陈晓峰. 网格与 Web 服务的融合—OGSA 与 WSRF [J]. 重庆三峡学院学报, 2005, 21(3): 41-44.
- [6] Hessian [EB/OL]. Home page site: <http://hessian.caucho.com/>, 2010.
- [7] 龙浩, 梁毅, 邱瑞华, 等. 地震网格数据采集与遥现系统设计[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(2): 304-306.
- [8] Liang Yi, Di Rui-Hua, Long Hao, et al. grid-enabled distributed structural engineering experiment management [C]. ChinaGrid, 2008: 243-252.