

文章编号:1001-9081(2007)05-1119-02

基于四边形网格的可调细分曲面造型方法

任水利,张凯院,叶正麟,赵宏庆

(西北工业大学 应用数学系,陕西 西安 710072)

(renshuili@163.com)

摘要:提出了一种基于四边形网格的可调细分曲面造型方法。该方法不仅适合闭域拓扑结构,且对初始网格是开域的也能进行处理。细分算法中引入了可调参数,增加了曲面造型的灵活性。在给定初始数据的条件下,曲面造型时可以通过调节参数来控制极限曲面的形状。该方法可以生成 C^1 连续的细分曲面。试验表明该方法生成光滑曲面是有效的。

关键词:曲面造型;可调细分;细分曲面

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

An adjustable subdivision surface modeling based on quadrilateral meshes

REN Shui-li, Zhang Kai-yuan, YE Zheng-lin, ZHAO Hong-qing

(Department of Applied Mathematics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: This paper presented an adjustable subdivision surface scheme based on quadrilateral meshes. The scheme can deal with both open topological structures and close topological structures. The scheme can produce subdivision surface of C^1 continuity of limit surface. Because an adjustable parameter was introduced to the scheme, the surface modeling was flexible. Given the condition of the initial data, we can adjust and control the limit surface shape through selecting appropriate parameters. The method is effective in generating smooth surfaces.

Key words: surface modeling; adjustable subdivision scheme; subdivision surface

0 引言

曲面造型主要研究计算机图像系统的环境下曲面的表示、设计、显示和分析。它有着广阔的应用背景,是计算机辅助几何设计的重要研究内容,是 CAD/CAM 和计算机图形学的关键分支。而细分方法作为曲线曲面的离散造型方法,其处理过程简单,对数据的计算、生成和显示的速度快,因而得到了广泛的重视,并在几何造型中得到应用。1978 年, Catmull-Clark^[1] 和 Doo-Sabin^[2] 分别提出将 B 样条曲面推广到任意拓扑网格的细分算法,标志着细分方法正式成为曲面造型的一种手段。Ball A. A.^[3,4] 给出了 Catmull-Clark 细分曲面 C^1 连续的严格分析。Loop^[5] 在 1987 年提出了著名的适用于三角形网格的 Loop 细分模式,同时分析了这种细分模式的收敛性和连续性。Maillot^[6], J. Stam^[7], J. Warren^[8] 利用因子分解法 (factorization) 研究了混合网格的细分。J. Stam, J. Warren 的细分方法能够在四边形网格和三角形网格上分别产生 Catmull-Clark 细分和 Loop 细分,但当初始网格给定后,最终的物体造型也随之确定,不具有可调性。现有的细分方法不具有可调性,即在给定网格和细分算法的情况下,所得曲面是唯一确定的,这对实际应用来说是不方便的。

本文提出了基于四边形网格的可调曲面细分方法,引入控制参数,可通过调整参数方便地对细分曲面进行形状控制,可以根据需要生成不同的光滑曲面,使得曲面细分技术更加灵活,丰富了曲面造型种类。该方法可以生成 C^1 连续的细分曲面。通过实例分析,我们提出的细分曲面造型方法是有效的。

1 网格内部细分算法

细分方法有两个主要步骤:产生几何点与建立拓扑结构。本文对四边形网格采用类似于 Catmull-Clark 细分方法来产生几何点并建立拓扑结构。基于四边形网格的细分方法通过递归进行拓扑分裂,顶点几何计算,最终可以获得一张光滑的极限曲面。细分方法一般分为三步。为方便起见,本文采用算子概念来描述细分过程,即把作用在网格上的细分看作是算子运算。记 S, I, A, C 分别表示细分算子、拓扑分裂算子、几何平均算子、顶点位置修正算子。细分算子 S 可分解为拓扑分裂算子 I 、几何平均算子 A 、顶点位置修正算子 C 三个算子的复合,即 $S = CAI$,这种表示称之为因子分解。

1.1 拓扑分裂算子

设初始网格为 G , 拓扑分裂算子作用后的网格为 G_1 。四边形网格上的拓扑分裂算子 $I: G \mapsto G_1$ 的计算公式为:

$$\text{角点: } V'_i = V_i \tag{1}$$

$$\text{边点: } E'_i = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \tag{2}$$

$$\text{面点: } F'_i = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \tag{3}$$

即在四边形的每条边上插入中点,各面插入重心,各个顶点保持不变。如图 1 所示。

拓扑分裂之后,按如下方法建立网格拓扑结构:

连接每条边上的新边点与该边上的两个新顶点,连接该面的重心与各个边的新边点。这样每个四边形就分裂成了四

收稿日期:2006-11-23;修订日期:2007-01-25 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672135)

作者简介:任水利(1975-),男,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向:CAGD、数值代数; 张凯院(1957-),男,陕西西安人,教授,主要研究方向:数值代数、矩阵理论; 叶正麟(1943-),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要研究方向:CAGD、计算几何、图形与图像处理; 赵宏庆(1976-),男,辽宁辽阳人,博士研究生,主要研究方向:CAGD、逆向工程。

个小的四边形。

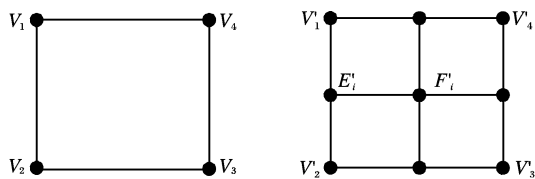


图1 拓扑分裂算子的作用

1.2 几何平均算子

设拓扑分裂之后的网格为 G_1 , 几何平均算子作用后的网格为 G_2 。对于网格 G_1 中的任意一个顶点 V , 设经过几何平均算子 A 作用变为 V' , 而以 V 为顶点的四边形个数记为 n_q , 四边形加权平均算子记为 q_i 。于是 $A: G_1 \mapsto G_2$ 的计算公式为:

$$q_i = (1 - 3\omega)V + \omega(V_{i1} + V_{i2}) + \omega V_i \quad (4)$$

$$V'_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_q} q_i}{n_q} \quad (5)$$

其中 ω 为新引入的可调参数。算子 q_i 中的 V_{i1}, V_{i2} 分别为环绕顶点 V 的第 i 个四边形上与 V 相邻的两个顶点, V_i 表示与 V 对角的顶点。几何平均算子作用时各个顶点所占比重如图 2 所示, 图中黑原点表示各顶点, 方块点表示权重心, 省略号表示相邻的其他网格。图 2(a) 表示式 q_i 的作用结果, 图 2(b) 表示算子 A 的最终作用结果。

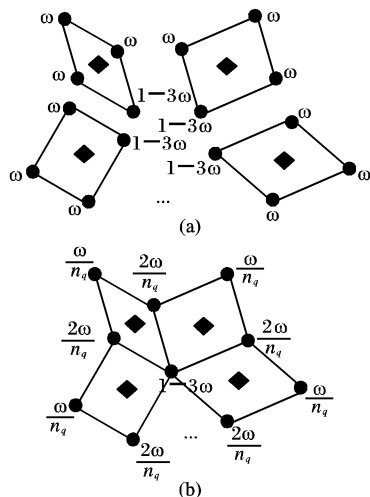


图2 几何平均算子的作用

1.3 顶点位置修正算子

设拓扑分裂算子作用之后的网格为 G_1 , 几何平均算子作用之后的网格为 G_2 , 顶点位置修正算子作用之后的网格为 G_3 , V_i, V'_i, V''_i 分别为 G_1, G_2 和 G_3 的第 i 个顶点。顶点位置修正算子 C 的计算公式为:

$$V''_i = V_i + \theta(V'_i - V_i) \quad (6)$$

其中 $\theta = \frac{4}{n_q}, n_q$ 为含有第 i 个顶点的四边形的个数。

2 开域拓扑结构边界细分算法

具有开域拓扑结构网格在实际应用中是经常遇到的, 如果对边界的处理采用和内部一样的方法, 就会出现收缩现象, 这是设计者所不希望的。因此, 对四边形网格的边界, 在细分时应作特殊处理。为此需要定义四边形网格边界的细分算子。

四边形网格边界细分算子 S 的定义如下:

(1) 拓扑分裂算子 I 与上面的拓扑分裂算子 I 相同, 此处的各顶点为边界点。

(2) 几何平均算子 A 按下面方法定义:

设 V 为网格 G_1 边界上的任意顶点, 其经平均算子作用之后为 V' , 则 $A: G_1 \mapsto G_2$ 的计算公式为:

$$V' = \begin{cases} V, & V \text{ 为角点} \\ \omega V_1 + (1 - 2\omega)V + \omega V_2, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中 V_1, V_2 是与 V 相连的边界点, $\omega \in R$ 为引入的控制参数。

(3) 顶点位置修正算子同(6)式, 且此处取 $\theta = 0$ 。

3 造型分析及算法实现

由于在平均算子中引入了参数 ω , 因而增加了细分曲面的可调性。当 $\omega = \frac{1}{4}$ 时, 该算法即为 Catmull-Clark 细分, 这说明 Catmull-Clark 细分仅为本文算法的特殊情形。当 ω 在实数域 R 取值时, 用户可以根据需要, 通过调整参数得到符合要求的曲面造型。

实现本算法的主要步骤如下:

步骤 1: 选取合适的参数 ω 值;

步骤 2: 将拓扑分裂算子作用于初始网格 G , 并建立相应的拓扑网格 G_1 ;

步骤 3: 将几何平均算子作用于网格 G_1 , 并建立相应的拓扑网格 G_2 ;

步骤 4: 利用顶点修正算子进行运算, 并建立新的拓扑网格 G_3 ;

步骤 5: 判断是否结束细分, 若是则进行下一步, 若不是则将 G_3 作为新的初始网格并转步骤 2 继续细分;

步骤 6: 结束细分过程, 绘出细分曲面。

4 算例

我们给出了基于本文算法的三个算例(图 3, 4, 5), 从造型的结果可以看出应用本文提出的算法能够生成光滑的曲面模型。图 3, 4 和图 5 分别给出了基于开域和闭域两种情况下, 通过取不同的参数值来进行曲面细分。

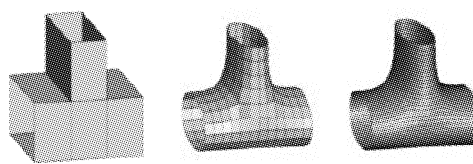


图3 开域四边形细分法——三通($\omega = \frac{1}{4}$)



图4 开域四边形细分法——飞机发动机吊仓($\omega = \frac{2}{3}$)

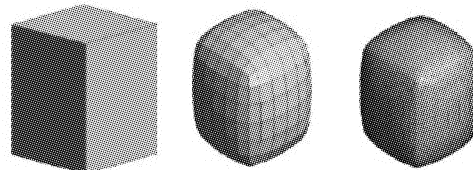


图5 闭域四边形细分法——六面体($\omega = \frac{1}{6}$)

5 结语

本文提出了一种新的基于四边形网格的可调细分曲面造型法, 算法中引入了控制参数, 增加了曲面造型的灵活性, 通

(下转第 1144 页)

4 实验及结论

这种模型设计及绘制方法已在 PC 机上实现。人面模型原始数据由 4 130 个顶点和 8 176 个三角形组成。图 5 是由 FC-SDM 生成的 6 个离散分辨率下的近似模型,可以看出简化后模型的特征处保留了相对多的点,特征区域得到了很好的保持,主体结构仍然很清晰。图 6 是无简化绘制和近似模型从近向远移动的比较结果,能够看出两者的视觉差异并不明显。

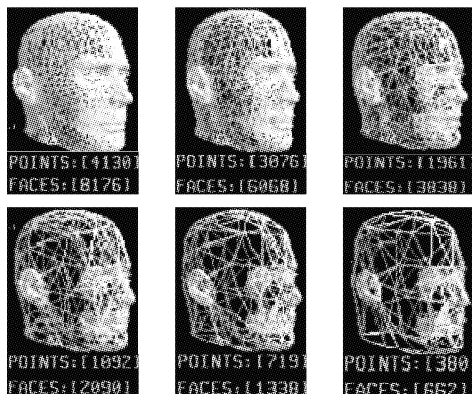


图 5 FC-SDM 生成的近似人面模型

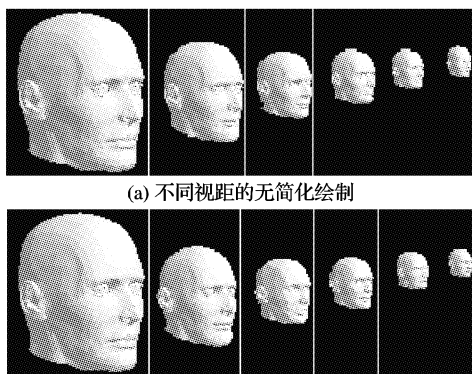


图 6 两种人面模型绘制方法的视觉效果比较

在时间方面,对比了基于特征点逼近的三维人面模型绘制方法,本文提出的绘制方法在时间效率上有一定优势,基本能够满足 3D 游戏、虚拟主持人等通常在 PC 机上的应用中绘制帧速要求。表 1 是实验对比数据,三种绘制方法在同一配置机器下不同视距三维人面模型的平均绘制帧速率的统计。PC 机的配置为 CPU P4 2.0GHz, GeForce FX 显卡,64MB 显存;人面模型三角面数为 8 176 个。

我们所设计的模型为三维中性人面个性化变形提供了较为简单、方便的结构框架。实验证明,基于此结构的特征约束的有序递减网格多分辨率绘制方法能够使模型在随视距变化的简化过程中很好地保留人面的拓扑结构和主体特征,对模型表面的视觉逼真度无明显影响,基本实现了一种以距离为驱动的、实时且连续的多分辨率绘制。进一步的研究工作包括研究同一场景中不同分辨率区域间如何保持网格的连续性而不出现裂缝等。

表 1 三种绘制方法的绘制帧速率

绘制方法	漫游帧数	预处理时间/绘制帧速/fps
无简化绘制	600	0 28.20
基于特征点逼近的绘制	600	3.10s 46.62
本文提出的绘制方法	600	3.93s 58.35

参考文献:

- [1] ANSARI AN, ABDEL - MOTTALIB M. 3 D Face Modeling Using Two Views and a Generic Face Model with Application to 3D Face Recognition [A]. IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS'03)[C]. 2003, 7(21 - 22): 37 - 44.
- [2] MIN K, CHUN J. A Realistic Human Face Modeling from Photographs by Use of Skin Color and Model Deformation[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, (3480): 1135 - 1148.
- [3] LIU YJ, YUEN MMF, XIONG S. A feature-based approach for individualized human head modeling[J]. Visual Computer, 2002, 18 (5 - 6): 368 - 381.
- [4] HILTON A, BERESFORD D. Whole-body modelling of people from multiview images to populate virtual worlds[J]. Visual Computer, 2000, 16(7): 411 - 436.
- [5] WATT A, POLICARPO F. 3D Games, Vol. 2: Animation and Advanced Real-Time Rendering[M]. Boston: Addison-Wesley Published, 2003.
- [6] 徐成华,王蕴红,谭铁牛. 三维人脸建模与应用[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 893 - 901.
- [7] ISO / IEC 14496-1-1999. Coding of audio-visual objects: systems, amendment 1[S].
- [8] REINHARD K. Multiresolution representations for surfaces meshes based on the vertex decimation method[J]. Computers and Graphics, 1998, 22(1): 13 - 26.
- [9] 高山,卢汉清,周万宁. 基于细节的自适应网格简化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(9): 1122 - 1127.
- [10] CLARENE U, GRIEBEL M, RUMPF M. Feature sensitive multi-scale editing on surfaces[J]. The Visual Computer, 2004, 20(5): 329 - 343.

(上接第 1120 页)

过调整参数值,可以控制极限曲面的形状,从而满足设计需要。该算法对开、闭拓扑网格结构都能进行处理,并能达到较好的造型效果,可以生成 C^1 连续的细分曲面。试验表明我们提出的细分方法是有效的。

参考文献:

- [1] CATMULL E, CLARK J. Recursively Generated B-Spline Surfaces On Arbitrary Topological Meshes[J]. Computer Aided Design, 1978, 10(6): 350 - 355.
- [2] DOO D, SABIN MA. Behaviour of Recursive Subdivision Surfaces Near Extraordinary Points[J]. Computer Aided Design, 1978, 10 (6): 356 - 360.
- [3] BALL AA, STORRY DJT. A matrix approach to the analysis of re-

cursively generated B-spline surfaces[J]. Computer Aided Design, 1986, 18(8): 437 - 442.

- [4] BALL AA, STORRY DJT. Conditions for tangent plane continuity over recursively generated B-spline surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 1988, 7(2): 83 - 102.
- [5] LOOP C. Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles[D]. University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [6] MAILLOT J, STAM J. A Unified Subdivision Scheme for Polygonal Modeling[J]. Computer Graphics Forum, 2001, 20(3): 471 - 479.
- [7] STAM J, LOOP C. Quad/triangle subdivision[J]. Computer Graphics Forum, 2003, 22(1): 79 - 85.
- [8] WARREN J, SCHAEFER S. A Factored Approach to Subdivision Surfaces[J]. Computer Graphics & Applications, 2004, 24(3).