

四面体网格散列可视化测试方法研究

关文革, 陆 琰, 武 若

GUAN Wen-ge, LU Yan, WU Ruo

石家庄经济学院 信息工程学院, 石家庄 050031

College of Information Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China

E-mail: gwg_007@sina.com

GUAN Wen-ge, LU Yan, WU Ruo. Study on tetrahedral mesh measuring with dispersing visualization method. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(11): 161-163.

Abstract: Automatic 3-D mesh generation technology has been applied very widely in finite element analysis, visualization in scientific computing and GIS. It has always been a research focus of scholars. Numerous mesh generation technologies can't avoid error of mesh. Because of heavy workload and not visualization, misjudge or undetected problem are always caused in mesh testing which is based on sampling spatial data. The tetrahedral mesh measuring with dispersing visualization method is presented. Using local transformation, 3-D Mesh have been displayed dispersedly, details of mesh is showed clearly. The mesh measuring is more intuitive and convenient, and the accuracy of the test is also enhanced.

Key words: tetrahedral mesh; dispersion visualization; mesh measuring; local transformation

摘 要: 三维网格生成技术在有限元分析、科学计算可视化和地理信息系统等领域的应用极为广泛, 一直是学者们研究的热点问题。众多网格生成技术都无法避免所生成的网格出现错误。现有的网格测试方法多基于空间抽样数据, 工作量大且缺乏直观性, 容易出现误测和漏测。提出的四面体网格散列可视化测试方法, 通过局部变换将三维网格散列显示出来, 清晰地呈现出网格的细节, 网格测试变得更直观便捷, 测试的准确性得到了提高。

关键词: 四面体网格; 散列可视化; 网格测试; 局部变换

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.11.049 **文章编号:** 1002-8331(2010)11-0161-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP311.11

三维网格剖分生成大量的网格, 包括三角网格和四面体网格等, 网格经常会出现各种错误和质量问题, 严重影响网格质量。剖分网格数量巨大, 对其进行测试的难度较大, 现在尚没有效果较好的网格测试方法。基于抽样数据的测试方法不够直观, 效率低下, 且手工构造测试数据时可能出现偏差和错误, 使得有问题的网格无法准确定位, 网格无法得到修正和优化。提出了一种四面体网格散列可视化测试方法, 原本紧邻的四面体网格被散列展示出来, 帮助网格测试人员快速定位有问题的网格, 结合基于抽样数据的网格测试, 可以在很大程度上提高测试的准确性, 有效减少数据误差和漏测。

1 方法分析

三维模型由剖分生成的三维网格表示, 正确的网格彼此紧邻, 无交叉、重叠及包含现象, 某一单元顶点不在另一单元边界上。质量良好的剖分网格单元其外观比例接近^[2], 即网格单元接近正多面体。提出的测试方法的基本思想是在四面体网格单元之间产生间隙, 间隙大小可按测试人员的需要进行调节; 通过平移、旋转、缩放等操作可从不同角度观察网格; 并可有针对性

地对模型局部进行散列, 以缩小测试范围。通过对散列的四面体网格进行观察, 可快速发现有错误或有质量问题的网格。

实现四面体网格散列可采用以下几种方法:

(1) 修改顶点坐标平移四面体

通过修改四面体顶点坐标, 可使各个四面体由于相对位移而产生间隙, 这是最为直观的方法。但是, 由于四面体网格数量巨大, 又存在四面体间相对位置、角度、相邻关系等因素, 针对每个四面体都需重复进行修改顶点坐标, 计算位移量以及位移角度的操作, 计算时间的消耗是极大的, 会严重降低可视化执行效率, 影响可视化效果。

修改顶点坐标、平移四面体实现网格散列可视化的算法执行时间 T_1 的计算如下:

$$T_1 = n \times t_1 + n \times 4t_2 \quad (1)$$

其中 t_1 为计算四面体位移量消耗的执行时间, t_2 为计算并修改一个顶点坐标消耗的时间。

(2) 修改顶点坐标缩小四面体

通过修改四面体顶点坐标, 令四面体向其中心收缩一定比例, 可使得四面体间产生一定间隙, 网格便可散列开来。此方法

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(No.09213505D)。

作者简介: 关文革(1966-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 三维可视化; 陆琰(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 三维可视化; 武若(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 三维可视化。

收稿日期: 2009-10-19 修回日期: 2009-12-21

无须考虑四面体间的空间关系因素,无须对每个四面体的位移量和位移角度进行计算,但四面体顶点坐标的计算和修改要消耗大量的执行时间,执行效率依然不高,可视化效果不好。

修改顶点坐标缩小四面体实现网格散列可视化的算法执行时间 T_2 的计算如下:

$$T_2 = n \times t_3 + n \times 4t_2 \quad (t_3 < t_2) \quad (2)$$

其中 t_3 为计算四面体中心点消耗的时间,显然 $T_2 < T_1$ 。

(3)局部变换缩小四面体

在三维图形学中,三维模型的缩放可以通过模型变换来实现,结合局部坐标系的概念^[3],可有针对性地缩小某个四面体。采用这样的方法,可将每个四面体缩小一定比例,进而将整体的三维模型网格散列开来。此方法无须修改顶点坐标,无须考虑四面体间的空间关系,仅需对四面体中心点进行计算,开销小,执行效率高。同时,通过改变缩小比例,可灵活调整四面体间隙,从而可更加清晰地展示四面体网格结构。

局部变换缩小四面体实现网格散列可视化的算法执行时间 T_3 的计算如下:

$$T_3 = n \times t_3 \quad (3)$$

综上,对比公式(1)(2)(3),显然有 $T_3 < T_2 < T_1$ 。采用局部变换缩小四面体实现网格散列可视化的算法执行时间小于前两种方法,执行效率高,因此选择该方法。

2 局部变换算法

2.1 算法思想

在绘制三维模型整体时,四面体网格全体处于同一个全局坐标系中,可对模型整体进行平移、旋转、缩放等变换。同时,针对某个四面体,可设置局部坐标系,在该坐标系上执行缩小变换,可缩小该四面体。对每个四面体执行同样操作可使四面体均缩小,网格便可散列开来。

2.2 关键技术描述

四面体网格散列可视化测试方法的关键技术是四面体中心的计算以及模型变换。

2.2.1 四面体中心计算

为四面体网格单元设置局部坐标系,关键是要找到该四面体中心,用该中心点作为局部坐标系原点,然后执行缩小变换,以令四面体向中心收缩。

(1)中心点选取标准

作为四面体缩小的对称中心,中心位置会影响散列后四面体间的相对位置,进而影响散列的效果,因此:该点应在所属四面体内部,并保证四面体收缩均匀。若该中心处于四面体外部,缩小变换后,四面体位置会发生偏移,将改变四面体空间关系;同时,中心点的空间位置影响四面体各侧面、棱和顶点向中心的收缩量,直接影响散列四面体间隙的均匀程度。另外,散列可视化的主要开销来自于中心点的计算,因而中心的计算应该尽量简单,以减小算法复杂度和总体计算开销。

(2)几类中心

四面体中心种类有很多,有外心、内心、旁心、垂心、重心等^[4]。

外心(外接球球心)和内心(内切球球心)的计算步骤均包含多元方程组的求解,旁心涉及多个侧面三角形旁心的计算,计算这几类点的算法实现较复杂,计算量大,会大大增加整体的执行开销,影响可视化效果,另外,并不是所有四面体都有垂心^[4],对于四面体网格单元不具有通用性,因此不选用以上几类

点作为四面体收缩的对称中心。

(3)四面体重心

由四面体重心的定义^[4],设 P 为四面体 $A_1A_2A_3A_4$ 一侧面 $\triangle A_1A_2A_3$ 的重心,四面体顶点 A_4 与侧面 $\triangle A_1A_2A_3$ 相对,则重心 O 为线段 PA_4 上一点,显然重心 O 在四面体内部。

设三维空间中任意四面体 $A_1A_2A_3A_4$, 其顶点坐标为 $A_i = (x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, 3, 4)$, 四面体重心 $O: (x_o, y_o, z_o)$ 的计算可简化为计算各项点算术平均,计算较简便:

$$(x_o, y_o, z_o) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (x_i, y_i, z_i) \quad (4)$$

如图1所示散列可视化效果图可以看到,选择重心作为收缩的对称中心对四面体进行缩小变换以实现网格散列,四面体间隙较均匀,网格结构清晰,可视化效果较好。

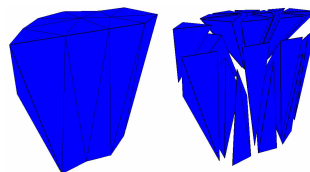


图1 散列可视化效果图

综上,四面体重心在四面体内部,可保证四面体向内收缩而不发生位置上的偏移,散列可视化后不会出现四面体相交、重叠或四面体空间位置关系改变等错误,散列的四面体群间隙均匀,可清晰展现原有的网格空间关系及结构,可视化效果较好,保证网格测试的正确性;计算方法较简单,计算开销小,执行效率高。故选择四面体重心作为四面体缩小的对称中心。

2.2.2 模型变换

(1)变换矩阵

三维点用向量 $V_p = [V_x, V_y, V_z, 1]^T$ 表示。矩阵 $D_T =$

$$\begin{bmatrix} X_x & Y_x & Z_x & T_x \\ X_y & Y_y & Z_y & T_y \\ X_z & Y_z & Z_z & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 称为变换矩阵}^{[3]}, \text{ 定义了三维点向量的平移、缩放、}$$

旋转、错切等变换。向量 V_p 的变换由矩阵运算 $D_T * V_p$ 来实现。

(2)网格散列变换

设当前变换为 T_1 , 相应的变换矩阵为 D_{T_1} , 则对于三维点向量 V_p 的当前变换运算为 $D_{T_1} * V_p$ 。

要使网格散列, 需对每个四面体分别执行变换 T_2 以使四面体向其中心收缩, 也即要对每个四面体的四个顶点执行变换 T_2 。相应的变换矩阵为 D_{T_2} , 其定义如下:

设待绘制的四面体 $A_1A_2A_3A_4$, 其中心点坐标向量经计算为 $V_{T_2} = [x_o, y_o, z_o, 1]^T$, 缩放系数为 $a (0 < a < 1)$, 则该四面体的收缩变

$$\text{换矩阵 } D_{T_2} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & -ax_o + x_o \\ 0 & a & 0 & -ay_o + y_o \\ 0 & 0 & a & -az_o + z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{。}$$

要完成四面体的收缩, 需设置当前变换矩阵 $D_T = D_{T_1} * D_{T_2}$, 然后每个四面体顶点向量均执行散列变换运算 $D_T * V_{A_i}$, ($i=1, 2, 3, 4$, V_{A_i} 为四面体顶点 A_i 对应的坐标向量)。

要使网格散列, 需为每个四面体设置收缩矩阵, 以使每个四面体均向各自中心收缩。

(3)模型整体变换

若对模型整体执行变换 T_n , 包括平移、旋转、缩放、错切等,

相应的变换矩阵为 D_n , 则需设置当前变换矩阵 $D_r = D_{n1} * D_n$, 再对模型每个顶点向量执行变换运算 $D_r * V_{Aj}$, ($j=1, 2, \dots, N, N$ 为顶点总个数)。

2.3 算法描述

提出的四面体网格散列可视化的算法步骤如下:

设 D_r 表示当前变换矩阵。

步骤 1 如果对模型整体执行平移、旋转、缩放等变换, 则执行步骤 8。

步骤 2 如果执行散列, 则对每个四面体循环执行步骤 3~步骤 7。

步骤 3 设当前变换为 T_1 , 即当前变换矩阵 $D_r = D_{r1}$, 保存 D_{r1} , 以备变换完成后恢复。

步骤 4 用公式(4)计算当前四面体的中心点 (x_0, y_0, z_0) 。

步骤 5 依据步骤 4 计算得到的当前四面体中心点构造缩小系数为 a ($0 < a < 1$) 的散列变换矩阵 D_{r2} , 设置当前变换矩阵 $D_r = D_{r1} * D_{r2}$ 。

步骤 6 对当前四面体每个顶点执行收缩变换运算 $D_r * V_{Ai}$, ($i=1, 2, 3, 4, V_{Ai}$ 为四面体顶点 A_i 对应的坐标向量), 完成当前四面体的绘制。

步骤 7 恢复当前变换矩阵, 即令 $D_r = D_{r1}$ 。

步骤 8 设模型整体执行变换 T_n , 相应变换矩阵为 D_n , 则设置当前变换矩阵 $D_r = D_r * D_n$ 。再对模型每个顶点向量执行变换运算 $D_r * V_{Aj}$, ($j=1, 2, \dots, N, N$ 为顶点总个数)。

步骤 9 结束。

上述算法的功能是令每个四面体在中心位置不变的情况下向各自中心缩小一比例, 从而实现四面体网格的散列。

3 实验结果

使用提出的四面体网格散列可视化测试方法对地质体模型网格进行测试, 从主观效果上看, 散列可视化对模型显示速度影响细微, 模型打开及绘制速度较快; 对散列网格进行平移、旋转、缩放等操作时, 程序响应较快, 图形显示无明显丢帧现象, 操控感较平滑; 模型显示清晰, 四面体网格间隙均匀。实验结果体现了算法较高的执行效率和良好的可视化效果。

图 2 为使用散列可视化测试方法对一个三维模型进行网格测试的局部效果图。应用提出的方法对网格进行测试, 散列后四面体外形保持不变, 且间隙较均匀, 散列图像清晰展示了网格的形态结构以及四面体之间共点、共棱、共面等空间关系, 可视化效果良好。通过使用旋转、缩放、平移以及调整间隙大小等手段, 从不同角度观察网格, 查找并定位有错误或质量问题的网格, 同时还可将模型局部进行散列显示, 以缩小测试范围。

图 3 为使用散列可视化测试方法定位网格错误的局部效果图, 该图对散列前后网格的显示效果进行了对比, 图中线框标出了存在错误的网格位置。如图所示, 网格未散列时, 几乎无法通过观察找到其中的错误, 通过对网格进行散列, 辅以平移、旋转、缩放等观察方法, 网格错误被清晰展示出来, 可以看到,

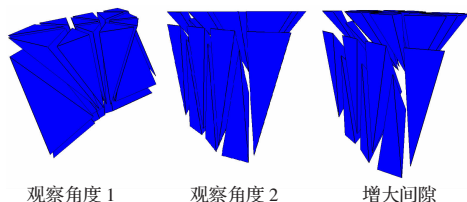


图 2 四面体网格散列可视化测试局部效果图

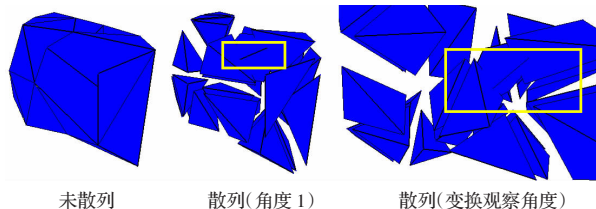


图 3 散列可视化测试方法定位网格错误效果图

网格中存在相互交叉的三个四面体。实验效果体现了四面体网格散列可视化测试方法的便捷性。

4 结语

四面体网格散列可视化测试方法, 实现网格测试整个过程的可视化, 提高了测试的便捷性和效率。笔者在 VC++ 和 OpenGL 环境下实现了该方法, 并已应用于河北省科学技术研究与发展计划项目——基于四面体网格的三维地质空间分析软件开发(项目编号 09213505D), 取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 聂春戈, 刘剑飞, 孙树立, 等. 四面体网格质量度量准则的研究[J]. 计算力学学报, 2003, 20(5).
- [2] 金晶, 吴新跃. 有限元网格划分相关问题分析研究[J]. 计算机辅助工程, 2005, 14(2).
- [3] 唐泽圣, 周嘉玉. 计算机图形学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [4] 陈德华. 也谈四面体“五心”[J]. 蒙自师专学报, 1997, 14(2).
- [5] Miller G L, Talmor D, Teng Shang-Hua, et al. Control volume meshes using sphere packing: Generation, refinement and coarsening [C]// Fifth International Meshing Roundtable (Pittsburgh, Pennsylvania), October 1996: 47-61.
- [6] Borouchaki H, Lo S H. Fast delaunay triangulation in three dimensions[J]. Comput Methods Appl Mesh, 1995, 128: 153-167.
- [7] Baker T J, Vassberg J C. Tetrahedral mesh generation and optimization[C]// Proceedings of the 6th International Conference, University of Greenwich, July 1998: 337-349.
- [8] George P-L, Borouchaki H. Delaunay triangulation and meshing: Application to finite elements[M]. Hermes, Paris, 1998.
- [9] Jonathan R S. Tetrahedral mesh generation by delaunay refinement[C]// Proceedings of the Fourteenth Annual Symposium on Computational Geometry, Minneapolis, 1998: 86-95.
- [10] Conraud J. Lazy constrained tetrahedralization[C]// Proceedings 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, 1995: 15-26.