

参数控制下使用独立点集对模型并行简化的研究

陈 杰¹ 方源敏¹ 李国柱² 夏永华¹

(1 昆明理工大学国土资源工程学院,昆明市学府路 282 号,650093)

(2 昆明市测绘研究院,昆明市人民东路人民巷 16 号,650051)

摘 要:以建模后所形成的空间格网为研究对象,通过研究顶点处的数学性质,计算相应的数学量,然后将模型进行变换,变换到特定的空间来研究其特征分布,进而实现对构成空间形体的格网进行简化。实验表明,本算法有着很好的并行性,在独立点集性质的基础上,可以一次并行处理多个点,采用并行的实现方法能够极大地减少算法运行过程中的时间损耗。

关键词:曲率;独立点集;模型简化;参数控制

中图法分类号:P208

模型简化涉及到多个领域的应用,诸如 3D 场景中为了提升渲染速度而出现的 LoD^[1-2] 技术,还有为了减少模型存储而研发的算法等。郭力真^[3] 对多边形模型简化算法进行了综述性的总结,常见的简化机制包括顶点聚类^[4-5]、增量式简化^[6-7]、采样^[8] 和自适应细分^[9-10],简化算法基本都采用了这 4 种机制的某种结合或者是变形。

1 独立点集的确 定

定义 在空间网格中,不存在直接邻居关系的两点称为独立点对,由不存在直接邻接关系的点构成的点集称为独立点集。

根据独立点对和独立点集的定义,一种独立点集的具体构造算法如下。

1) 建立独立点集和邻居点队列两个队列;

2) 从邻接表中选择一点 p_i ,将该点置入独立点集队列中,并将其邻居置入邻居点队列中;

3) 遍历邻居点队列,顺次选择点为当前点,测试其邻居是否已经存在于邻居点队列中,如果存在,则跳过;如果已经存在于独立点集中,则同样跳过;否则将其索引添加至独立点集中,并将其邻居点的索引顺次加至邻居点队列尾部(如果已经存在,则不执行填入操作);

4) 循环,直至邻居点队列遍历完毕。

算法结束后独立点集队列中点的索引,便是

要求定的点集。

在获取到独立点序列后,便可开始执行对模型的简化操作。分别计算独立点集中每个点处的模型“陡峭度”,以该量作为简化模型的数学指标,进行特征点判定。

2 投影面法线的确定

确定投影基准面法线的方法有两种:① 基于最佳二乘平面的拟合方法;② 针对相邻面片法线加权的计算方法。

最佳二乘平面的拟合方程如下:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

左右两端同除以 D ,可得:

$$\frac{A}{D}x + \frac{B}{D}y + \frac{C}{D}z + 1 = 0 \quad (2)$$

其中 $D \neq 0$ 。设 $\epsilon = \frac{A}{D}$, $\eta = \frac{B}{D}$ 和 $\delta = \frac{C}{D}$,则有:

$$\epsilon x + \eta y + \delta z + 1 = 0 \quad (3)$$

当有 n 个点时,最终可得该最小二乘拟合平面的系数为:

$$\begin{bmatrix} \epsilon \\ \eta \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum x_i \\ -\sum y_i \\ -\sum z_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用相邻面片法线加权的计算方法如下。

对于指定的顶点 V , 与其存在邻接关系的 i 个顶点为 V_i , 其中 $i=1, 2, \dots$ 。由于相邻顶点数目的有限性, 并非是连续的曲面, 只能采用离散的方式计算其法线的近似值。各子面片的面积乘以其单位法线, 即 $V_n = \sum V_i \times S_i$ 。等效于代数上, 以各子面片的面积为权重, 对各子面片的单位法线进行加权平均, 从而求取指定点的近似法线。

3 顶点处 K 值的计算

如图 1(a) 所示, $\triangle ABC$ 的面积为 $S_{\triangle ABC}$, 对于以 S 为顶点的 3 个三角形, 其面积分别为 $S_{\triangle SAB}$ 、 $S_{\triangle SAC}$ 和 $S_{\triangle SBC}$, 其陡峭度 K 为:

$$K = \frac{S_{\triangle ABC}}{S_{\triangle SAB} + S_{\triangle SAC} + S_{\triangle SBC}} \quad (5)$$

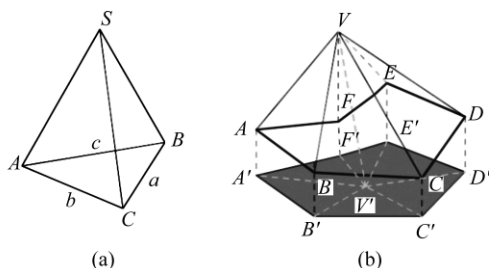


图 1 K 值计算示意图

Fig. 1 Calculation of K Value

由此可见, 如果点 S 位于 $\triangle ABC$ 所在的平面内, 则 $K=1$; 否则, 该值越小, 表明顶点 S 偏离三角形 $\triangle ABC$ 的程度越大, 从而顶点 S 相对周围点的陡峭程度越大。该变量能够很好地表征给定顶点处的陡峭程度。

如图 1(b) 为空间多边形的情况, 一般情况下对于面 $ABCDEF$ 为空间多边形而非平面多边形, 不能如图 1(a) 所示那样进行简单计算。必须将空间多边形投影至某空间平面, 在其上转换为平面多边形的面积计算问题。图 1 中所示多边形 $A'B'C'D'E'F'$ 为其在空间投影平面上的投影, 对于该种较为普通的情形可用式(6)计算:

$$K = \frac{S_{ABCDEF}}{S_{VAB} + S_{VBC} + S_{VCD} + S_{VDE} + S_{VEF} + S_{VFA}} \quad (6)$$

对于空间格网而言, 与独立点集中的点相邻接的点数一般都多于 3 个。计算其周围邻居点的最佳空间拟合平面, 并将其邻居点投影至该平面上, 从而计算出投影面积, 继而用该投影面积除以该点为中心的空间三角形的面积之和, 从而求得衡量给定顶点处陡峭程度的数值, 可得 K 值的

通用计算公式为:

$$K = S_{\text{projection}} / \sum S_i \quad (7)$$

在点 V 的领域内, K 值越小, 点 V 处越陡峭, K 的取值范围为 $[0, 1]$ 。几何上, K 值越接近于 1, 对应点处的表面越平缓。

4 点删除后局部格网的重建

设定阈值 θ , 如果给定顶点处的 K 值大于 θ , 即说明该点处的起伏在控制参数允许的范围内, 进而可对该顶点执行删除操作。在执行完删除操作后, 该点与其相邻点的拓扑关系被破坏, 从而形成空洞, 需要执行面片的缝补操作。在独立点集的基础上, 各点的删除和面片的缝补并不会彼此影响。本文所采用的面片缝补算法是: 对于删除的点所导致的局部空洞, 可看成是带有方向的顺次相连的线段集合。遍历该集合, 通过选择其中最边来将其三角化, 迭代直到原局部空洞被完全三角化为止。

如图 2(a) 所示, 设点 P 为相互独立点集中的一点, 在执行 K 值变换后, 根据参数该点可以被删去。在删除点 P 后, 在原始模型上形成了局部的空洞。与点 P 相关的原三角面片变为一系列边的组合, 为 \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{DE} , \overline{EF} 和 \overline{FA} 。模型表面的三角面片顶点的环绕方向多为有序的, 在顶点 P 执行完删除操作后, 对剩下的边按照原始顺序, 顺次相连便可变为带方向的闭合环。

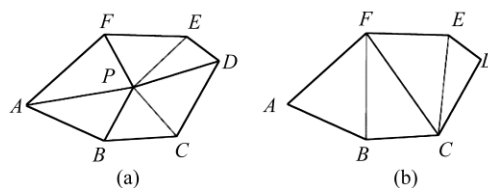


图 2 空洞缝补

Fig. 2 Hole Mending

如图 2(b) 右所示, 遍历该局部闭合环, 计算相隔点间的距离, 用距离最短的边将原始闭合环进行拆分, 依此迭代下去, 每次都采用最短边进行切割, 直到原闭合环被三角化为止。同时, 依据闭合环的方向, 能够使重建的三角面片遵从模型面片顶点环绕规则。

特例 如果删除顶点后形成的闭合环为非凸多边形, 则可能会由于凹节点问题而引入错误的连接线。解决方法是对闭合环进行检查, 通过递归的方式将闭合环分解为多个凸闭合环, 再对所形成的多个子凸闭合环进行三角剖分。

5 K 值控制下的模型简化实验

设立因子 θ 作为控制因子, 格网模型简化在该因子的控制下完成。小于该值的点被视为特征较为明显的点, 应当保留; 而大于该值的点, 则认为该点处的变化较为平坦, 可以被简化处理。采用管状体、球体和某地质实体为对象, 对本文算法进行了相关的实验。

对于图 3 中的管状体, 特征区域主要分布在其两端, 对于表面的点, 存在大致相同的拓扑连接。表现在 K 值空间中则为界限较为明显的两组分布。 K 值接近 1 的区域代表了管状体的表面, 而 K 值约等于 0.7 的部分则为管状体的两端。显然, 简化的区域主要将集中于表面部分, 这和人工判定的结果是相同的。对于图 4 中的空间球体, 球面上的点大致拥有相同的拓扑连接关系, 结合其形态, K 值的分布为一条均匀的直线, 这和直观上的理解一致。

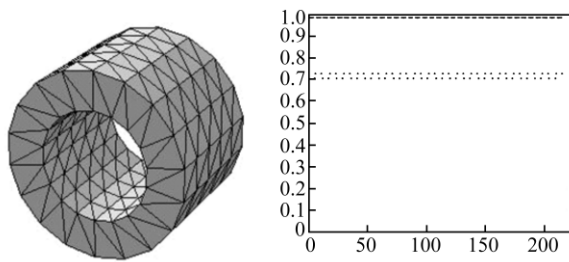


图 3 管状体及其 K 值分布
Fig. 3 Tube and Its K Distribution

图 5 为管状体和球体在 $K=0.9$ 水平下经过一次简化的效果。如表 1 所示, 管状体和球体在 $K=0.9$ 水平下, 点数在被大量简化的同时, 面积的失真程度被控制得很小。根据实际的应用, 可以对 K 值进行调整, 也可以通过迭代的方式对

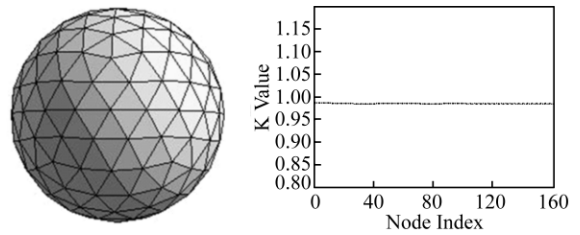


图 4 空间球体及其 K 值分布
Fig. 4 Sphere and Its K Distribution

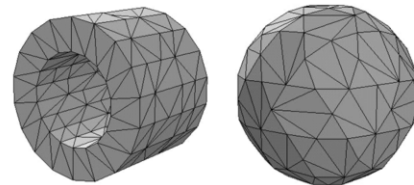


图 5 $K=0.9$ 水平下管状体和球体经过一次简化的效果
Fig. 5 Simplified Effect when $K=0.9$

模型进行多次简化, 直到满足实际应用要求的精度为止。

图 6、表 1 和表 2 为某地质实体及其简化的统计数据, 通过实验, 可以发现本算法在参数控制下能够充分顾及到空间格网的形态特征, 对模型进行有效的简化。在具体应用中, 可通过将表面积和体积等因子作为实际的控制因子, 并且可引入滑动条来辅助对 K 值进行控制, 以使用户交互操作。

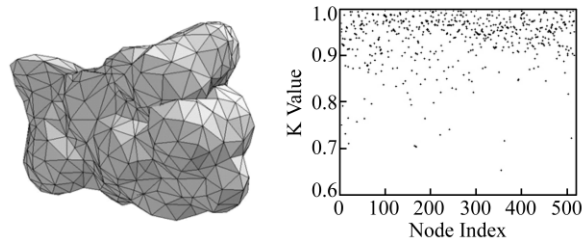


图 6 某地质实体及其 K 值分布
Fig. 6 Geological Entity and Its K Distribution

表 1 实体在不同 K 值下经过一次简化的统计数据
Tab. 1 Statistics of the Geological Entity Simplified in Different K

K	点数		表面积/ m^3		点数简化率 /%	表面积变化率 /%
	简化前	简化后	简化前	简化后		
0.98	517	490	23.912	23.936	5.2	0.1
0.95	517	444	23.912	24.057	14.1	0.6
0.9	517	405	23.912	23.995	21.7	0.3

表 2 $K=0.95$ 水平下多次简化的统计数据
Tab. 2 Statistics of the Entity Simplified Several Times when K

简化次数	点数		表面积/ m^3		点数简化率 /%	表面积变化率 /%
	简化前	简化后	简化前	简化后		
1	517	444	23.912	24.057	14.1	0.6
2	517	405	23.912	24.291	21.7	1.6
3	517	332	23.912	24.267	35.8	1.5

参 考 文 献

- [1] 余明, 左小清, 李清泉. 一种基于 TIN 的视相关动态分辨率地形模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(12): 1106-1110
- [2] 许妙忠, 李德仁. 基于点删除的地形 TIN 连续 LoD 模型的建立和实时动态显示[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(3): 321-325
- [3] 郭力真, 吴恩华. 多边形模型简化算法综述[J]. 计算机应用研究, 2005(8): 20-23
- [4] Cignoni P, Montani C. A Comparison of Mesh Simplification Algorithms [J]. Computers and Graphics, 1998, 22(1): 37-54
- [5] Lindstrom P. Out-of-Core Simplification of Large Polygonal Models [C]. The ACM SIGGRAPH 2000, New Orleans, Louisiana, 2000
- [6] Garland M, Heckbert P. Surface Simplification Using Quadric Error Metrics [C]. The ACM SIGGRAPH' 97, Los Angeles, California, 1997
- [7] 李楠, 肖克炎. 一种三角形折叠网格模型简化的改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(34): 192-194
- [8] Hoppe H. New Quadric Metric for Simplifying Meshes with Appearance Attributes [C]. The IEEE Visualization' 99, San Francisco, 1999
- [9] DeHaemer J M, Zyda M. Simplification of Objects Rendered by Polygonal Approximations [J]. Computers and Graphics, 1991, 15(2): 175-184
- [10] Kalvin A, Taylor R. Surfaces: Polygonal Mesh Simplification with Bounded Error [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(3): 64-77
- [11] 王奎武, 陈发来. 基于点表示的曲面曲率计算方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(5): 813-817
- [12] 刘仕庆, 陈幼平. 三角形网格模型顶点曲率的求解算法 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24(6): 107-108

第一作者简介: 陈杰, 博士生, 研究方向: 数字矿山, 三维建模。
E-mail: chenjie3d@126.com

A Parallel Algorithm of Model Simplification Under the Control of Parameter Based on Independent Set of Points

CHEN Jie¹ FANG Yuanmin¹ LI Guozhu² XIA Yonghua¹

(1 Kunming University of Science and Technology, 282 Xuefu Road, Kunming 650093, China)

(2 Kunming Surveying and Mapping Institute, 16 Renminxiang, East Renmin Road, Kunming 650051, China)

Abstract: With the rapid development of data acquisition technology, the precision of point cloud of target object becoming more and more sophisticated. It's possible to build a high accuracy virtual simulation of the real world with the high-density data, but for its modelling and analyzing, the time-consuming is also growing. In this study, the spatial mesh model built through point cloud is treated as the studied object, and a parallel algorithm of model simplification under the control of parameter is studied. The steps are as follows: first, the K -adjacency table is established according to the topology of spatial mesh points; second, the independent set of points is calculated; third, the header element in each item of K -adjacency is taken as the center point, the projection plane is calculated with its neighbour points, then the K value is calculated; forth, the original model is transformed into the K value space, and the feature distribution of the model is studied; fifth, the model is simplified with the K value compared with the input parameter, loops until meet the condition; finally, the experiment is carried on series of spatial meshes. It's proved that the algorithm not only can simplify the model effectively, but also the degree of distortion is also under the control.

Key words: curvature; independent set of points; model simplification; parameter control

About the first author: CHEN Jie, Ph.D candidate, majors in GIS, etc.

E-mail: chenjie3d@126.com