

一种基于顶点曲率的三维实体表面模型加密算法

徐苏维, 盛业华, 王永波, 白世彪, 刘平

(南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏南京 210097)

[摘要] 利用空间少数点通过内插方法使数据加密来模拟真实的三维实体表面模型一直是国际上的研究热点之一。Curst 算法是一种基于计算几何中的 Voronoi 周期图的曲面重建算法, 算法简单, 重建结果精细, 但由于计算量太大, 其应用受到了限制。采用基于顶点曲率的原理, 提出了一个三角网内插的曲面重建算法: 即由 TN 形成的三维空间数据, 计算每个三角网的权重(曲率权重、角度权重), 然后求出每个三角形质心, 再利用一系列原理对质心进行纠正, 得出新的内插点, 最后由用户设定加密点数的百分比, 根据权重大小来重建三维实体表面。还给出了一组三角网加密模型实例以说明该方法的有效性。

[关键词] 三维实体表面模型, 三角网格, 数据加密, vtk

[中图分类号] TP311.5 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2005)03-0090-05

An Algorithm of 3D Entity Surface Model Interpolation Based on the Vertex Curvature

XU Suwei, SHENG Yehua, WANG Yongbo, BAI Shibiao, LIU Ping

(1. Jiangsu Provincial Key Lab of Geographic Information Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210097, China)

Abstract Fewer special points are used to simulate the true 3D entity surface model by interpolation denser which has always been the hot issue both at home and abroad. The Curst algorithm is a surface reconstruction algorithm on the basis of Voronoi map in calculation geometry. It is simple and the reconstructed result is very fine. However, it is a time-consuming work, and thus is limited in its application. The paper presents a surface reconstruction algorithm for triangle meshes interpolation by using the principle of vertex curvatures, and according to the special data, calculates the weight of mesh and each triangle's centroid and rectifies it by using a series of principles, and lastly, the user can make a percent to reconstruct the surface of entity. The paper also gives an example of denser surface model to illustrate efficiency of the method based on vtk.

Key words 3D entity surface model, triangle meshes, data dense, vtk

0 引言

三维 TN 模型是表达三维实体表面的有效方法, 但表面观测点少, 所建立的表面模型粗糙而不够逼真, 因此需要对表面数据进行加密。加密问题一直是 3D-GIS 计算机图形学的一个重要研究内容, 因此在现实生活中为了更好地表现实体模型, 有必要对已知数据进行内插加密, 使得有更多的点或拓扑来进行表现和分析, 即根据有限采样点重建逼真的三维模型。

目前三维实体的三角网格表面的重建引起了国内外众多学者的广泛关注, 他们对模型数据内插加密方法展开了广泛而深入的研究。其中 Hoppe 及其合作者进行了卓有成效的开创性工作^[1]。他们的研究首先是根据稠密的散乱点集自动计算法矢信息, 用切平面线性逼近待重建曲面的局部形状, 然后利用实现等值面抽取的 MC (marching cube 步进立方体) 算法输出曲面的三角化模型。Hoppe 的方法自动化程度高, 能够识别曲面边界, 但对于曲面边界以及尖锐棱边部分的重建效果则

收稿日期: 2005-03-22

基金项目: 南京师范大学人才基金资助项目 (2004105XGQ2646)。

作者简介: 徐苏维 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事地图学与地理信息系统的学习和研究。E-mail: swxu116@126.com

通信联系人: 盛业华 (1965-), 教授, 博士生导师, 主要从事摄影测量与遥感、GIS 虚拟地理环境等方面的研究。

E-mail: shengyehua@njnu.edu.cn

不够理想. Guo B^[2]和 Bajaj C L^[3]首先用三维 α 形建立结构的拓扑关系,再建立多面体逼近模型,但是三维 α 形的计算复杂性高,对于 n 个点的数据集为 $O(n^2)$,而且不易做简化处理. Chen^[4]直接判定三点形成的三角形的最小内角,应用最小内角的最大原则建立测量点的三角化模型.这种方法首先要将三维数据点投影到二维平面上,然后再进行判定,这就导致对封闭表面或近似封闭的表面处理的困难,而且对大量的密集点集,也存在效率问题. Gu P^[5]提出利用神经网络的学习机制重建自由曲面,但还仅限于较为简单的应用.另外一类基于散乱点的曲面重建采用变形曲面的方法,如 Ruprecht D^[6]和 Wikin A^[7]提出的方法,变形曲面方法通常要赋予曲面一定的物理属性,但物理属性和外力大小是较难给定的,而且变形方法一般要事先给定物体的拓扑结构,如球形拓扑、盘形拓扑等.

本文针对以上实体表面三角网加密方法存在的问题进行改进,其思路是把 Bernd Han ann提出的点纠正算法与曲率权重判别结合起来进行实体表面模型的加密.本文第2节给出算法中的一些基本定义,以便于算法的描述;并详细描述了算法的主要步骤;第3节给出了一组表面三角网加密模型实例并用 vk 进行表现分析;第4节对算法作出讨论,并给出结论与展望.

1 算法原理及其实现

1.1 基本概念

定义 1 空间中一组三角形,沿公共边及在顶点处相邻接,把这样的一组三角形定义为三角形网格 T_N ,每个三角形面片为一个平面 T_i .如图 1 所示.

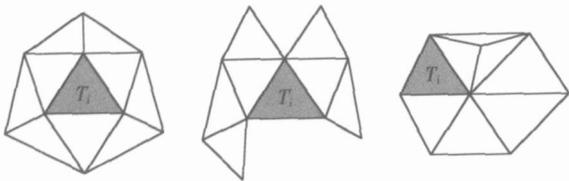


图 1 平面 T_i

T_N 可以由顶点集合 $VertexCoord = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 和三角形集合 $TriVertex = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ 来表示.

定义 2 对 T_N 中任一顶点 V_i ,有一个或多个三角形使用了 V_i ,把这些三角形定义为与顶点 V_i 相关的三角形 $TriA round$ 简称相关三角形.

定义 3 对 T_N 中任一顶点 V_i 与 V_i 相关的所有三角形 $TriA round$ 根据它们的向量及 V_i 可建立

T_i 的平均平面 P .

定义 4 三角形的曲率权重是指该三角形 3个顶点的曲率之和.

定义 5 三角形的角度权重:

$$\alpha = 2^* \left[\left(\sum_{j=1}^3 \cos \alpha_j \right) - 1 \right], (\alpha_j \text{ 为三角形内角}).$$

定义 6 三角形的权重是指该三角形曲率权重与角度权重的乘积.

1.2 算法步骤

1.2.1 三角形权重计算

(1) 搜索所有三角形,对每个三角形的 3个顶点,按以下步骤求曲率.

(2) 找到该点 x_i 周围的所有三角形,分别计算他们的法向量,再利用法向量之和 N ,及该点坐标 (x_0, y_0, z_0) ,建立一个平面 P :

$$N(x - x_0) = nx(x - x_0) + ny(y - y_0) + nz(z - z_0) = Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

其中 A, B, C 为归一化后的值,即 $A^2 + B^2 + C^2 = 1$, nx, ny, nz 分别为三角形的法向量 N 的分量.

(3) 分别求出该点周围其它点 j 到 P 的有向距离:

$$d_j = \frac{Ax_j + By_j + Cz_j + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = Ax_j + By_j + Cz_j + D \text{ (分母为 1)} \quad (2)$$

A, B, C, D 是平面 P 的平面系数.

(4) 选择一个垂直于 N 的向量 a :

$$a = \begin{cases} (- (ny + nz), nx, nx)^T / nx, nx \neq 0 \\ (ny, - (nx + nz), ny)^T / ny, ny \neq 0 \\ (nz, nz, - (nx + ny))^T / nz, nz \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

(5) 利用 (3) 式计算正交单位向量 b_1 和 b_2 :

$$\begin{cases} b_2 = N^* b_1 \\ b_1 = \frac{a}{\|a\|}, \|a\| \text{ 是 } a \text{ 的模} \end{cases} \quad (4)$$

(6) 用 (2) 式, 求出周围点 P_j 在 P 上的投影坐标 P'_j : $P'_j = P_j - d_j * N$, d_j 是周围点到 P 的距离.

(7) 求出差: $dv_j = P'_j - P_0$ 其中 $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$, 建立投影点的局部坐标 $u_j v_j$

$$\begin{cases} u_j = dv_j \cdot b_1 \\ v_j = dv_j \cdot b_2 \end{cases} \quad (5)$$

(8) 由 (5) 式, 再利用矩阵原理求出系数矩阵 C (利用最小 2乘法和 Gauss-约当消去法原理)^[8,9]:

$$\begin{bmatrix} u_1^2 & 2u_1v_1 & v_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_j^2 & 2u_jv_j & v_j^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 0 \\ c_1 1 \\ c_0 2 \end{bmatrix} = uc = E = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

E 为距离矩阵, u, v 为上面求出的坐标矩阵.

(9) 建立方程如下, 求出 k_1, k_2 两个曲率值:

$$k^2 + (c_{20} + a_{02})k + c_{20}a_{02} - c_{11}^2 = 0 \quad (7)$$

(10) 由 (7) 求出三角形 3 个顶点的绝对曲率:

$$a = |k_1| + |k_2|, \quad k_1, k_2 \text{ 是方程式 (7) 的解.}$$

$$A = a_1 + a_2 + a_3 \quad (8)$$

(11) 求出三角形的角度权重:

$$\alpha = 2^* \left[\sum_{j=1}^3 \cos \alpha_j - 1 \right] \quad (9)$$

(12) 由 (8) (9) 求出三角形权重: $W = A^* \alpha$

1.2.2 求质心纠正后的新点

(1) 根据三角形 T_i 的 3 个顶点坐标确定平面方程 P_i . 其中平面方程法向量可定义为: $\{n_x, n_y, n_z\}$, 方程形式如 (1) 式;

(2) 选择一个垂直于 N 的向量 a , 具体同 1.2.1 (3) 式;

(3) 计算 2 个正交单位向量, 同 1.2.1 (4) 式;

(4) 利用 P 平面上的原点 (三角形的质心), 和两个单位向量建立一个新的正交的坐标系;

(5) 搜索三角形 T_i 周围的所有点 (即与三角形的三个顶点有公共点的周围三角形的其他顶点集), 分别计算它们到平面 P 的有向距离 d , 同上 (2) 式;

(6) 把周围点投影到平面 P 上, 并用上述建立的局部坐标来表达, 并求出差: $d_j = P'_j - P_i$, 建立投影点的局部坐标, 同上 (5) 式;

(7) 由步骤 (6), 再利用如下矩阵求出 c_{0i} . 根据 $P' = P + c_{0i} * N$ 得出纠正后的内插点^[10];

$$\begin{bmatrix} u_1^2 & u_1 v_1 & u_1 & v_1^2 & v_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_j^2 & u_j v_j & u_j & v_j^2 & v_j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{20} \\ c_{11} \\ c_{10} \\ c_{02} \\ c_{01} \\ c_{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{20} \\ c_{11} \\ c_{10} \\ c_{02} \\ c_{01} \\ c_{00} \end{bmatrix}$$

$$U \begin{bmatrix} c_{20} \\ c_{11} \\ c_{10} \\ c_{02} \\ c_{01} \\ c_{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_j \end{bmatrix}$$

(8) 最后根据三角形的权重, 从大到小排序, 加密时先对权重大的内插, 依次往下, 只需要根据用户定义的加密百分比, 对原始数据进行内插加

密;

(9) 由于有极少数纠正后的点偏离原质心点有段距离, 导致表现出的物体模型上有个别三角面片明显凸出来, 因此, 还必须根据三角形边长 (如根据三角形中最小边长的 $1/n$ (n 为自然数)) 设定一个阈值来确定比较出图效果. 当纠正后的点与原质心点的距离超过这个值时, 就直接取质心当内插点 P'_i ;

(10) 遍历完成后, 如果对模型的数据加密没有达到要求, 可适当修改百分比, 并且可以修改距离阈值, 再次对模型进行加密, 直到满足要求为止.

1.3 实现方法

1.3.1 数据预处理

三维实体表面 TIN 模型的表达方式有多种, 本文以两个文件对 TIN 模型进行组织: 点坐标和三角形的拓扑关系. 在此拓扑关系是三角形的顶点逆时针排列的序号, 同理加密后的拓扑数据也必须保持三角形顶点的逆时针排列. 因此首先把其它环境下建立的模型数据如 $vm1.dxf$ 等文件格式转成包括点和拓扑的文件.

1.3.2 算法流程

对整个过程算法可用图 2 表示.

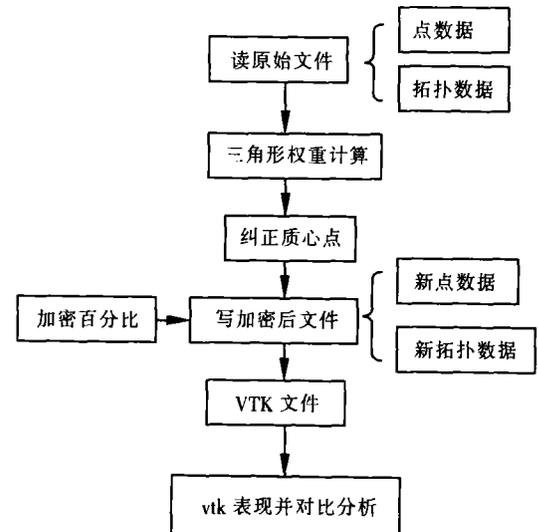


图 2 算法流程图

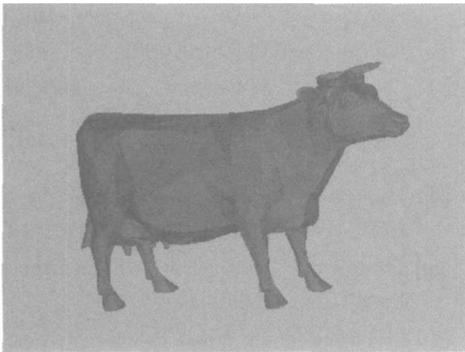
2 实例分析

本文所阐述的算法已经在 VC++ .net 下运行实现, 下面笔者调用了 VTK (Visualization Toolkit) 的三维数据表现功能对一组实例进行了表现, 以说明算法的可行性. 图中原始模型采用牛的三维格网 TIN, 对其进行了 3 次加密.

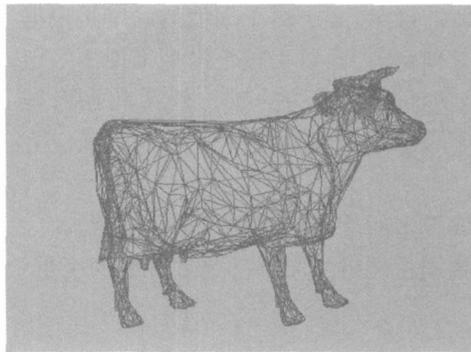
图 3(a) 是用于数据加密的原始模型, 图 3(b) ~ 图 3(c) 是分别经过加密后的模型. 通过对比分

析可以看出, 在模型加密 50% 后, 模型对于原模型具有较高程度的逼近, 原模型的身体部位由于相对比较平坦曲率权重小, 有的没有参与加密, 只是在表面曲率较大的区域进行了一定程度的数据加密, 若不放大看某些特征部位, 与原模型接近; 放大观察, 可以看到某些曲率变化较大的部位 (如面部) 三角网增多; 时间效率上由 a 到 b 用时不到 1 min, 加密比达到 100% 时, 用时约 1.5 min, 牛脚、眼睛、鼻子等曲率变化大的部位通过网格模型可以明显看出三角形密化, 以此类推数据达高位数时, 时间和效果也是能达到另人满意的程度. 因此, 本文

的算法可以根据三维实体的复杂程度来对模型进行加密, 并且保证模型和原始模型保持较高程度的逼近; 与此同时, 在数据加密过程中, 首要的处理对象是原始模型权重大的三角形面片, 也即表面变化较大的部位, 接着才对表面变化比较小的区域进行加密处理. 在 vtk 中放大显示, 可以看出它形成的凹凸三角形面片. 写出的数据可以再次加密, 以得到更多需要的点及其拓扑关系. 当然若需在平坦表面也得到更多点, 可以考虑在百分比之外的权重较小的三角面片上, 直接取质心为内插点, 这样将会使得模型更加密化.

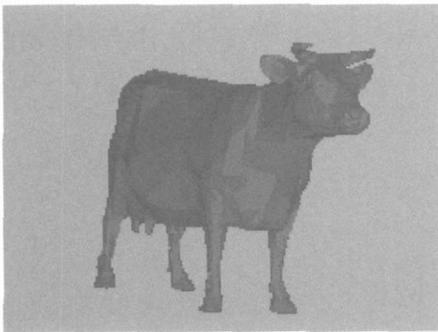


表面显示(S)

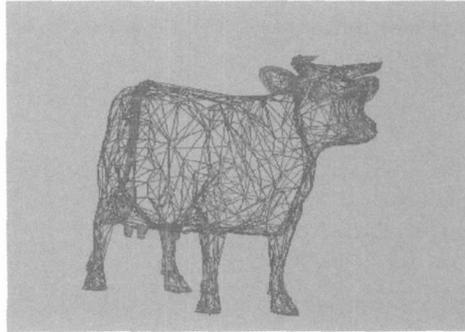


线框显示(W)

图 3(a) 原始模型(顶点数目:1326;三角形面片数目:2650)

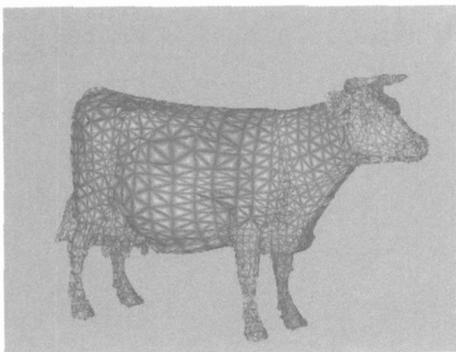


表面显示(S)

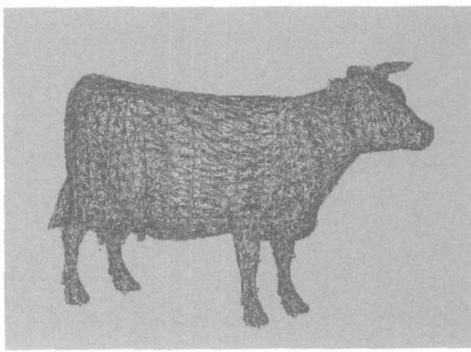


线框显示(W)

图 3(b) 加密后模型(50%)(顶点数目:1 326+1 326×50%=1 989;三角形面片数目:2 650+2×1 326×50%=3 976)



表面显示(S)



线框显示(W)

图 3(c) 加密后模型(90%)(顶点数目:1 326+1 326×90%=2 520;三角形面片数目:2 650+2×1 326×90%=5 037)

图 3 模型压缩效果对比

3 结语

综上所述可以看出, 本文的算法在实际应用中是可行的, 从程序运行的加密时间可看出执行效率也比较高. 可用于虚拟现实中多细节场景的生成和交互式可视化中. 但是这种算法还存在着一些不足, 需要进一步改进:

(1) 三角网的优化. 在本加密方法的实现中, 没有考虑新构建三角网的优化问题, 比如在拓扑重建时没有考虑用 Delaunay 三角化, 这样的结果可能会造成部分三角网的形状较差, 从而影响加密后模型与原模型的逼近拟合程度.

(2) 阈值的确定. 文中对于阈值的确定是根据三角形边长来确定的, 但对于整个模型来说不一定具备代表性, 从而影响算法的执行效率和加密效果. 因此, 需要寻求一种具有代表性的阈值确定方案.

(3) 提取更多的能反映原网格特征的因素.

(4) 寻找加密网格与原网格逼近程度的度量.

[参考文献]

- [1] Hoppe H, DeRose T, Du champ T, *et al*. Surface reconstruction from unorganized points [J]. *Computer Graphics* 1992, 26(2): 71-78
- [2] Guo B. Surface reconstruction from points to spline [J]. *Computer Aided Design* 1997, 29(4): 269-277.
- [3] Bajaj C L, Bernardini J, Xu F G. Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans [J]. *Computer Graphics* 1995, 29(Siggraph95): 109-118
- [4] Chen X. Surface modeling of range data by constrained triangulation [J]. *Computer Aided Design* 1994, 26(3): 632-645.
- [5] Gu P, Yan X. Neural network approach to the construction of free form surfaces for reverse engineering [J]. *Computer Aided Design* 1995, 27(1): 59-64
- [6] Ruprecht D, Nagel R, R Müller H. Spatial free-form deformation with scattered data interpolation methods [J]. *Computer and Graphics* 1995, 19(1): 63-71
- [7] Witkin A, Welch W. Fast animation and control of nonrigid structures [J]. *Computer Graphics* 1990, 24(4): 243-252
- [8] Hann B. Curvature approximation for triangulated surfaces [J]. *Computing Supple* 1993, 13(8), 139-153
- [9] Davis P T. *Interpolation and Approximation* [M]. New York: Dover Publications, 1975.
- [10] Hann B. A data reduction scheme for triangulated surfaces [J]. *Computer Aided Geometric Design* 1994, 11(3): 197-214

[责任编辑: 严海琳]