

基于区域特征距离加权的三维地形建模方法

付延强*, 韩慧健

(山东财经大学 山东省数字媒体技术重点实验室, 济南 250014)

(*通信作者电子邮箱 fyq200304@163.com)

摘要: 为了提高三维虚拟场景中三维地形真实感效果, 提出了基于区域特征的距离加权的三维地形建模方法。首先, 根据采样点数据的高程值对采样点数据进行分类, 建立分类数据与插值点数量映射关系; 然后, 结合 Diamond-square 细分法求取插值点坐标数据, 求得距离加权因子; 最后, 通过判断插值点的区域特征建立距离加权计算方程, 以保证插值点间的平滑性和连贯性。理论分析和仿真结果表明, 与传统地形建模方法相比, 该方法能够提高三维地形的真实感, 同时地形绘制速度提高 20%。

关键词: 数字高程模型; 三维地形; 采样点数据; 区域特征插值

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A

Three-dimensional terrain modeling based on regional feature distance weighting

FU Yan-qiang*, HAN Hui-jian

(Shandong Provincial Key Laboratory of Digital Media, Shandong University of Finance and Economics, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: To improve the rendering realistic effect of the three-dimensional terrain in virtual scene, a new three-dimensional terrain modeling approach was put forward, which was based on regional distance weighting method. In this method, the sample data was classified by the elevation value and the mapping relationship between classified data and the number of interpolation points constructed. Then, distance weighted factor was obtained by combining the Diamond-square subdivision method to compute the interpolation point coordinate data. At last, to ensure the smoothness and continuity of interpolation points, distance weighting calculation equations was established with the judgment of the interpolation point regional features. Compared with the traditional terrain modeling method, theoretical analysis and simulation results show that this method can improve the realistic effect of the 3D terrain and reduce the terrain rendering time by 20 percent.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); three-dimensional terrain; sample point data; regional feature interpolation

0 引言

三维地形生成^[1]是虚拟漫游场景构建中最基本、最重要的环节之一, 其生成算法一直是计算机图形学的重要内容。地形作为自然界最复杂的景物之一具有其自身的特殊性, 例如, 地形表面细节的复杂性, 地表的起伏的随机性等, 对它的三维仿真一直是国内外计算机图形学领域研究的重点和难点。

三维地形建模是三维地形仿真研究中最主要的环节^[2]。目前, 在实际应用中所采用的数据点的高程值通常是通过能够体现出实际地形特征的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)^[3]得到。为了得到定义域内的其他位置的高程值, 必须借助已知采样点进行插值给出近似值。依据内插点分布范围, DEM 数据内插^[4]一般分为整体内插、局部分块内插和逐点内插三类。其中, 逐点内插法灵活性较高、使用较频繁, 常用的插值计算方法有多项式函数法、Delaunay 三角剖分法^[5]和随机中点位移法^[6]等; 但是, 以上方法并没有对三维地形的区域特征进行充分考虑, 方块、折痕效应比较明显, 计算效率较低。本文针对地形表面细节复杂性, 地表起伏的随机性等特点, 对采样点高程值数据进行预处理分类划分, 充分

考虑不同地形特征的离散点对插值点的影响; 在此基础上建立插值点与离散点的距离权函数, 综合参与计算离散点数量及其影响权重, 提出了基于三维地形区域特征的距离加权算法实现三维真实感地形的构造; 为了避免距离权函数的重复计算, 本文在插值点选取时采用 Diamond-square 细分法, 实现对距离权函数优化处理, 减少权函数计算对整体算法的影响; 在数据结构上本文采用块状链表提高 Diamond-square 细分法的数据操作效率。实验结果表明, 本文方法在提高三维地形真实感的同时, 在一定程度上减少了运算量, 提高了运算效率。

1 地形建模原理及方法

本文在建立三维地形模型过程中运用格网模型(如图 1 所示), 该模型的地形建模主要方法有 DEM 数据的采集与内插, 基于分形模型的 DEM 数据生成等。DEM 数据的采集与内插是指首先采用测量、地图数字化等方法获取 DEM 的原始数据, 在这些原始数据的基础上选用某种内插方法把 DEM 的原始数据转化成规则的格网分布数值。

为了避免对三维地形进行分块(分割)和合并带来的不便, 本文将三维地形区域特征作为参与插值计算的离散点数

收稿日期: 2012-06-08; 修回日期: 2012-08-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272431, 60903109); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012FM002, ZR2009CQ004, ZR2011FL020, ZR2011FL029, ZR2010FQ031); 山东省博士基金资助项目(BS2011DX024, BS2012DX028); 山东省科技发展计划项目(2010GJC20808-13)。

作者简介: 付延强(1987-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实、自然语言理解; 韩慧健(1971-), 男, 山东菏泽人, 教授, 主要研究方向: 计算机游戏与动画、自然语言理解、数字媒体信息处理。

量影响因子,同时对参与计算的采样点高程值数据依据离散点与插值点之间的距离作为离散点高程值对插值点高程值影响权重因子,提出了基于区域特征的距离加权算法实现三维地形建模,整体算法流程如图 2 所示。

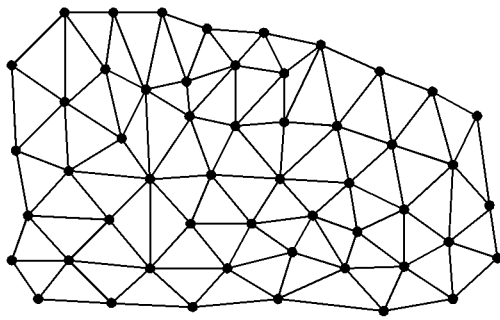


图 1 网格结构地形的俯视图

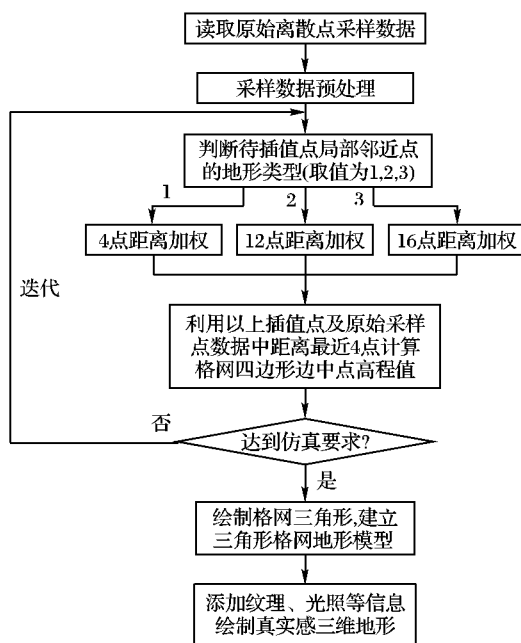


图 2 本文算法流程

由图 2 所示,本文算法主要由采样点预处理、算法原理及数据结构等步骤完成。下面对其具体原理及处理流程进行详细介绍。

1.1 地形数据预处理

由于采样数据可能受到各种干扰测量条件的干扰及采样数据的稀疏程度的影响,甚至是人为测量的误差等造成高程数据在局部范围内变化非常大,在这样的基准采样点数据上进行插值得到的插值结果在视觉上会使地形显得非常尖锐或皱折,为了能够得到更好的视觉效果,需要对高度数据做一定的平滑处理^[7]。另外,根据地形高程数据分布范围可以将地形进行分类处理,针对不同地形采用不同的插值计算方法。为了实现基于地形特征的三维地形仿真,本文将平滑处理和地形分类进行同步处理,步骤如下:

首先,根据文献[8]定义三类地形:第一类地形主要是山地地形,第二类地形主要包括丘陵和岗丘,第三类地形主要指平地地形。其中,第二类地形的高程值介于第一类地形和第三类地形之间,为了对高程数据按照以上分类进行归类处理的同时实现平滑处理,本文将第二类地形高程范围作为参考高程,以实现平滑处理。

其次,遍历所有高程点,根据高程值的大小,对高程数据点进行归类。

最后,在对采样点进行归类处理同时,对属于参考高程范围内的高程点进行两极化处理,基本保持参考范围上界附近的点,以保证和参考高程以外的地形(第三类地形)平滑过渡,同时其他点向下界平滑逼近。定义参考高程的目标是在保证整体地势高低起伏的状态下,根据地表形态的实际情况和用户的具体需求,在特定的高程范围内获得相对较平坦的区域。

地形数据经过以上处理后,采样点中的高程数据噪点已被平滑,并且实现了地形特征提取,为基于地形特征的距离加权算法奠定了基础。

1.2 基于地形特征的距离加权算法

1.2.1 算法原理

地形数据经过处理后,三类地形的复杂程度和起伏变化是不同的:第一类山地地形表面细节比较复杂,地表的起伏比较明显,对三维地形仿真要求比较高,单纯地使用邻近点来进行高程值近似计算并不能体现高程值的相关性,达不到仿真要求;第三类平地地形地表细节较少、起伏均匀,使用邻近 4 点进行近似计算即可达到仿真要求;第二类丘陵和岗丘地形地表细节相对较少、起伏较均匀,其插值计算点应介于山地地形和平地地形之间,既考虑到提高真实感,又尽量不影响处理速度。基于以上理论,本文提出了基于地形特征的距离加权算法,根据不同的地形特征选择不同数量的邻近点进行插值拟合,求出内插点的高程值。每一个 DEM 格网点的高程与其周围的 4~16 个(离散点的个数与地形类型有关)采样点的高程进行距离加权平均,认为离中心点越近的参考点,对中心点的高程影响越大。因此,内插点高程值函数形式可设为:

$$f = \frac{\sum_{k=1}^m w_k g_k}{\sum_{k=1}^m w_k} = AG \quad (1)$$

式中: f 为所求格网点的高程值; $G = [g_1, g_2, \dots, g_k]^T$, g_k 为所选离散采样点的高程值; $A = [w_1 / \sum w_k, w_2 / \sum w_k, \dots, w_m / \sum w_k]$, w_k 为离散点与内插点距离 d 的权函数, $w_k = 1.0/d_k^2$; m 代表参与插值计算的离散点个数,与地形复杂程度(即本文划分的地形类型)有关。

1.2.2 距离权函数优化

从 1.2.1 节内插函数公式中可以看出,针对不同的地形进行插值的离散点数是不同的,并且每次插值都进行距离计算增加了计算量,影响计算速度。本文针对规则格网地形的特点,利用 Diamond-square 细分法^[9]对距离权函数的计算进行简化,充分利用 Diamond-square 细分法插值点的对称分布特性减少距离计算次数,同时可以实现插值点规范化,这种算法是由种子点组成的格网正方形开始,通过若干次 Diamond-square 细分法不断细化,最后获得逼真的三维地形仿真图。为了便于权函数距离计算和分类离散点插值点选取, Diamond-square 细分法每次迭代细分都由 Diamond(如图 3 所示)和 Square(如图 4 所示)两步完成。

假设初始用 4×4 的数组表示格网地形(如图 4 所示),其中各个顶点(采样点)用黑色圆点表示,都赋予初始高程值,待插值点使用黑色方块点表示,令 w_k 代表各个相应顶点对插值点的影响权重,其值大小和对应顶点与插值点之间的距离有关^[10]。由正方形细分原理可得完成 i 次格网正方形细分迭代过程,格网正方形个数为 $4^i N$ 。设离散点间初始距离

设置为 1, 本文在进行插值点高程值计算时步骤如下。

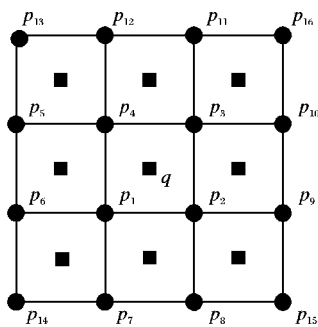


图 3 Diamond 步示意图

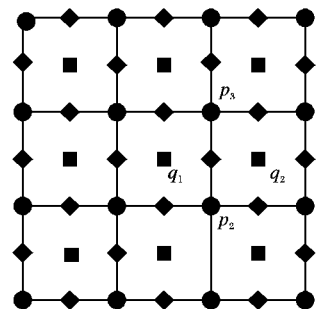


图 4 Square 步示意图

1) 计算格网正方形中点高程值。

为了计算该点高程值, 本文通过判断该点所在正方形 4 个顶点 p_1, p_2, p_3, p_4 的地形类型属性获得插值点所在地形局部区域的地形特征。根据三维地形区域特征待插值点高程计算分为以下 3 种情况:

① 如果 4 点都为平地地形采样点, 则插值点处高程值可以直接使用正方形的 4 个顶点进行距离加权, 根据对称性原理, 插值点与参与插值点距离相等, 故插值点的高程值计算公式为:

$$f = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4} * g_i \quad (2)$$

② 如果 4 点都为岗地和丘陵的第二类地形或岗地与丘陵、丘陵与平地混合地形, 为了兼顾局部采样点相关性, 插值点高程值可以使用 12 个邻近点 $\{p_k | k = 1, 2, \dots, 12\}$ 进行距离加权计算, 根据对称性原理及细分原理, 插值点的高程值公式为:

$$f = 0.13 * \sum_{i=1}^4 g_i + 0.06 * \sum_{i=5}^{12} g_i \quad (3)$$

③ 如果 4 点都为山地地形或者是山地与岗地、山地与丘陵混合地形, 考虑到地形的起伏及地表细节比较明显, 因此不仅要考虑 4 个直接相邻点的高度值影响, 而且考虑到各相邻点间高度值变化率的影响, 此时需要使用插值点周围 16 个 $\{p_k | k = 1, 2, \dots, 16\}$ 邻近点进行拟合计算, 同样由对称性原理和细分原理插值点处的高程值计算公式为:

$$f = 0.11 * \sum_{i=1}^4 g_i + 0.05 * \sum_{i=5}^{12} g_i + 0.04 * \sum_{i=13}^{16} g_i \quad (4)$$

2) 完成第 1) 步内插之后, 开始进行原始格网正方形边中点 (图 3(b) 中菱形黑点) 的高程值, 基于待插点最邻近 4 点中 p_1, p_2 是由上一步进行距离加权所得, 已综合局部地形特征, 故该步骤内插点 q 可以使用 p_1, p_2, q_2, q_3 进行等距离加权计算获得, 即 4 点的平均高程值为图 2(b) 中插值点 q 的高程值。

3) 递归步骤 1) 和 2), 直到递归深度地形仿真需求。

根据正方形细分原理可知, 迭代 i 次后, 最小格网正方形

个数为 4^i , 假设原始格网为 $m \times n$ 的, 则格网点数为 $[2^i(m+1)-1] \times [2^i(n+1)-1]$, 可见插值点随迭代次数呈指数型增长, 一般经过 2~3 次迭代即可达到仿真要求。

1.2.3 时间复杂度分析

根据以上计算公式可以得出, 如果都是山地复杂地形每计算一个插值点计算量为 15 次加法和 3 次乘法, 并且每次计算插值可以根据以上计算步骤综合 Diamond-square 格网方形细分方法的对称特点可以省略权重计算, 与双线性插值^[11]的 10 次乘法和 15 次加法相比, 计算量已得到简化, 故该算法能够有效提高计算效率。

1.3 数据结构

为了方便采样点插入和查找, 本文算法的数据存储与处理过程汇总, 采用块状链表数据结构如下:

1) 以数据点的 x 坐标值为基准建立链表节点, 每个节点包括当前节点信息和指向下一节点指针。具体数据结构如下:

```
typedef struct node
{
    Cfpint data;
    struct node * next;
} ListNode;
```

2) 在每个节点上以结构体数组形式存储一组数据点, 每一个数据元素中包含数据点的 x 坐标、 y 坐标、地形类型 T 和高程值 h 信息。结构体数组元素数据结构设计如下:

```
Struct Cfpint
{
    double x;
    double y;
    int T;
    double h;
};
```

利用结构体创建二维数组 $data[M][N]$, 则块状链表整体结构如图 5 所示。

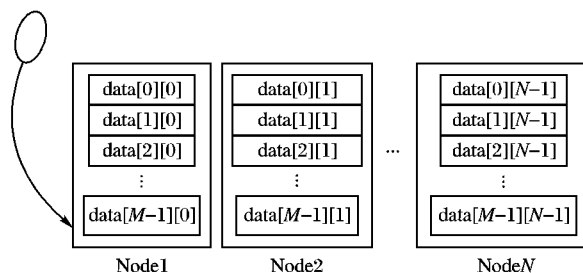


图 5 块状链表存储结构

2 实验结果及分析

本文算法在 VC++ 平台上用 OGRE 在 Intel i3, 2.33 GHz, 1 GB 内存的 PC 机上实现。

经过以上算法处理后, 离散数据点的密度已达到仿真要求, 为了实现更加真实、更加精确的绘制效果, 需要对以上细分结果进行三角化处理获得三角形格网地形, 通过编程添加纹理和光照等效果即可实现三维地形的最终显示^[12]。

为了达到真实效果和查看应用效果, 本文算法在实验过程中添加了水体纹理, 并将本文算法的实验结果与双线性插值方法进行了比较。图 6 是基于双线性插值的三维地形仿真效果, 图 7 是本文方法 3 次细化迭代三维地形仿真效果。其中, 实验数据为初始网格为 20×20 的高程数据。

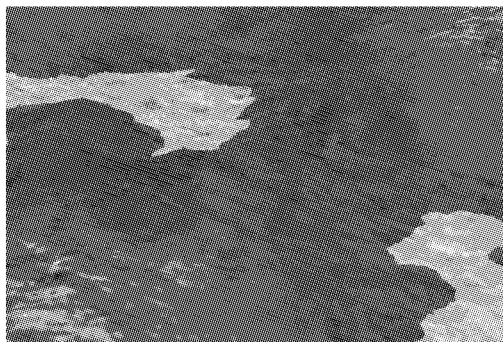


图 6 基于双线性插值算法的三维地形仿真效果

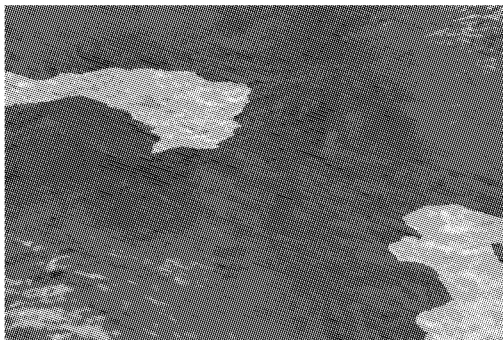


图 7 基于本文算法 3 次迭代的三维地形仿真效果

实验结果表明,基于双线性插值的三维仿真地形棱角比较明显,经本文算法 3 次迭代之后棱角已较平滑,能够有效提高地形真实感效果。在采样合理情况下,迭代次数超过一定阈值,随着迭代次数的增加,仿真效果并不会明显的变化,在实际应用中,一般迭代 2 或 3 次即可达到仿真要求。实验数据分别采用初始网格为 20×20 , 30×30 , 40×40 时,本文算法地形建模时间与双线性插值方法地形建模时间比较如表 1 所示。

表 1 两种算法地形建模时间比较 ms

初始 网格数	基于区域距离加权算法		双线性 插值算法
	迭代 2 次	迭代 3 次	
20×20	100	396	395
30×30	256	1 050	1 100
40×40	400	1 820	1 900

3 结语

由于现实自然景物比较复杂,真实模拟自然景物特别是

大规模地形的难度很大,因此特别需要探索出一些高效的算法。本文针对三维地形的区域特征,根据采样数据高程值信息对地形特征分类统计,提出了一种基于三维地形特征的距离加权方法现对地形的仿真,即将插值算法和地形特点有机地结合起来,这样可以快速、有效地生成具有高度真实感的三维地形。这种方法在尽量降低增加计算量的同时,提高了三维地形的绘制质量。本文方法在针对平坦区域较大的地形进行仿真时将简化为 Diamond-square 细分法(去除随机波动因子的),在对复杂区域较大地形仿真时算法的时间复杂度与双线性时间复杂度相当,在达到仿真要求的同时,有效提高了处理速度。利用本文算法,通过初始化地形高程数据、地形建模、纹理映射、显示地形图像这些过程,最终生成具有真实感的三维地形构建,在 3D 游戏、虚拟现实等实际应用中有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 齐敏,郝重阳,佟明安. 三维地形生成及实时显示技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 269 - 275.
- [2] 姜宏岸. 基于 NURBS 的地形仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 298 - 301.
- [3] 沈映政,董云,李北方. 规则格网数字高程模型的建立[J]. 地理空间信息, 2012, 10(1): 153 - 157.
- [4] 吕秀琴,张毅. 分形模拟在 DEM 内插中的应用[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 107 - 109.
- [5] 胡金星,马照亭. 基于格网划分的海量数据 Delaunay 三角剖分[J]. 测绘学报, 2004, 33(2): 163 - 167.
- [6] 梁俊,王琪,刘坤良,等. 基于随机中点位移法的三维地形模拟[J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 213 - 240.
- [7] 林继承,万旺根,崔滨,等. 一种超大规模地形场景的实时渲染算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 224 - 227.
- [8] 刘荣,谭兵. 地形数据的分形特征值计算与地形分类[J]. 解放军测绘研究所学报, 2002, 22(2): 17 - 20.
- [9] 梁俊,蒋金龙,赵雪莲,等. 随机中点位移在三维地形插值显示的使用分析[J]. 测绘科学, 2007, 32(3): 44 - 46.
- [10] 贾俊涛,翟京生,谭冀川. 海底地形数据的格网 DEM 内插方法[J]. 海洋测绘, 2003, 23(6): 24 - 26.
- [11] 王会鹏,周利莉,张杰. 一种基于区域的双三次图像插值算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(19): 216 - 218.
- [12] HJELMERVIK K T. Predicting sonar false alarm rate inflation using acoustic modeling and a high-resolution terrain model[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(2): 278 - 287.

(上接第 3360 页)

- [11] ALENIUS S, RUOTSALAINEN U. Bayesian image reconstruction for emission tomography based on median root prior[J]. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 1997, 24(3): 258 - 265.
- [12] ALENIUS S, RUOTSALAINEN U, ASTOLA J. Using local median as the location of the prior distribution in iterative emission tomography image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 3097 - 3107.
- [13] HSICAO I T, RANGARAJAN A, GINDI G. A new convex edge-preserving median prior with application to tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(5): 580 - 585.
- [14] DONOHO D L, JOHNSTONE J M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425 - 455.
- [15] TSAI D -M, CHAO S-M. An anisotropic diffusion-based defect detection for sputtered surfaces with inhomogeneous textures[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 325 - 338.
- [16] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. Forward-and-backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(7): 689 - 703.
- [17] LING J, BOVIK A C. Smoothing low-SNR molecular images via anisotropic median-diffusion[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(4): 377 - 384.
- [18] BLACK M J, SAPIRO G, MARIMONT D H. Robust anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 412 - 432.
- [19] 颜建华. 正电子发射断层图像重建算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.