

## 曲率分析的变分辨率数字高程模型建模算法\*

解杨敏<sup>1</sup>, 郭煜坤<sup>1,2</sup>, 邹怀武<sup>2</sup>, 史航<sup>2</sup>

(1. 上海大学 机械工程及自动化学院 上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200444;

2. 上海宇航工程系统研究所, 上海 201109)

**摘要:**传统的数字高程模型一般采用规则网格划分以简化建模过程,因其网格密度缺乏对地形变化的自适应性而不能兼顾地形表达的准确度和地形数据的冗余度,导致其在车辆动力学仿真等领域的应用有所局限。针对这一问题提出一种基于曲率分析的随机节点分布建模方法,其数据节点的密度根据种子节点周围的局域曲面曲率变化而相应变化,实现了在复杂、曲率较大的地形区域自动生成高分辨率数字节点集,而在平缓、曲率较小的区域实现低分辨率的节点分布。在获得此种节点集的基础上,利用 Delaunay 三角剖分结合三次多项式插值算法,得到满足高精度和低数据冗余度的变分辨率数字高程模型。利用传统规则网格地形模型与所提出的变分辨率数字高程模型对同一个用于星球车动力学仿真的复杂野外地形进行对比,验证了变分辨率算法的有效性。

**关键词:**数学高程建模;变分辨率;曲率分析;车辆动力学仿真

**中图分类号:**P208 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)06-170-07

## Varying resolution digital elevation model with surface curvature analysis

XIE Yangmin<sup>1</sup>, GUO Yukun<sup>1,2</sup>, ZOU Huaiwu<sup>2</sup>, SHI Hang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Digital elevation model with regular grids simplifies the modeling and analyzing processes. However, it fails to adapt to different terrain shapes and it is hard to obtain high surface accuracy and small dataset in the meantime, which limits its application in areas such as vehicle dynamic simulation. To solve this problem, a modeling method with varying data resolution was proposed. The node density varied according to the local surface curvature so that it ensures high data resolution around sharp changing areas and low data resolution around relatively flat area. Then Delaunay gridding method together with cubic interpolation was applied to obtain a digital elevation model with high surface accuracy and small data size using the resulting irregular node set. The proposed method was testified with a complex terrain surface used in rover simulation, and compared with the traditional regular grid model, which verified its advantages in achieving the two major objectives.

**Key words:** digital elevation modeling; varying resolution; surface curvature analysis; vehicle dynamics simulation

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)使用采样数据表达地形地貌,是对地形表面形态带有空间位置特征和地形属性特征的数字描述,在地形测绘、土木工程、气象、车辆动力学仿真等领域有着非常广泛的应用。其在车辆工程中的一个重要应用方向是提供车辆动力学建模及仿真中必要的地形环境信息。在这类应用中,地形信息表达的精准度,决定了仿真过程中车辆与地面的交互作用力的计算准确度,是得到在高度仿真环境下可靠的车辆动力学仿真结果的必要前

提<sup>[1-2]</sup>。但高精度的地形表达通常要求高分辨率的DEM,其对计算机的存储要求很高,同时大大降低了实时仿真计算速度,为了平衡这两者之间的矛盾,就需要在保证地形精度的前提下,尽可能地DEM进行简化<sup>[3]</sup>。而随着工程应用要求的提高和传感技术以及计算机技术的发展,获取海量地形数据DEM数据成为可能,而如何快速高效地对其进行表达及分析成为近年来数字地形分析应用的研究热点。一种研究思路是提高数据计算、分析、处理的性能,如增加计算机内存或者进

\* 收稿日期:2016-08-29

基金项目:上海市浦江人才计划资助项目(14PJ1431900);上海市空间飞行器机构重点实验室资助项目(YF-F08052014120025)

作者简介:解杨敏(1984—),女,河北廊坊人,讲师,博士,硕士生导师,E-mail:xiem@shu.edu.cn

行并行计算<sup>[4]</sup>;另一种则是在保有高精度特征的同时降低 DEM 数据量,如本文讨论的方法。

现有的简化方法分为两种,局部地形特征简化和全局地形简化,后者对于计算资源的要求相对较高,在一定程度上影响其实用性。常用的曲率计算模型主要有两种:Evans 模型<sup>[5]</sup>、Sharry 模型<sup>[6]</sup>。这些利用曲率分析的简化算法首先需要局部地形进行曲面拟合,再求其曲率值,较大程度上增加了工作的复杂程度;其次,以往的地形简化往往都是在原有地形数据的基础上进行“减法”,依据地形信息强度(Terrain Significance Information, TSI)指数通过设置不同的阈值提取候选地形特征点,从而重构得到不同简化尺度的结果 DEM<sup>[7]</sup>,但是单一阈值会使简化后的地形出现空洞。尽管有些简化算法利用 DEM 的高程信息对地形进行聚类<sup>[5]</sup>或采用多个阈值<sup>[7]</sup>,但仍然无法做到根据地形曲率分布进行连续地形简化。

传统的基于不规则三角网(Triangular Irregular Network, TIN)的数字高程模型实现过程可分为三种:分治算法、生长法和逐点插入法<sup>[8]</sup>。虽然传统的 TIN 可通过可变分辨率对地形进行描述,但在生成新数据点方面,依然做不到连续分布的地形改进。更具优势的 Grid-TIN 混合结构结合了 Grid(规则网格)和 TIN 二者优点。相对于前文提到的“减法”,该模型的生成过程是“加法”。可以在地形变化不大的区域采用 Grid 表示,在局部特征地形嵌入 TIN 的地形特征数据。尽管 Grid-TIN 混合结构结合了 Grid 和 TIN 二者优点,但它依然只是针对选择的局部地形的改进,不能自动地在全地形范围内进行连续的地形建模优化。

为了更好地解决以上问题,本文提出一套根据地形局域曲率分析进行变分辨率地形建模的算法。

## 1 DEM 建模算法

### 1.1 获取原始地形信息

原始地形的获取来源可以分为两类。

#### 1.1.1 已知数学模型的地形信息

这类地形模型中的地形元素一般接近规则的数学模型,或者比较简单,可以用数学模型简化。比如,用于汽车动力学仿真的月球表面地形,因为仿真本身只需要测试部分性能,比如爬坡、越障等,主要的地形要素,比如撞击坑和石块都可以简化为抛物线模型<sup>[9]</sup>。

#### 1.1.2 通过测量获得的地形信息

①直接从地面测量,例如利用 GPS、全站仪、野外测量等<sup>[10]</sup>;②根据航空或者航天影像,通过摄影测量途径获取,如立体坐标仪观测及空三加密法、解析测图、数字摄影测量等;③从现有地形图上采集,目前常用的办法是通过等高线和高程点建立 TIN;④利用合成孔径雷达干涉测量技术获取 DEM<sup>[11]</sup>,有全天候观测、穿透力强等优点。

### 1.2 随机节点生成算法

随机节点算法流程如图 1 所示,首先根据原始地形数据信息和车辆动力学仿真时需要的最小地形分辨率,得到总数为  $T$  的原始地形数据点集合  $D$ 。

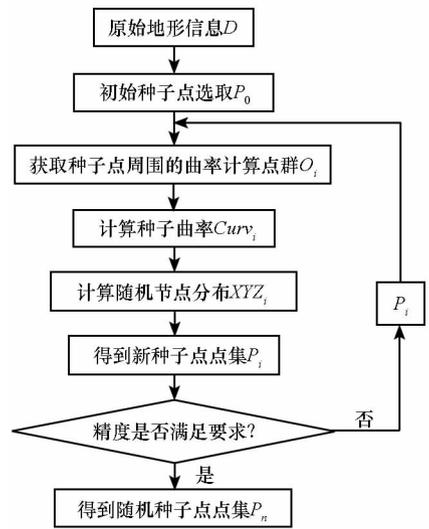


图 1 随机节点生成算法框图

Fig. 1 Diagram of random node generation algorithm

$$\begin{cases} D = \{d_1, d_2, \dots, d_T\} \\ d_i = \{x_{d_i}, y_{d_i}, z_{d_i}\}, i = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (1)$$

由于原始数据一般有冗余,先筛选初始种子点  $P_0$ ,数量为  $N_{P_0}$ ,如式(2)所示,初始种子点在  $(X, Y)$  平面上的投影形成正方形网格点集(如图 2 所示),初始种子点定义了 DEM 网络的初始分辨率,可认为是用于描述平坦区域地形的最低分辨率。

$$\begin{cases} P_0 = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_{P_0}}\} \\ d_i = \{x_{d_i}, y_{d_i}, z_{d_i}\}, i = 1, 2, \dots, N_{P_0} \end{cases} \quad (2)$$

得到初始种子点  $P_0$  之后,为了计算种子点的相邻域曲率,需要获得其一定范围内的相邻点点集作为曲率计算点群,第  $i$  个种子点的曲率计算点群记作  $O_i$ 。如图 2 所示,以任意种子点在  $(X, Y)$  平面上的投影点为中心,以  $d$  和  $d/2$  为边长的两个正方形上,分别选择 8 个相邻点,并采用三次

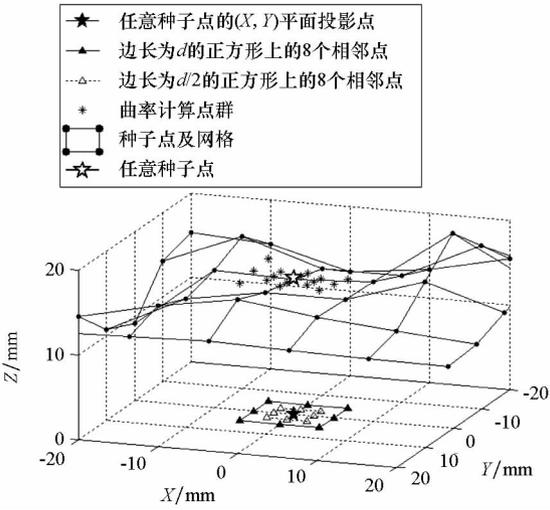


图 2 原始种子点的曲率计算点群示意图

Fig. 2 Diagram of curvature calculation point group of original seed point

多项式插值法得到其高程  $Z$ , 由此得到曲率计算点群  $O_i$ 。

采用数值曲面曲率计算的方法计算曲面曲率。由被估计点与其曲率计算点群得到的协方差矩阵  $C^{[12]}$ , 如式(3)所示, 式中  $O_i$  为曲率计算点群,  $k$  是值为 16 的曲率计算点群的个数,  $P_{ir}$  是单个种子点经过复制后得到的与  $O_i$  同维度的平铺矩阵。

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_{ir} - O_i) (P_{ir} - O_i)^T \quad (3)$$

对曲面表面的曲率的分析, 可以转化为对上述协方差矩阵的特征值的分析, 如式(4)所示。首先, 对所有特征值进行对角化排列, 得到特征值对角矩阵  $A$ , 如式(5)所示; 然后, 对特征值对角矩阵  $A$  进行列求和, 得到行向量  $s$ , 如式(6)所示。式(4)中,  $\lambda_j$  为协方差矩阵  $C$  的特征值,  $v_j$  为协方差矩阵  $C$  的特征向量。

$$C \cdot v_j = \lambda_j \cdot v_j, \quad j \in \{0, 1, \dots, k\} \quad (4)$$

$$A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k) \quad (5)$$

$$s = \left[ \sum_{i=1}^k A(:, 1), \sum_{i=1}^k A(:, 2), \dots, \sum_{i=1}^k A(:, 3) \right] \quad (6)$$

对特征值对角矩阵  $A$  的每一列求最小值, 用行向量  $c$  表示, 然后利用式(7)计算种子点的曲率值  $Curv$ 。

$$Curv = c \cdot s' \cdot (s \cdot s')^{-1} \quad (7)$$

获得第  $i$  个种子点的邻近曲面曲率  $Curv_i$  之后, 需要根据其曲率大小计算出其邻域内新插入节点的数量, 记作  $N_i$ , 设计连续“加法”算法。根据文献[13]中的设计简化密度计算公式的思想,

插入的新种子与曲率大小成正相关性, 对连续“加法”算法, 现给出三种方案。第一种,  $N_i$  与  $Curv_i$  成线性相关; 第二种,  $N_i$  与  $Curv_i$  成二次曲线, 可以保证在地形中弯曲程度小的区域精度满足的情况下, 着重补偿弯曲程度较大的区域; 第三种,  $N_i$  与  $Curv_i$  成开方曲线, 可以保证在地形中弯曲程度大的区域精度满足的情况下, 着重补偿弯曲程度小的区域。

$$N_i = k_1 \cdot Curv_i + b_1 \quad (8)$$

$$N_i = k_2 \cdot Curv_i^2 + b_2 \quad (9)$$

$$N_i = k_3 \cdot Curv_i^{0.5} + b_3 \quad (10)$$

获得第  $i$  个原始种子点对应的新生节点个数  $N_i$  后, 以第  $i$  个种子点在  $(X, Y)$  平面投影位置为中心, 以两倍于初始网格投影间距  $d$  为边长, 形成新生节点的一个正方形落点区域, 如图 3 所示。原理上, 这时可以按照标准化分布规律在这一区域内直接生成新节点集, 然而这样直接生成的点集, 由于其坐标分布的完全随机性有可能造成若干个新节点过于接近, 甚至重合的情况。因此, 这里采取分辨率可控的随机分布算法来插入新节点, 步骤如下。

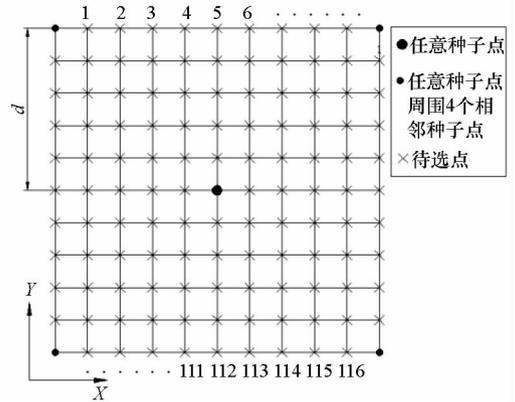


图 3 新种子点落点区域

Fig. 3 Placement area of new seeds

**步骤 1:** 选取一个密集网格构成待选点集, 在此选择以五倍于初始地形分辨率的密集网格划分落点区域, 即对图 3 中心圆点表示的第  $i$  个种子点和其周围 4 个相邻种子点所形成的区域。该区域总共包含 116 个  $\times$  号表示的候选点。

**步骤 2:** 将点集中的节点进行编号, 用标准化分布函数随机选取其中的  $N_i$  个点作为由第  $i$  个任意种子点区域曲面曲率产生的新种子节点。将筛选的编号所对应的图 3 中的节点  $x, y$  坐标写入矩阵  $XY_i$ 。

**步骤 3:** 对  $XY_i$  中第一个点利用三次多项式插值算法, 得到新种子点的高程  $Z$ , 从而得到新生种子点的空间坐标集合  $XYZ_i$ 。

$$XYZ_i = \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_{N_i}, y_{N_i}, z_{N_i})\} \quad (11)$$

对每一个原始种子点重复以上的工作所得到的新的节点集  $XYZ_i (i=1, 2, \dots, T)$  与原有种子点的合集可构成新的 DEM 节点集合,  $P_1 = P_0 \cup XYZ_1 \cup \dots \cup XYZ_T$ 。是否需要以上随机种子生成过程进行迭代,以获取更加高的地形分辨率,是由当前节点密度是否已经满足地图描绘精度要求来决定的。

### 1.3 变分辨率 DEM 网格划分

得到最终完整的地形节点集  $P_n$  后,还需将节点按一定算法生成单元网格来表达最终的地形信息。采用常见的 Delaunay 三角剖分算法进行单元网格生成,可将 1.2 节中得到的节点点集  $P_n$  生成不规则三角形网格。

### 1.4 DEM 地形描述误差

DEM 精度,是指所建立的 DEM 对真实地面描述的准确程度。这里对文献[14]中的 DEM 描述误差进行改进,由于 DEM 简化是相对于采样点的简化,在这里假设 DEM 在高程采样误差为零,研究的有限的 DEM 栅格采样点所构成的高程模型对实际地面的近似模拟误差,即为 DEM 地形描述误差  $E_i$ 。

栅格中点的高程与该栅格 3 个顶点的高程平均高程之差,可以被定义为该栅格的地形描述误差。因此,采用栅格窗口分析法实现  $E_i$  的提取。如图 4 所示,对于 DEM 单元栅格  $abc$ ,  $O_2$  为三角形的中心点,  $A, B, C, O$  为对应的地面点位置,假定在该栅格 3 个采样点  $A, B, C$  上的高程采样误差均为零;  $H_A, H_B, H_C$  及  $H_0$  分别为在  $A, B, C$  及  $O$  各点的高程,  $O_1$  为  $A, B, C$  3 个点的平均高程位置,将  $O$  点与  $O_1$  点的高程差作为单个栅格的地形描述误差  $e_i$ ,如式(12)所示。由于对于整体面积固定的地形,栅格越小、数量越多,累计的单个栅格地形描述误差  $e_i$  也就越多,为了排除栅格个数对整体地形描述误差  $E_i$  的影响,  $E_i$  的值取为加入地形单元面积权重后的值,如式(13)所示,其中  $S_i$  为第  $i$  个面片的面积。  $E_i$  数值上反映地形建模的精度,其值越小,精度越高。

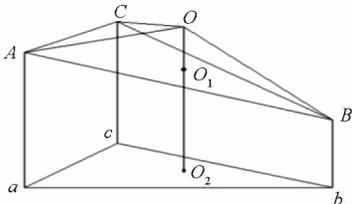


图4 DEM 高程采样栅格单元  
Fig. 4 DEM and grid unit model

$$e_i = H_0 - H_{O_1} = H_0 - (H_A + H_B + H_C)/3 \quad (12)$$

$$E_i = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot e_i}{S} \quad (13)$$

## 2 算例分析

在野外车辆动力学仿真过程中,地形模型作为其前提条件,要能够充分反映环境的真实性,特别是要具备一定能测试车辆性能的地形要素,比如用于避障的石块、测试爬坡能力的斜坡。为测试方法的可行性及有效性,选用的算例地形为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  的月球表面,其原始地形信息的数学模型取自 NASA 的研究成果,可用于星球车行进过程中的动力学仿真实验<sup>[15]</sup>。对同一个地形,用传统常用的规则网格模型与所提出的变分辨率模型进行对比,以验证后者在地形表达精确度及数据冗余管理方面的优势。为了更加清晰地阐述此次算例分析,从所选的月球原始地形信息介绍、地形数据在 ADAMS 软件中的表达、不同分辨率地形的对比 3 个方面加以说明。

### 2.1 原始地形信息

月球地形的主要地形元素为撞击坑和石块,其中撞击坑简化为双旋转抛物线模型,图 5 为撞击坑的简化模型纵向截图<sup>[8]</sup>。在文献[8]中,基于与理想模型的对比,采用双抛物线拟合并绕 Z 轴旋转来构造月球撞击坑模型。撞击坑的坑底部分采用式(14)计算,坑唇部分的模型采用式(15)计算,其几何模型如图 6 所示。

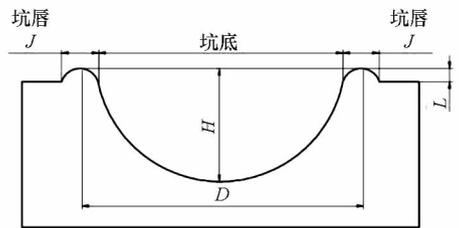


图5 月球表面撞击坑

Fig. 5 Impact craters on the lunar surface

$$z(x, y) = \frac{4 \times (x^2 + y^2)}{D^2} - L \quad (14)$$

$$z(x, y) = H + a \left[ \sqrt{(x^2 + y^2)} - \frac{D+J}{2} \right]^2 \quad (15)$$

其中:  $z$  为撞击坑模型上各点的高程数据;  $x$  为撞击坑模型上各点横坐标;  $y$  为撞击坑模型上各点纵坐标;  $D$  为坑直径;  $J$  为坑唇的宽度;  $H$  为坑深;  $L$  为坑唇高;  $a$  为抛物线系数。

采用理想的抛物线模型表示一个标准月球岩石的形状时,计算公式为:

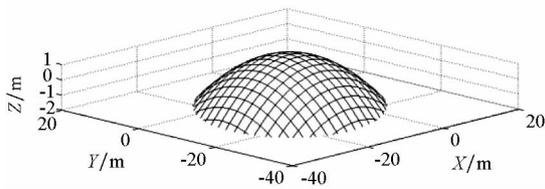


图 6 石块的简化模型

Fig. 6 Simplified model of rocks

$$z(x, y) = \frac{\bar{h} - (x^2 + y^2)\bar{h}}{\bar{d}^2}$$

式中,  $\bar{h}, \bar{d}$  分别为石块高度和宽度,  $\bar{h} = \bar{d}/2$ 。

### 2.2 地形数据表达

为了让新地形可以应用于动力学仿真,生成的 DEM 数据一般会使用某一种图形软件进行表达。MSC 公司的 ADAMS 软件是在工程和科研上均得到广泛应用的一款大型机械系统运动学、动力学仿真分析软件,在车辆动力学仿真应用中占据很大的市场份额。ADAMS 使用的 RDF 地形文件可以在地形可视化的同时增加路面的力学参数设定,直接与其车辆动力学仿真功能结合,这里以它为例来实现数字地形表达<sup>[8]</sup>。RDF 基本数据格式如下:

```
[UNITS]
LENGTH = 'm'
[MODEL]
METHOD = '3D'
[NODES]
NUMBER_OF_NODES = n
1 0.0 10.0 6.0
2 10.0 10.0 16.0
...
n 70.0 -70.0 13.0
[ELEMENTS]
NUMBER_OF_ELEMENTS = m
1 5 3 1.0
1 8 4 1.0
...
```

其中, NODES 为地面模型的节点,包括节点数量和坐标, NODES 下的数据即为三维地形的数据点, NUMBER\_OF\_NODES 为地形包含的节点数,以下每行表示一个点的三维坐标,对应其第一列的编号; ELEMENTS 为地面模型的元素,包括构成每个三角形面片的三个节点和每个面片中车轮与地面之间的摩擦系数, NUMBER\_OF\_ELEMENTS 为地形中的总网格数,其后为每一个网格包含节点的节点编号,如第一行表示 1, 5, 3 点构成一个三角网格。按照上述格式要求,在编

制 ADAMS 的 RDF 地形文件过程中,输入地形的节点数量和每个节点坐标以及由 Delaunay 三角剖分构成的每个三角形元素的三个节点和每个元素的摩擦系数。生成地面文件后, DEM 数据可以以 RDF 文件形式输入 ADAMS 软件中,为各种车辆动力学仿真提供支持。

### 2.3 变分辨率与固定分辨率 DEM 的比较及分析

利用 2.2 节中的方法,对采用不同网格方式生成的 ADAMS 软件地形模型进行表达,得到图 7 所示的 10 m × 10 m 的月球表面地形。为对比不同模型在地形表达上的差异,以图 7 中白色方框内的局部地形为例,在图 8 中显示分辨率为 0.05 m 的规则网格地形网格模型(见图 8(a)),分

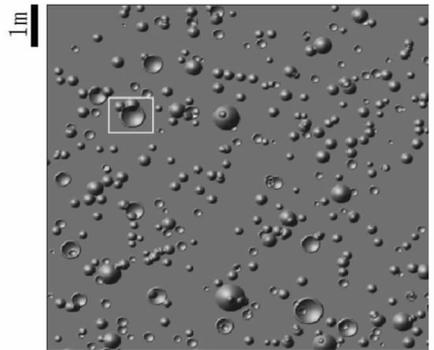
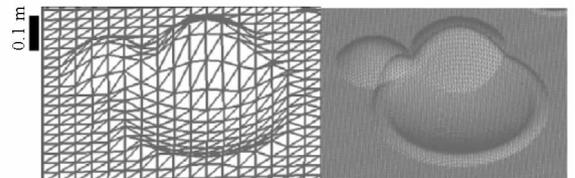


图 7 渲染地形

Fig. 7 Rendered terrain

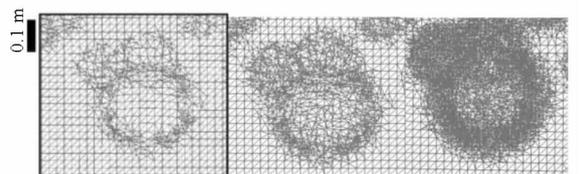


(a) 0.05 m 均匀栅格的局部地形图

(b) 0.01 m 均匀栅格的局部地形图

(a) Local DEMs with grid of 0.05 m

(b) Local DEMs with grid of 0.01 m



(c) 基于式(8)计算的变分辨率的局部地形图

(d) 基于式(9)计算的变分辨率的局部地形图

(e) 基于式(10)计算的变分辨率的局部地形图

(c) Local DEMs with resolutions based on equations (8)

(d) Local DEMs with resolutions based on equations (9)

(e) Local DEMs with resolutions based on equations (10)

图 8 不同数字地形模型网格对比

Fig. 8 Contrast of varying resolution digital elevation model grid

分辨率为 0.01 m 的规则网格地形网格模型(见图 8(b))以及在分辨率为 0.05 m 的规则网格地形的基础上,通过随机种子生成方法得到的变分辨率地形网格模型(见图 8(c)~(e))。根据之前的新种子与相关性曲线公式(8)~(10),设计三种曲线函数,如公式(16)所示,对应的地形分别为图 8(c)~(e)。

$$\begin{cases} N_i = 2200 \text{Curv}_i^2 \\ N_i = 505 \text{Curv}_i \\ N_i = 242 \sqrt{\text{Curv}_i} \end{cases} \quad (16)$$

通过五个地形可以看出,在分辨率低的规则网格地形模型中,地形拟合的曲面不够平滑和准确,不能完全真实地反映复杂地形在细节上的准确度;而在分辨率高的规则网格地形模型中,对平缓地形的节点数据使用则过于浪费。得到的变分辨率的地形则根据曲面地形的复杂性相应增加了节点密度。

从总节点个数、RDF 地形文件大小、DEM 地形描述误差  $E_i$  三个方面,对以上五个地形模型参数进行了比较,见表 1。

表 1 DEM 模型参数对比

Tab. 1 Contrast of DEM model parameters

不同分辨率地形	总节点 个数	RDF 地形 文件大小/ MB	$E_i$
0.05 m 分辨率地形	40 401	5.28	14.24
0.01 m 分辨率地形	1 002 001	131	0.09
0.01~0.05 m 变分辨率 地形 $c_1$	60 261	7.89	4.60
0.01~0.05 m 变分辨率 地形 $c_2$	156 939	20.6	4.49
0.01~0.05 m 变分辨率 地形 $c_3$	369 192	48.5	4.43

如表 1 所示,0.05 m 分辨率地形精度非常低,而 0.01 m 分辨率地形在曲率大的区域满足精度要求,在曲率小的区域则节点数相对过剩。变分辨率地形  $c_1, c_2, c_3$  则相对于高分辨率 DEM 在不同程度地减小数据量的基础上,相对低分辨率 DEM 大大减小了地形表达的误差。可见由变分辨率地形算法在没有大量增加文件大小的情况下提高了地形的局域精度。与此同时,采用式(16)中的不同随机种子点数与曲率关系,可以在保证满足曲率精度的前提下,影响全地形精度与数据节点数的相互关系,根据应用需求进行灵活选用。

相对于同样变分辨率地形的 Grid-TIN 混合

结构模型,采用的基于曲率分析的 TIN 模型在效果上类似,而在结构和应用方法上有所不同。由图 8 可以看出,在平坦的区域,变曲率模型给出了与 Grid 完全一致的规则表达;而在崎岖地形处则由不规则 TIN 数据构成,其分辨率与地形曲率一致。这与 Grid-TIN 混合结构模型达到的效果非常相似。然而从底层数据结构上来说,以 GT-DEM 为例,Grid-TIN 混合结构模型一般由一个全局 Grid 对象和多个局部 SubTIN 对象或特征对象共同组成<sup>[16]</sup>。而本文的方法则完全基于 TIN 数据结构进行表达,无须进行特征数据融合,而且与 Grid-TIN 混合结构模型相比,具有自动适应地形调整,无须人为改进的特点,因此在地形复杂度高的情况下具有一定优势。

### 3 结论

本文提出了一种新的基于曲率分析的变分辨率数学地形模型生成方法。其主要目的是在传统规则网格的基础上,利用曲率分析局域地形的起伏变化率,确定数学地形的局域分辨率,并据此重新划分三角网格,自动生成根据地形复杂度变化的数字模型表达,从而使生成的数字高程模型兼具地形表达准确及数据存储量小的优点。具备准确性的地形,才能够保证车辆动力学仿真中环境的准确性以及仿真结果的可靠性;数据存储量小的地形在通过计算机的仿真过程中能够有效减少仿真用时,特别是当需要大量仿真时,效果更加明显。

通过对典型月球地貌这一复杂地形的建模比较,提出的变分辨率算法相对高密度的规则网格在保持同样地形表达精度的同时大大减小了所需数据量;而相对于低密度的规则网格则在数据增加不大的情况下大大提升了地形的表达精度,兼顾了地形精度及数据存储两方面的要求。因此在用于车辆动力学仿真中的地形建模方面有着广阔的应用前景。

目前,由于计算机操作系统处理大数据量的能力仍有限制,应用于气象、地理、测绘等方面地形可视化的 DEM 数据对内外存储的消耗非常大,因此变分辨率算法在这些方面同样具有很大的应用潜力。此外,最终实现的是不规则网格 TIN 模型,若在一些 DEM 的分析应用中使用规则网格模型,则需进行模型转换。TIN 转成规则网格 DEM 可以看作由普通的不规则 DEM 生成规则 DEM 的过程。一般方法是按要求的分辨率大小和方向生成规则格网,对每一个格网搜索最近的

TIN 数据点,按线性或非线性插值函数计算网格点高程<sup>[17]</sup>。这样的应用转换增加了使用 DEM 的计算量,但若在应用中实现大规模数据点的 TIN 存储和局部地形规则网格转换的并用,则可以极大程度上兼具 TIN 模型数据存储量小和规则网格数据分析处理算法简单的优点。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu J, Wang Y C, Zhou C, et al. A navigation simulation system of lunar rover[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2008: 556-561.
- [2] Li W H, Ding L, Gao H B, et al. Rover simulation based on terramechanics and dynamics[J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50 (3): 199-210.
- [3] 曹志冬, 刘学军, 王叶飞, 等. 基于 DEM 的地形简化方法对比分析[J]. 现代测绘, 2005, 28(1): 9-13.  
CAO Zhidong, LIU Xuejun, WANG Yefei, et al. Contrastive analysis of methods of terrain simplification based on DEM[J]. Modern Surveying and Mapping, 2005, 28(1): 9-13. (in Chinese)
- [4] 宋效东, 刘学军, 汤国安, 等. DEM 与地形分析的并行计算[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(4): 1-7.  
SONG Xiaodong, LIU Xuejun, TANG Guoan, et al. Parallel computing of the digital elevation model and digital terrain analysis[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(4): 1-7. (in Chinese)
- [5] Evans I. What do terrain statistics really mean[M]// Lane S N, Richards K S, Chandler J H. Land Form Monitoring Modeling and Analysis. USA: John Wiley & Sons Press, 1998: 119-138.
- [6] Shary P A, Sharaya L S, Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis[J]. Geoderma, 2002, 107(1/2): 1-32.
- [7] 董有福, 汤国安. 利用地形信息强度进行 DEM 地形简化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(3): 353-357.  
DONG Youfu, TANG Guoan. Research on terrain simplification using terrain significance information index from Digital Elevation Models [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(3): 353-357. (in Chinese)
- [8] 刘局科. 基于 GRID/TIN 混合结构的地形场景数据组织方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.  
LIU Juke. Research on the method of terrain scene data organization based on grid/tin hybrid structure[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015. (in Chinese)
- [9] 张玥. 月球表面地形数据分析及仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.  
ZHANG Yue. Analysis and simulation about luna surface terrain data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 陈敬周. 数字高程模型的生成与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.  
CHEN Jingzhou. Generation and application of DEM [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 韦海军, 朱炬波, 梁甸农. 基于粗精度 DEM 的复杂地形 InSAR 基线估计方法[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 74-78, 89.  
WEI Haijun, ZHU Jubo, LIANG Diannong. An accurate baseline estimate method for rugged terrain utilize rough DEM[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(1): 74-78, 89. (in Chinese)
- [12] Radu R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[M]. Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 2012: 113-115.
- [13] 代星, 崔国, 胡怀宇. 基于曲率特征的点云快速简化算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(11): 3030-3032.  
DAI Xing, CUI Hanguo, HU Huaiyu. Fast data point simplification algorithm based on curvature character [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(11): 3030-3032. (in Chinese)
- [14] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 361-365.  
TANG Guoan, GONG Jianya, CHEN Zhengjiang, et al. A simulation on the accuracy of DEM terrain representation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 361-365. (in Chinese)
- [15] Hou S N. Power spectral density function for cratered and particle lunar surface elevations-case 320; NASA CR-121314 [R]. USA: NASA, 1971.
- [16] 赵卫东, 徐媛, 马雷, 等. 顾及梯田地形的 Grid-TIN 混合格网数字高程模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 11-16, 127.  
ZHAO Weidong, XU Yuan, MA Lei, et al. Research on the terraces-considered grid-tin hybrid mesh DEM[J]. Geography and Geo-information Science, 2013, 29(2): 11-16, 127. (in Chinese)
- [17] 顾耀林, 张萍. 规则 DEM 地形数据转换为 TIN 模型的迭代搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(23): 69-71, 76.  
GU Yaolin, ZHANG Ping. Iteration searching algorithm of transition from regular DEM terrain data to TIN model[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(23): 69-71, 76. (in Chinese)