

# 月面形貌仿真设计及在嫦娥三号任务中的应用

李巍<sup>1</sup>, 孙义威<sup>1</sup>, 万文辉<sup>1</sup>, 刘召芹<sup>1</sup>, 胡文敏<sup>1,3</sup>,  
岳宗玉<sup>1</sup>, 邸凯昌<sup>1</sup>, 苗毅<sup>2</sup>, 詹磊<sup>2</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 3. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 月面形貌仿真可以为嫦娥三号着陆前地形建立及视觉导航仿真测试提供逼真的三维月面环境。利用分形随机算法并结合月面撞击坑与石块的数学分布模型, 在实现月面数字地形的基础上利用纹理映射和纹理融合的方法为月面地形添加纹理, 完成了月面逼真三维环境的构建。结合导航相机的外方位元素和光照条件, 实现了对该仿真月面环境的模拟环拍, 支撑了嫦娥三号发射前月球车导航相机数据获取、地形建立、通行代价图计算、月球车路径规划等遥操作任务过程仿真测试。测试结果表明, 仿真月面三维地形具有良好的视觉效果, 满足了巡视器导航相机测试验证对精细月面地形和纹理的需求, 为导航相机测试验证提供了有效的月面形貌仿真数据。

**关键词:** 嫦娥三号; 月面仿真; 分形地形; 纹理融合

DOI: 10.11821/dlyj201406005

## 1 引言

“玉兔号”月球车自2013年12月15日实现两器分离后, 至2014年1月17日顺利行驶了114.8 m, 在月球车进行科学探测行驶的过程中, 导航相机作为玉兔号的“眼睛”起到了至关重要的作用, 通过导航相机获取的月面图像, 利用摄影测量方法生成高分辨率的DEM和DOM是月球车行驶路径规划的基础, 为月球车的高精度定位和导航提供了准确的地形及位置信息。这些工作流程的有效性与发射前的模拟试验场实验验证以及大量仿真测试验证密不可分。在导航相机前期测试验证过程中, 利用计算机生成逼真的三维数字月面地形环境无疑是一种低成本、高效率的方式<sup>[1]</sup>。利用数字方式不仅能生成各种不同类型的月面地形环境, 而且由于仿真中各种参数已知, 可以对导航相机的各项测量参数进行精确的验证。

目前针对三维地形仿真模拟主要分为两类方法: 第一类是基于真实地形数据的地形生成, 嫦娥三号着陆前, 虽然嫦娥二号也获取了分辨率高达1.5 m的立体影像数据, 美国的月球勘察轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)获取的影像部分地区分辨率达到0.5 m, 但对于导航相机验证需要0.02 m DOM来说分辨率还是过低, 而且仿真场景无法根据设计需求实现变化; 第二类是基于数据拟合和分形理论<sup>[2]</sup>的地形仿真技术, 此种方法可以根据设计需要生成不同地形。分形理论是近年来飞速发展起来的数学分支, 其

收稿日期: 2014-03-08; 修订日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201480, 41171355)

作者简介: 李巍(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为行星遥感制图。E-mail: waye\_lee2000@aliyun.com

通信作者: 刘召芹(1973-), 男, 副研究员, 主要研究方向为行星遥感制图与导航定位。E-mail: liuzq@radi.ac.cn

利用在自然界中无处不在的分数维现象和“自相似”特征对景物进行模拟,在军事模拟和电影动画中也得到了广泛的应用<sup>[3-9]</sup>。在月表地形的模拟上,杨艳春等利用分形技术生成月面基础地形,进而基于两点假设和统计信息添加陨石坑和石块模型<sup>[10-13]</sup>,用于月球车动力学仿真验证;刘维敏采用分形技术生成地形对导航相机成像仿真进行了研究<sup>[14]</sup>;谢圆等从月球车任务规划的需要模拟生成了月海数字地形用于月球车任务规划仿真<sup>[15,16]</sup>。以上这些研究均对月面地形的生成进行了介绍,但对于月面纹理仿真均没有深入,特别是对月球车导航相机仿真验证来说,月面纹理仿真的精细程度直接影响着导航相机影像匹配精度和地形重建精度的测试验证。

嫦娥三号月球车携带的导航相机主要作用是月球车的导航定位提供周围地形环境信息。根据月球车的探测流程,月球车每行进10 m左右即停下来利用导航相机拍摄周围环境,通过云台旋转获取各方位图像,进而生成0.02 m的DEM和DOM,用于月球车的行驶路径规划和导航。本文研究面向月球车导航相机验证的精细月表地形和纹理仿真技术,首先利用分形理论根据工程任务测试需要生成不同地形类型、不同坡度的月面地形,在地形的基础上根据月面撞击坑及石块的分布特征添加地形要素,融合成新的地形后再利用纹理映射和纹理融合的技术生成与地形吻合的纹理信息,并在场景中模拟太阳光照以构建逼真的三维数字月面环境。根据导航相机拍摄指令完成导航相机数据获取的仿真验证,为地形重建及导航定位提供验证数据。

## 2 月面形貌仿真设计

嫦娥三号预着陆区位于雨海虹湾地区<sup>[17]</sup>,该地区地势较为平缓,有利于着陆器实现软着陆,另外,月面上还覆盖了许多大小不一的环形坑和石块,对这些撞击坑和石块的仿真和建模不仅是月面形貌仿真的关键,也对月球车任务的规划有着至关重要的意义<sup>[10]</sup>。因此,在仿真月面地形的过程中,首先要考虑生成相对平坦的基础地形,并在此基础上通过对撞击坑和石块进行建模,并按照一定的分布规律把它们融合到基础地形中,从而完成相对完整的月面地形仿真。

### 2.1 基础地形仿真设计原理

分形地形建模的方法有很多种,其中中点位移法因为方法简洁且速度快而应用最为广泛。本文中采用分形随机算法<sup>[3,18]</sup>来生成月面地形,通过中点位移的方式实现不同点之间的插值,并给每个插值点增加一定的随机量,从而形成随机分形地形表面。如图1所示,将所要表达的地形区域定义为一个二维数组,以图中5×5的数组为例,首先以数组的4个角点为种子点,通过插值的方式得到图1(b)的中点的初始高度值,并给新产生的细分点一定的随机位移量;在得到中点的高度值之后,利用同样的方法可以得到图1(c)中4个边界中点的高度值。通过若干次迭代,最终完成三维月面地形的模拟。具体的算法过程如下:

(1) 在正方形中点(O)处生成一个随机量 $R_o$ ,计算O点处的高度值:

$$H_o = \frac{1}{4}(H_A + H_B + H_C + H_D) + R_o \quad (1)$$

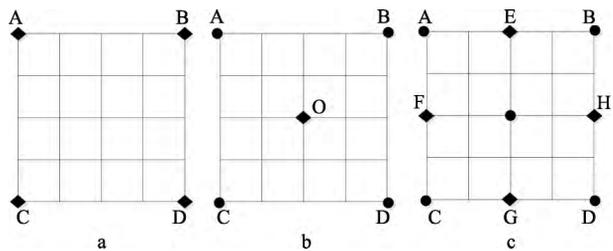


图1 正方形细分方法  
Fig.1 Diamond-square algorithm

如图1所示,将所要表达的地形区域定义为一个二维数组,以图中5×5的数组为例,首先以数组的4个角点为种子点,通过插值的方式得到图1(b)的中点的初始高度值,并给新产生的细分点一定的随机位移量;在得到中点的高度值之后,利用同样的方法可以得到图1(c)中4个边界中点的高度值。通过若干次迭代,最终完成三维月面地形的模拟。具体的算法过程如下:

(2) 在正方形每条边的中心处(点E、F、G、H)各生成一个随机量 $R_E, R_F, R_G, R_H$ , 计算各点的高度值如下:

$$\begin{cases} H_E = \frac{1}{3}(H_A + H_B + H_O) + R_E \\ H_F = \frac{1}{3}(H_A + H_C + H_O) + R_F \\ H_G = \frac{1}{3}(H_C + H_D + H_O) + R_G \\ H_H = \frac{1}{3}(H_B + H_D + H_O) + R_H \end{cases} \quad (2)$$

(3) 根据产生的4个新网格部分重复上述两步骤直到地形数据细分到需求的粗细程度为止。

随机量的使用主要是增加地形起伏高度的随机性, 使地形模拟更为真实。本文中采用高斯分布模型, 同时, 让每次产生的随机变量乘以一个地形变化的比例系数和一个分形控制参数, 以防止地形出现明显的周期性, 随机变量的计算公式如下:

$$R = \left(\frac{d}{2^k}\right)^H \sigma \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \cdot \text{gauss}() \quad (3)$$

式中:  $\left(\frac{1}{2^k}\right)^H$  为比例系数;  $H$  为分形控制参数, 值越小, 表面越粗糙;  $\text{gauss}() \sim N(0, 1)$ ;  $\sigma$  为地形方差参数;  $d$  是格网间距;  $k$  为迭代步数。

由于随机量的不连续性, 生成的地形经常会有“毛刺”的现象, 为此采用基于局部地形连续性的平滑方法, 利用二维曲面来拟合局部区域的地形。首先, 利用最小二乘方法对局部区域内的三维点进行拟合, 得到二维曲面的拟合参数。然后, 逐点判断拟合的高程值与原高程值之间的差异, 如果二者之间差异高于设定的阈值, 则该点为高程突变点, 对其进行修正。

## 2.2 模型仿真

### (1) 撞击坑仿真

月球表面的撞击坑根据其大小及规模可分为成层地形表面的撞击坑、简单撞击坑、中央峰撞击坑、环形山撞击坑四类<sup>[9]</sup>。本文中仅对简单撞击坑进行建模<sup>[1]</sup>。坑洞的类型与尺寸、成分、碎片和撞击时的角度都有关系, 简单撞击坑的坑洞如图2所示, 从图中可以看出, 坑洞的参数主要有撞击坑直径和坑底深度描述。因此, 坑洞的方程可用椭圆抛物面表示, 其标准

方程为  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z$ 。具体方法如下:

椭圆抛物面以YOZ面和ZOX面为对称面,  $z$ 轴为对称轴, 顶点为 $O(0, 0, 0)$ ; 用平面 $z=h$  ( $h \geq 0$ )截曲面得交线方程为:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2h \\ z = h \end{cases} \quad (4)$$

当 $h=0$ 时退化为顶点; 当 $h>0$ 时交线是椭圆, 可用以模拟椭圆撞击坑, 并且椭圆的



图2 月面简单撞击坑示例(CE-2影像, 19.59W, 43.47N)

Fig. 2 A simple crater(CE-2 image, 19.59W, 43.47N)

长、短轴半径分别为  $a\sqrt{2h}$ 、 $b\sqrt{2h}$ ,  $h$  可表示撞击坑的深度。椭圆的4个顶点分别在坐标平面  $y=0$  和  $x=0$  上, 曲面在这两个对称平面上的截线是抛物线, 方程分别是:

$$\begin{cases} x^2 = 2a^2z \\ y = 0 \end{cases} \text{ 和 } \begin{cases} x^2 = 2b^2z \\ x = 0 \end{cases} \quad (5)$$

如果撞击坑在月表可近似成圆形, 那么  $a=b$ , 方程变为  $x^2 + y^2 = 2a^2z$ , 上述中的椭圆变成圆, 上述中的两个抛物线方程参数也完全相同, 可以描述大多数的撞击坑, 参数  $a$  等于撞击坑的半径。注意此时还有一个参数, 即撞击坑的深度  $h$ 。

因此, 简单撞击坑方程的完整形式可以表达为:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z \\ z \leq h \end{cases} \quad (6)$$

式中: 参数  $a$ 、 $b$  分别表示椭圆撞击坑的长短轴;  $h$  表示深度; 当  $a=b$  时, 退化为圆形撞击坑。

另外, 连续的溅射物从撞击坑边缘向外延伸大约1个半径的距离, 和撞击坑大小无关。著名的爆炸试验数据表明, 溅射席的厚度  $\delta$  是到撞击坑中心距离的函数<sup>[20]</sup>:

$$\delta = 0.14(1.19R)^{0.74}(1.19r/R)^{-3.0} \quad r \geq R \quad (7)$$

式中:  $r$  为坑沿点到撞击坑中心的距离;  $R$  是撞击坑的半径。

## (2) 石块仿真

石块模型首先通过 3D MAX 建模生成, 形成具有一定数量的石块模型库, 然而石块模型库中的模型个数有限, 而实际的地形表面上分布的石块, 不论是形状还是尺寸上, 都远远地超出模型库中的石块模型数。因此, 为了避免仿真的地形中石块过于单调, 在石块融合到地形的过程中, 通过随机地变换其放置在地形上的角度和大小, 从而达到不同的仿真结果。

### 2.3 模型与地形的融合

在月面场景仿真的过程中月面地形数据一般是用栅格数据表达。为了使添加的石块与撞击坑模型能够融入到地形中, 需要将添加的模型表面与地形表面做求交运算, 根据求交运算的结果和模型类型改变局部地形值。将模型与地形融合的算法流程如图3所示。

## 3 纹理仿真

### 3.1 纹理映射

对于随机生成的地形, 由于不存在其先验的纹理信息, 可以根据每个点的高度值与周边一定范围邻域内的点的高度值的关系来确定该点的起伏状况, 并由此来决定相应的纹理样本进行映射。

在地形分形计算的过程中, 相邻元素之间的高度值数据有一定的联系, 与自然界地形纹理特征相符, 因此可以根据该关系来确定相应的纹理值。以8领域为例, 对于每个点而言, 分别计算其与8领域点的高程差, 然后计算领域内所有高程差的总和  $D_i$ , 最后根据  $D_i$  的值来决定该点的纹理。当选用纹理库中的样图纹理时, 高程值的映射方式为分层映射。假设采用三层纹理生成某个区域内的地形纹理效果, 该区高程值范围为  $[H_{\min}, H_{\max}]$ , 选用的三种纹理分记为  $T_1, T_2, T_3$ , 纹理阈值分为  $H_1, H_2$ , 则高程映射过程如下:

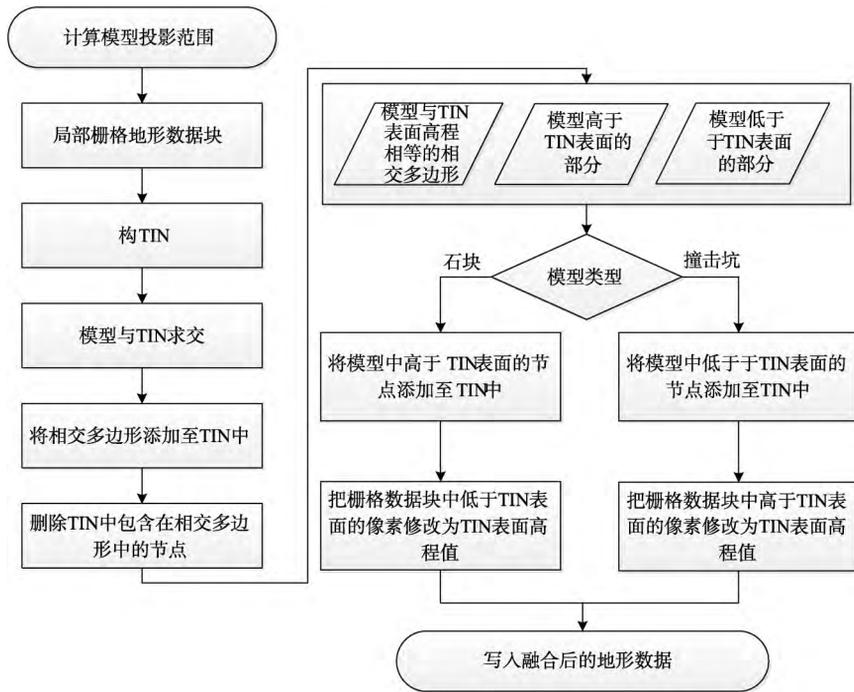


图3 撞击坑和石块模型与地形融合流程图  
 Fig.3 Flowchart of merging crater and rock models into terrain

$$\begin{cases} T = T_1 & D_i \in [H_{\min}, H_1] \\ T = T_2 & D_i \in [H_1, H_2] \\ T = T_3 & D_i \in [H_2, H_{\max}] \end{cases} \quad (8)$$

式中： $T$ 代表纹理值。

### 3.2 纹理融合

在仿真的过程中，也可以充分地利用已有的纹理进行仿真。首先根据仿真区域的地形条件，选取典型地貌的纹理作为样本；在改变原有的地形特征之后，需要对相应区域的纹理进行改变，以适应相应的地形改变，具体来讲，通过高斯加权的方法，在边缘区域使用原有地形的纹理，在中心区域使用样本的纹理，最终实现融合后的纹理在边缘区域实现平滑地过渡，同时又能很好地实现局部区域的纹理仿真。其中，高斯卷积核为：

$$P_{x,y} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-m-1)^2+(y-m-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

式中： $\sigma$ 为方差； $m$ 为核矩阵的维数，一般取为撞击坑直径大小的一半。图4和图5分别给出了撞击坑纹理融合前后的结果图，可以看到，利用高斯加权方法进行局部纹理的融合，能够实现从融合区域纹理到样本纹理的平滑过渡，目视效果良好。

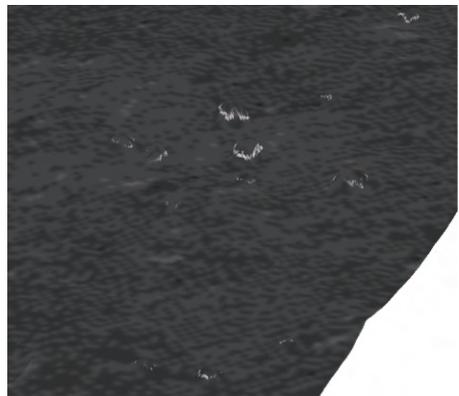


图4 纹理融合前  
 Fig.4 Terrain texture before merging

## 4 结果分析

### 4.1 模拟数字月面地形图

根据以往获得的月面地形信息,可以从石块和撞击坑的分布图中拟合得到平缓月海、粗糙月海以及高地中石块和撞击坑分布的数学模型<sup>[21]</sup>。文中以平缓月海为仿真对象,建立月面数字地形,用到的石块和撞击坑的分布模型分别为:

$$\text{撞击坑: } \lg N = -2.589 \lg D - 3.3955$$

$$\text{石块: } \lg N = \begin{cases} -2 \lg D - 1 & D \leq 40 \\ -3 \lg D + 0.602 & D > 40 \end{cases} \quad (10)$$

该模型表示单位面积内超过某一直径 $D$ 的石块或撞击坑数目为 $N$ 。

考虑到导航相机的视场角和可视范围等条件,本文模拟的范围为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,分辨率为 $0.02 \text{ m}$ ,石块和撞击坑的最小直径均为 $0.05 \text{ m}$ ,生成的三维数字地形如图6所示。此外,还利用分层映射的方式,为地形生成纹理,如图7所示。可以看到,纹理信息使得生成的场景更加逼真,具有很好的视觉效果。

### 4.2 导航相机环拍测试

为了进一步验证嫦娥三号遥操作系统中基于视觉的地形重建及视觉导航定位等方法的有效性与精度,利用Open Scene Graph(OSG)技术在月表仿真地形与纹理数据基础上,结合光照条件构建符合月表环境特征的三维场景,并依据月球车上导航相机真实相机参数(表1)生成相机图像仿真数据。月球车导航相机是一对立体相机,基线长度 $270 \text{ mm}$ ,环拍实验设置相机拍摄间隔为 $30^\circ$ , $360^\circ$ 一周全景每个相机需要拍摄12幅影像,导航相机左相机获取的图像如图8所示,从影像上可以清晰得看到仿真的撞击坑和石块以及纹理信息,能够满足后续地形重建的实验需求。

导航相机基于仿真月貌环境获取立体影像数据后,利用仿真的立体影像测试后续的地形建立算法,生成月球车周围的数字高程模型和正射影像图;基于数字高程模型图进一步测试通行代价图的计算、月球车导航路径规划等任务过程,有效地支撑了嫦娥三号遥操作任务过程的仿真测试。

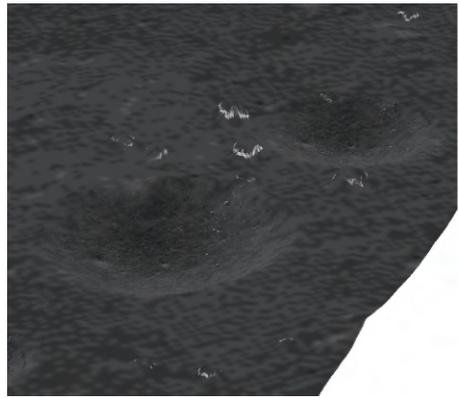


图5 纹理融合后

Fig.5 Terrain texture after merging

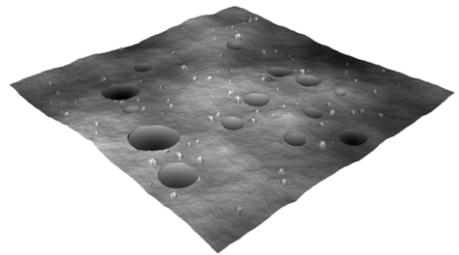


图6 地形仿真

Fig.6 Result of terrain simulation

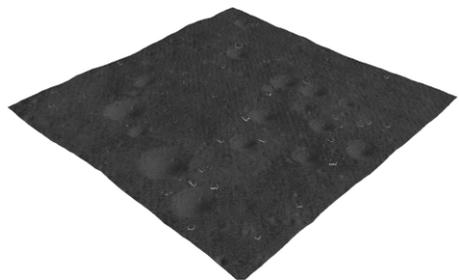


图7 纹理映射和融合

Fig.7 Result of texture mapping and merging

表1 导航相机参数

Tab.1 Parameters of navigation cameras

影像模式	像幅大小(pixel)	视场角( $^\circ$ )	焦距(mm)	基线长度(mm)
全色	1024 × 1024	46.6	17.7	270

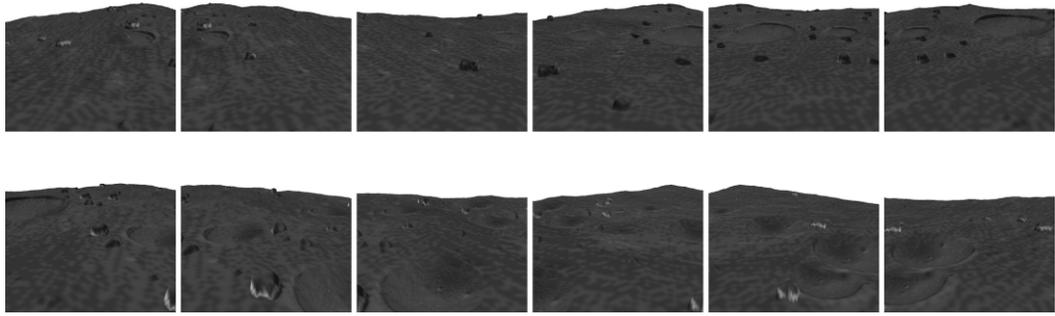


图 8 导航相机环拍图

Fig.8 Result of panoramic imaging using Navcam camera

## 5 结论

本文从嫦娥三号任务导航相机测试验证的实际需要出发,综合考虑月面环境的特征,完成了月面地形、月面纹理以及仿真地形的模拟拍照实验。仿真结果表明,本文方法能够有效地模拟月球表面精细的地形地物信息,具有较强的真实感,能够满足导航相机测试验证的需求。具体结论如下:

(1) 采用分形随机的方法生成月面基础地形,并根据以往的月面地形信息,得到石块和撞击坑分布的数学模型,生成了符合月球表面特征的详细地形。

(2) 通过分层映射和纹理融合的方法,实现了随机地形纹理从无到有、由粗到细的纹理仿真,从而进一步增加了仿真地形的真实感。

(3) 模拟了嫦娥三号导航相机的拍照过程,通过对生成的仿真地形进行环拍操作,支撑了嫦娥三号发射前月球车导航相机数据获取、地形建立、通行代价图计算、月球车路径规划等遥操作任务过程仿真测试。

## 参考文献(References)

- [1] 张玥. 月球表面地形数据分析及仿真研究. 北京: 国防科学技术大学硕士学位论文, 2008. [Zhang Yue. Analysis and simulation about lunar surface terrain data. Beijing: Master Dissertation of National University of Defence Technology, 2008.]
- [2] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. Macmillan: Times Books, 1983.
- [3] Miller G S P. The definition and rendering of terrain maps. ACM SIGGRAPH Computer Graphics. ACM, 1986, 20(4): 39-48.
- [4] 林岚. 基于分形理论的高精度地形绘制算法研究. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2006. [Lin Lan. Research on rendering of high-precision terrain based on fractal. Wuhan: Doctoral Dissertation of Huazhong University of Science and Technology, 2006.]
- [5] 孙鹤. 基于分形理论的海底三维地形生成技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2011. [Sun He. Study on visualization technology of 3D seafloor terrain based on fractal theory. Harbin: Master Dissertation of Harbin Engineering University, 2011.]
- [6] 徐琼燕, 李俊峰, 吴印华. 基于分形理论的三维地形生成算法研究与实现. 计算机与现代化, 2011, (5): 70-73. [Xu Qiongyan, Li Junfeng, Wu Yinhua. Research and application of 3D terrain generation algorithm based on fractal theory. Computer and Modernization, 2011, (5): 70-73.]
- [7] 英振华. 基于分形理论的地形场景实时真实感绘制. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2005. [Ying Zhenghua. Realistic rendering of 3D terrain scenes Based on fractal theory. Chongqing: Master Dissertation of Master Dissertation of Chongqing University, 2005.]
- [8] 英振华, 石锐, 胡捷. 基于分形理论的三维地形场景的真实感绘制. 计算机仿真, 2006, 23(5): 160-162. [Ying Zhenghua, Shi Rui, Hu Jie. Realistic rendering of 3D terrain scenes based on fractal theory. Computer Simulation, 2006, 23(5):

- 160-162.]
- [9] 俞静, 石晶晶. 基于分形理论的三维模拟地形仿真. 成都大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 249-252. [Yu Jing, Shi Jingjing. Emulation of three-dimension terrain based on fractal theory. Journal of Chengdu University: Natural Science Edition, 2011, 30(3): 249-252.]
- [10] 杨艳春, 鲍劲松, 金烨. 一种真实感虚拟月面建模方法. 系统仿真实报, 2007, 19(11): 2515-2518. [Yang Yanchun, Bao Jingsong, Jin Ye. Realistic virtual lunar surface simulation method. Journal of System Simulation, 2007, 19(11):2515-2518.]
- [11] 王伟, 鲍劲松, 金烨, 等. 月球车虚拟仿真系统中自主导航的实现. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 65-69. [Wang Wei, Bao Jingsong, Jin Ye, et al. The realizing of autonomous navigation in lunar rover virtual simulation system. Machine Design and Research, 2009, 25(2):65-69.]
- [12] 杨艳春. 虚拟环境下月球车仿真试验系统及其若干关键技术研究. 上海: 上海交通大学博士学位论文, 2009. [Yang Yanchun. A Virtual environment for lunar rover's simulation and study of its key technologies. Shanghai: Doctoral Dissertation of Shanghai Jiaotong University, 2009.]
- [13] 杨艳春, 王巍, 鲍劲松, 等. 月球车仿真系统中若干视景真实感实现技术. 计算机仿真, 2009, (8): 29-32. [Yang Yanchun, Wang Wei, Bao Jingsong, et al. Several realistic scene simulation technologies in a lunar rover simulation. Computer Simulation, 2009, (8): 29-32.]
- [14] 刘维敏. 月面形貌模拟及成像仿真技术研究. 郑州: 解放军信息工程大学硕士学位论文, 2010. [Liu Weimin. Research on lunar surface geomorphic and imaging simulation. Zhengzhou: Master Dissertation of PLA Information Engineering University, 2010.]
- [15] 谢圆, 周建亮, 王永. 面向月球车任务规划的环境建模技术. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, (S1): 292-296. [Xie Yuan, Zhou Jianliang, Wang Yong. Environment modeling for mission planning of lunar rovers. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, (S1): 292-296.]
- [16] 谢圆. 月球车遥操作中的任务规划技术研究. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文, 2011. [Xie Yuan. Mission planning technology in teleoperation of lunar rovers. Hefei: Doctoral Dissertation of University of Science and Technology of China, 2011.]
- [17] 闫凯, 欧阳自远. 嫦娥三号: 登月!. 科学世界, 2013, (9): 8-13. [Yan Kai, Ouyang Ziyuan. CE-3: Landing!. Science World, 2013, (9):8-13.]
- [18] Fournier A, Fussell D, Carpenter L. Computer rendering of stochastic models. Communications of the ACM, 1982, 25(6): 371-384.
- [19] 岳宗玉. 月球构造特征与遥感影像解译初步研究. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2008. [Yue Zongyu. The tentative study of lunar tectonic features and remote sensing images interpretation. Beijing: Doctoral Dissertation of China University of Geoscience (Beijing), 2008.]
- [20] McGetchin T R, Settle M, Head J. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 20(2): 226-236.
- [21] Center M S F. Lunar Surface Models NASA Space Vehicle Design Criteria Environment. NASA, 1969.

## Lunar terrain simulation and application in Chang'E-3 mission

LI Wei<sup>1</sup>, SUN Yiwei<sup>1</sup>, WAN Wenhui<sup>1</sup>, LIU Zhaoqin<sup>1</sup>, HU Wenmin<sup>1,3</sup>,  
YUE Zongyu<sup>1</sup>, DI Kaichang<sup>1</sup>, MIAO Yi<sup>2</sup>, ZHAN Lei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China; 2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 3. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

**Abstract:** Chang'E-3 rover is the first lunar rover launched by China National Space Administration. As the 'eyes' of the rover, the navigation cameras play a crucial role in mission operations of the rover on lunar surface. High-resolution DEMs and DOMs generated from navigation images using photogrammetric techniques can provide accurate terrain and location information for rover positioning and route planning. Simulation tests in experimental field before launch are necessary to ensure the effectiveness and reliability of the techniques and procedures. Computer simulation is undoubtedly a low-cost and efficient way to simulate the lunar terrain and environment in the early verification process of the navigation cameras. Using computer simulation, a variety of lunar terrain can be generated easily for verification of the measurements of the navigation cameras with the pre-defined parameters.

In this paper, techniques of fine-scale lunar terrain simulation and texture simulation are studied for navigation camera verification. Lunar terrain simulation consists of lunar basic terrain simulation and lunar surface feature simulation. For basic terrain simulation, we first generate a rough terrain using random fractal algorithm, and then get a finer terrain from rough terrain using midpoint displacement method. For lunar surface feature simulation, 3D models of surface features, such as craters and rocks, are generated and placed on the basic terrain according to certain rules, and then they are merged to the terrain by modifying the raster terrain data, so that the terrain data can reflect the changes caused by the added feature models.

For texture simulation, texture mapping and texture merging methods are used to generate terrain-consistent texture. Texture mapping creates textures based on the elevation values of each position and its neighbors in the terrain data. Texture merging generates local textures by Gaussian-weighted method using texture samples collected in advance. Lighting illumination is also added to the generated terrain by Open Scene Graph software.

Finally, a realistic simulative lunar scene is generated and verification tests of the navigation cameras are performed according to the camera parameters and image acquisition instructions.

**Key words:** Chang'E-3 mission; simulation of lunar surface; fractal terrain; texture mapping and merging