

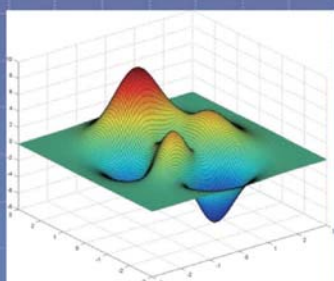


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

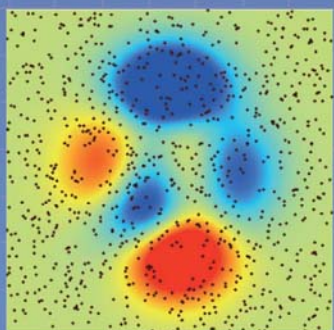
中国图象图形学报

2014
02
VOL.19

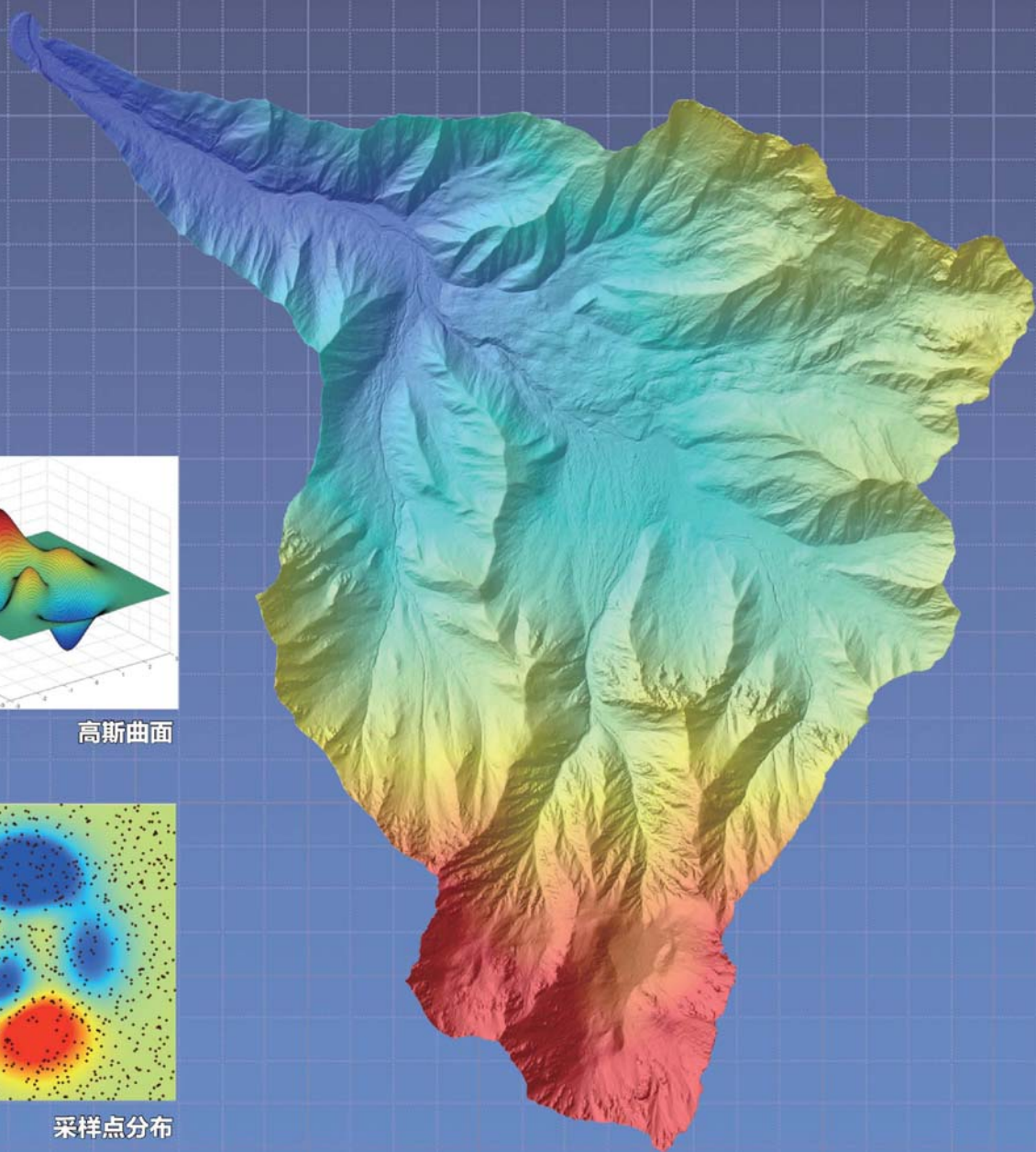
ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



高斯曲面



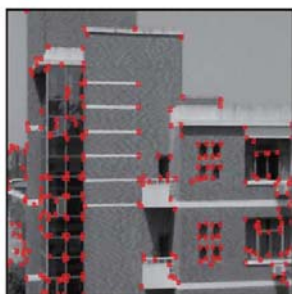
采样点分布



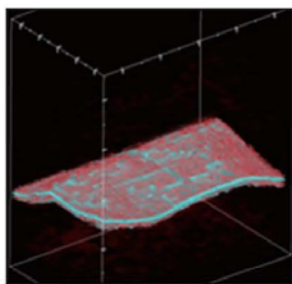
HASM地形模拟 P290



邻域最短距离法寻找最佳拼接缝(第227页)



曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测(第234页)



目标特征指导的多分辨率体绘制算法(第283页)

计算机视觉前沿论坛

行为理解的认知推理方法

陶霖密, 杨卓宁, 王国建 0167

深度学习及其在目标和行为识别中的新进展

郑胤, 陈权崎, 章毓晋 0175

图像处理和编码

分布式视频编码中基于改进FCM聚类的相关噪声模型估计

杨春玲, 吴娟 0185

结合一阶自回归滑动平均和压缩感知的视频模型

王教余, 徐小红, 沈仁明, 廖重阳, 杨勋 0194

信息量加权的梯度显著度图像质量评价

徐少平, 杨荣昌, 刘小平 0201

优化加权TV的复合正则化压缩感知图像重建

费选, 韦志辉, 肖亮, 李星秀 0211

消除图像伪轮廓的各向异性自适应滤波

倪婧, 王朔中, 廖纯, 曾兴 0219

邻域最短距离法寻找最佳拼接缝

郑悦, 程红, 孙文邦 0227

图像分析和识别

曲率尺度空间与链码方向统计的角点检测

曾接贤, 李炜烨 0234

基于方向特征的手掌静脉识别

周宇佳, 刘娅琴, 杨丰, 黄靖 0243

复杂环境下高效物体跟踪级联分类器

江伟坚, 郭躬德 0253

图像理解和计算机视觉

均值规范化对比度的局部特征描述符

颜雪军, 赵春霞, 袁夏, 徐丹, 刘凡 0266

计算机图形学

三角域上Said-Ball基的推广渐近迭代逼近

张莉, 李园园, 杨燕, 檀结庆 0275

目标特征指导的多分辨率体绘制算法

郭思奇, 鲁才, 聂小燕 0283

地理信息技术

高精度曲面建模优化方案

赵明伟, 岳天祥, 赵娜 0290

医学图像处理

应用于人体关节缺损修复的建模与可视化

邢慧君, 杨健, 李勤 0297

小邻域统计信息核磁共振医学图像分割模型

张建伟, 方林, 陈允杰, 詹天明 0305

遥感图像处理

结合暗通道原理和双边滤波的遥感图像增强

周雨薇, 陈强, 孙权森, 胡宝鹏 0313

改进NSCT和IHS变换相结合的遥感影像融合

刘慧, 周可法, 王金林, 王珊珊 0322

分段2维主成分分析的超光谱图像波段选择

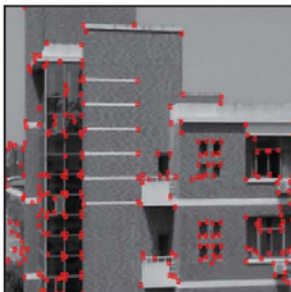
张婧, 孙俊喜, 阮光诗, 刘红喜 0328

CONTENTS

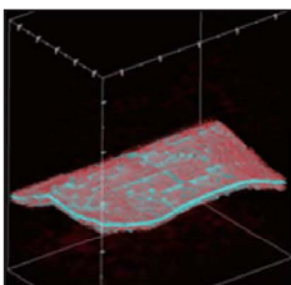
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Finding an optimal seam-line through the shortest distance in the neighborhood(P227)



Corner detection based on curvature scale space and chain code direction statistics(P234)



Target feature based multi-resolution volume rendering(P283)

Forum: Forefront of Computer Vision

Cognitive reasoning method for behavior understanding

Tao Linmi, Yang Zhuoning, Wang Guojian 0167

Deep learning and its new progress in object and behavior recognition

Zheng Yin, Chen Quanqi, Zhang Yujin 0175

Image Processing and Coding

Correlation noise modeling based on improved Fuzzy C-Means clustering in distributed video coding

Yang Chunling, Wu Juan 0185

Compressed sensing video model based on a first-order auto regressive moving average model

Wang Jiaoyu, Xu Xiaohong, Shen Renming, Liao Chongyang, Yang Xun 0194

Information content weighted gradient salience structural similarity index for image quality assessment

Xu Shaoping, Yang Rongchang, Liu Xiaoping 0201

Compound regularized compressed sensing image reconstruction based on optimal reweighted TV

Fei Xuan, Wei Zhihui, Xiao Liang, Li Xingxiu 0211

False contour suppression with anisotropic adaptive filtering

Ni Jing, Wang Shuozhong, Liao Chun, Zeng Xing 0219

Finding an optimal seam-line through the shortest distance in the neighborhood

Zheng Yue, Cheng Hong, Sun Wenbang 0227

Image Analysis and Recognition

Corner detection based on curvature scale space and chain code direction statistics

Zeng Jiexian, Li Weiye 0234

Palm-vein recognition based on oriented features

Zhou Yujia, Liu Yaqin, Yang Feng, Huang Jing 0243

Efficient cascade classifier for object tracking in complex conditions

Jiang Weijian, Guo Gongde 0253

Image Understanding and Computer Vision

Local feature descriptor based on mean normalized contrast

Yan Xuejun, Zhao Chunxia, Yuan Xia, Xu Dan, Liu Fan 0266

Computer Graphics

Generalized progressive iterative approximation for Said-Ball based on triangular domains

Zhang Li, Li Yuanyuan, Yang Yan, Tan Jieqing 0275

Target feature based multi-resolution volume rendering

Guo Siqi, Lu Cai, Nie Xiaoyan 0283

Geoinformatics

HASM optimization based on the improved difference scheme

Zhao Mingwei, Yue Tianxiang, Zhao Na 0290

Medical Image Processing

Method of modeling and visualization for repairing of osteoarticular defect

Xing Huijun, Yang Jian, Li Qin 0297

Magnetic resonance medical images segmentation based on a local statistical information model

Zhang Jianwei, Fang Lin, Chen Yunjie, Zhan Tianming 0305

Remote Sensing Image Processing

Remote sensing image enhancement based on dark channel prior and bilateral filtering

Zhou Yuwei, Chen Qiang, Sun Quansen, Hu Baopeng 0313

Remote sensing image fusion based on an improved NSCT and IHS transformation

Liu Hui, Zhou Kefa, Wang Jinlin, Wang Shanshan 0322

Segmented 2DPCA algorithm for band selection of hyperspectral image

Zhang Jing, Sun Junxi, Ruan Guangshi, Liu Hongxi 0328

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)2-0290-07

论文引用格式: 赵明伟, 岳天祥, 赵娜. 高精度曲面建模优化方案[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(2): 290-296. [DOI: 10.11834/jig.20140215]

高精度曲面建模优化方案

赵明伟^{1,2}, 岳天祥¹, 赵娜^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 目的 为了进一步提高高精度曲面建模(HASM)方法的模拟精度和计算速度,进而拓宽该模型的应用领域,提出了新的 HASM 模型算法。方法 采用新的差分格式计算 HASM 高斯方程中的一阶偏导数,以 HASM 预处理共轭梯度算法为例分析改进的差分格式对 HASM 的优化效果。结果 数值实验表明:在计算耗时及内存需求不变的情况下,采用新的差分格式的 HASM 算法可以显著提高单次迭代的模拟精度,同时能够降低关键采样点缺失对模拟结果精度的影响。进一步研究发现,当 HASM 采用新差分格式与原始差分格式(中心差分)交替迭代时,能够快速降低模拟结果的误差。结论 本文算法当达到指定的精度条时能够显著减小计算耗时,同时还能降低关键采样点缺失对模拟结果的影响。

关键词: 高精度曲面建模;差分;数值实验;模拟精度

HASM optimization based on the improved difference scheme

Zhao Mingwei^{1,2}, Yue Tianxiang¹, Zhao Na^{1,2}

1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: **Objective** In order to solve the error problem in the spatial surface simulation, the high accuracy surface modeling (HASM) method, which is based on the fundamental theorem of the surface theory, has been developed during the past decades. Numerical tests have already shown that HASM is much more accurate than the classical methods such as Kring, inverse weighting (IDW) method, and splines. In addition, surface modeling of digital elevation model and spatial simulation of soil properties also indicate that the HASM indeed increases interpolation accuracy. However, the huge time consumption of the HASM limits its application at large scales. Numerical analysis have found that the main reason that lead to large time consumption is that the out-iteration process consume too much time, so an effective way to improve the simulation efficiency is speed up the out-iteration process. Therefore we propose a new method to construct the difference equations of the HASM in this paper. **Method** The new difference equation employs five grids to compute the first difference, while the original method only uses three grids. First, we prove that the modified difference equation could really improve the simulation accuracy by formula derivation. Then we design several numerical tests to verify the simulation accuracy of the new method. Sampling rate and the spatial position of the sample points are considered in the numerical tests. Three kinds of sampling rate are designed (0.5%, 1%, and 2%) to analysis the new method's advantage for different sampling rates. One of the numerical tests removes key points of the study area (valley bottom of the simulation surface) to analysis

收稿日期:2013-04-10;修回日期:2013-09-07

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2013AA122003)

第一作者简介:赵明伟(1986—),男,中国科学院地理科学与资源研究所地理信息系统专业在读博士研究生,研究方向为资源环境与生态系统模拟。E-mail:zhaomw@lreis.ac.cn

the influence of the missing of key sampling points to the origin and new methods. **Result** numerical test results show that HASM that adopted the new difference equation can improve the single iteration accuracy significantly. At the same time, the contrast experiments indicate that the modified HASM could decrease the influence of the key missing sample points, which is very important in the practical application because it is often impossible to identify all the key sample points. It should be pointed that the modified HASM does not require increasing memory to obtain these advantages. Furthermore the study reveals that the out-iteration process that employed the modified difference equations and the origin difference equations in turn could speed up the increasing of the simulation accuracy. This trait is of great help to arrive at the specified simulation accuracy quickly in practical application. **Conclusion** Compared to the classical interpolation methods, HASM possess significant advantages on simulation accuracy. However the huge time consumption limits its wide application. Aiming to perfect HASM's simulation efficiency, we propose the modified HASM algorithm by building new difference equations. Compared to the origin one, the modified HASM has three advantages: First, the modified HASM could improve the single iteration accuracy significantly. Second, the modified HASM could get better simulation results when some key sample points are missing. Third we could accelerate the error decreasing in the out-iteration process when using the modified and origin HASM.

Key words: high accuracy surface modeling (HASM); difference scheme; mathematical test; simulation accuracy

0 引言

高精度曲面建模(HASM)算法的研究始于20世纪80年代末,最早应用在冰斗形态建模当中^[1]。后来逐渐发展形成一整套高精度曲面建模理论^[2-4],成功应用于DEM构建^[5-6]、3维地表模拟^[7]、土壤属性空间模拟^[8]、气候要素空间模拟^[9]等地学及生态学领域。同时,随着HASM理论的发展与完善,各种HASM求解算法也相继提出,如预处理共轭梯度法^[10]、多重网格算法^[11]、平差算法^[12]、自适应算法^[13]及基于GPU的HASM加速算法^[14]等,但是HASM不同算法较多地考虑了线性方程组求解迭代方法的不同,却忽略了HASM在建立线性方程组过程中的误差分析及相应的不同差分离散方法。

本文在分析HASM在构建线性方程组过程中一阶偏导数计算误差来源的基础上,导出了一种由5个格网点参与计算的一阶偏导数计算公式。然后以数学曲面为分析对象实例,以HASM-PCG(HASM预处理共轭梯度)为算法实例,研究了采用改进差分格式后的HASM-PCG单次迭代模拟精度、多次迭代模拟精度、达到指定模拟精度的时间消耗以及消除“削峰填谷”的效果。

1 HASM改进

根据曲面论基本定理,一个空间曲面完全由其第1类基本量和第2类基本量决定,其中曲面第1

类基本量、第2类基本量需满足高斯方程^[4]

$$\begin{cases} f_{xx} = \Gamma_{11}^1 f_x + \Gamma_{11}^2 f_y + \frac{L}{\sqrt{E+G-1}} \\ f_{yy} = \Gamma_{22}^1 f_x + \Gamma_{22}^2 f_y + \frac{N}{\sqrt{E+G-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, E, G 为曲面第1类基本量, L, N 为曲面第2类基本量, $\Gamma_{11}^1, \Gamma_{11}^2, \Gamma_{22}^1, \Gamma_{22}^2$ 称为曲面的第2类克里斯托弗尔变量。

在之前的HASM算法中,注重的是迭代法的选择及高斯方程左端二阶偏导数的差分计算,而忽略了高斯方程右端一阶偏导数计算存在的误差给HASM模拟带来的影响。本文将在分析一阶偏导数误差来源的基础上,导出新的差分表达式^[15]。

假设计算 (x, y) 点上 x 方向上的偏导数,则根据泰勒展开式有

$$f(x+g, y) = f(x, y) + f_x(x, y)g + \frac{f''_x(x, y)g^2}{2} + \frac{f'''_x(\xi_x, y)g^3}{3!} \quad (2)$$

$$f(x-g, y) = f(x, y) - f_x(x, y)g + \frac{f''_x(x, y)g^2}{2} - \frac{f'''_x(\gamma_x, y)g^3}{3!} \quad (3)$$

式中, $\xi_x \in (x, x+g), \gamma_x \in (x, x-g), g$ 为离散格网宽度; f'_x, f''_x, f'''_x 分别为关于 x 的一阶、二阶、三阶偏导数。式(2)(3)相减,整理得

$$E_x = \frac{f(x+g, y) - f(x-g, y)}{2g} - f_x(x, y) = \frac{g^2 [f'''_x(\xi_x, y) + f'''_x(\gamma_x, y)]}{2 \times 3!} \quad (4)$$

同理有

$$E_y = \frac{f(x, y+g) - f(x, y-g)}{2g} - f_y(x, y) =$$

$$\frac{g^2 [f_y'''(x, \xi_y) + f_y'''(x, \gamma_y)]}{2 \times 3!} \quad (5)$$

式中, $\xi_y \in (y, y+g)$, $\gamma_y \in (y, y-g)$; f_y , f_y''' 分别为关于 y 的一阶、三阶偏导数。

由式(4)(5)可以看出, 差分计算得到的 f_x 与 f_y 的误差与 g^2 成正比。因此, 减小网格长度可以提高差分估值精度。当网格长度减小为 $g/2$ 时, 估计误差分别为

$$E'_x = \frac{f(x+g/2, y) - f(x-g/2, y)}{2(g/2) - f_x(x, y)} =$$

$$(g/2)^2 [f_x'''(\xi_x, y) + f_x'''(\gamma_x, y)] / (2 \times 3!) \quad (6)$$

$$E'_y = \frac{f(x, y+g/2) - f(x, y-g/2)}{2(g/2) - f_y(x, y)} =$$

$$(g/2)^2 [f_y'''(x, \xi_y) + f_y'''(x, \gamma_y)] / (2 \times 3!) \quad (7)$$

式中, $\xi_x \in (x, x+g/2)$, $\gamma_x \in (x, x-g/2)$, $\xi_y \in (y, y+g/2)$, $\gamma_y \in (y, y-g/2)$ 。

对于足够小的网格长度, 有

$$f_x'''(\xi_x, y) \approx f_x'''(\bar{\xi}_x, y)$$

$$f_x'''(\gamma_x, y) \approx f_x'''(\bar{\gamma}_x, y)$$

$$f_y'''(x, \xi_y) \approx f_y'''(x, \bar{\xi}_y)$$

$$f_y'''(x, \gamma_y) \approx f_y'''(x, \bar{\gamma}_y)$$

因此可以得到

$$\frac{E'_x}{E_x} = \frac{1}{4}, \frac{E'_y}{E_y} = \frac{1}{4} \quad (8)$$

将式(4)一(7)代入式(8), 整理可得

$$f_x(x, y) = \frac{1}{3} [4 \times ((f(x+g/2, y) - f(x-g/2, y)) / 2(g/2)) - (f(x+g, y) - f(x-g, y)) / 2g] \quad (9)$$

$$f_y(x, y) = \frac{1}{3} [4 \times ((f(x, y+g/2) - f(x, y-g/2)) / 2(g/2)) - (f(x, y+g) - f(x, y-g)) / 2g] \quad (10)$$

减小网格尺寸意味着数据分辨率的增加, 也即数据存储量的增加。本文新模型是以不改变数据的分辨率为基础的。为此, 可以通过增大分析窗口的方法实现多分辨率的需求(图1)。以 $2g$ 、 g 两种分辨率代替上述推导过程的两种分辨率。根据图1, 可以将式(9)(10)改写为

$$\begin{cases} f_x = \frac{1}{3} [4(z_{18} - z_8) / 2g - (z_{23} - z_3) / 4g] \\ f_y = \frac{1}{3} [4(z_{14} - z_{12}) / 2g - (z_{15} - z_{11}) / 4g] \end{cases} \quad (11)$$

即计算图1中点13处的偏导数。

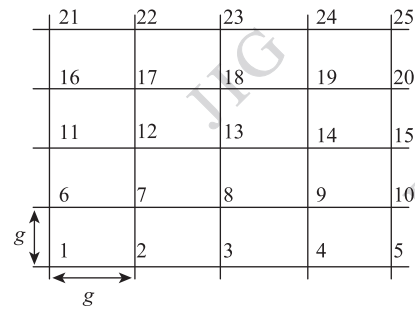


图1 5×5分析窗口

Fig. 1 5×5 local moving window

2 数值模拟结果分析

为了便于分析改进前后 HASM 模拟曲面精度对比, 选择表达式已知的数学曲面作为分析实例。其中高斯合成曲面较为接近真实地表(图2), 因此选择高斯合成曲面作为研究对象, 其数学表达式为

$$f(x, y) = 3(1-x)^2 e^{-x^2 - (y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) e^{-x^2 - y^2} - \frac{e^{-(x+1)^2 - y^2}}{3} \quad (12)$$

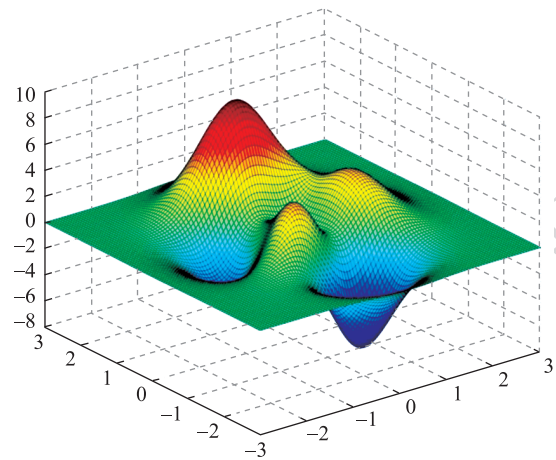


图2 实验曲面

Fig. 2 Test surface

首先将高斯曲面离散成 300×300 的网格, 然后按照采样率的不同设计了3组模拟实验, 其采样率分别是0.5%、1%、2%, 其中第1组和第3组均为随机采样, 采样点均匀分布于研究表面上, 而第2组实验是在随机采样的基础上移去了位于高斯合成曲面“谷底”的采样点(图3), 旨在分析改进前后 HASM 算法对缺少采样点的“谷底”的模拟效果。

2.1 单次迭代精度分析

单次迭代即大规模线性方程组迭代求解直至满

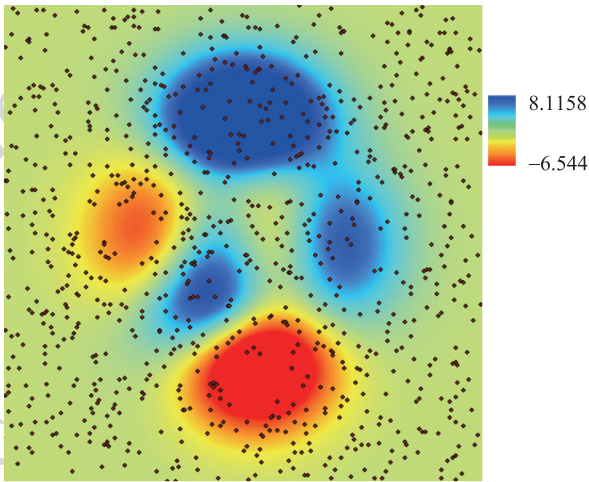
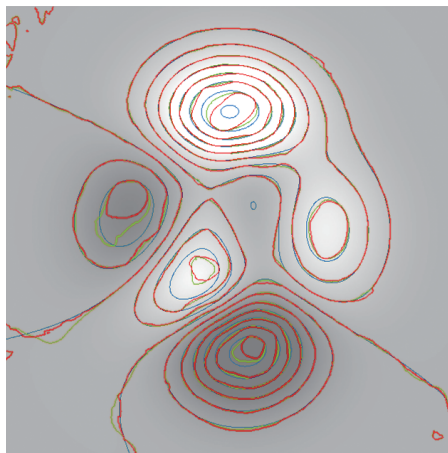


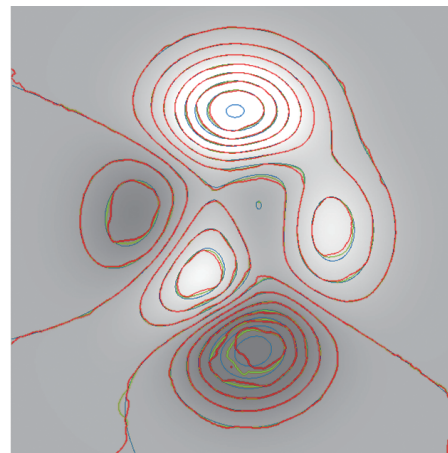
图3 部分关键点缺失的采样方案
Fig. 3 Sample scheme with absent key points

足精度准则的过程,本研究中精度准则是残差向量的均方根小于 1×10^{-12} 。此时统计 HASM 输出结果与真实曲面的误差如表1所示。为了直观分析改进前后 HASM 模拟精度的差异,对每种采样率的计算实例,绘制了真实曲面及改进前后 HASM 模拟结果的等值线(图4)。

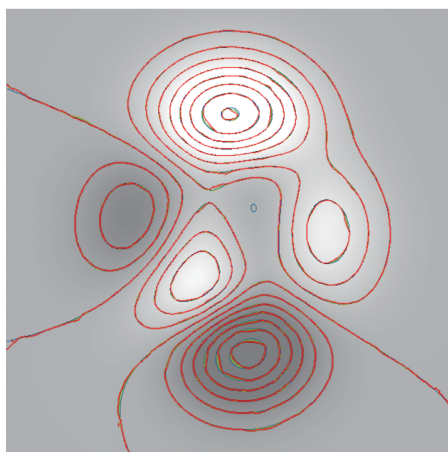
从表1中可以看出,改进后的 HASM-PCG 算法提高了曲面模拟的精度,以反映曲面整体模拟精度的均方根误差为例,对于3种采样率,改进后的 HASM-PCG 算法模拟结果的均方根误差为改进前的72.65%、66.22%和59.35%。同时,改进后的 HASM-PCG 在消除“削峰填谷”效应上的作用也更明显,不同采样率下模拟结果的最大、最小误差均减小;特别地,对于1%采样率下的问题,改进后的最



(a) 0.5%采样率



(b) 1%采样率



(c) 2%采样率

— 实际曲面等值线
— 改进后模拟曲面等值线
— 改进前模拟曲面等值线

图4 HASM 模拟曲面等值线对比

Fig. 4 Contour of the real surface and the simulation results

表 1 改进前后 HASM-PCG 算法单次迭代模拟结果精度统计

Table 1 Accuracy statistics of the improved and the origin HASM under the sole iteration

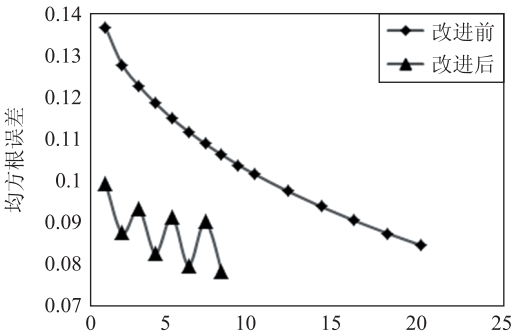
采样率	平均误差		均方根误差		最大误差		最小误差	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
0.5%	-0.005 30	0.000 60	0.136 43	0.099 12	1.148 52	0.986 48	-0.975 85	-0.670 08
1%	-0.015 43	-0.010 43	0.114 23	0.075 64	0.488 34	0.282 36	-1.484 03	-0.887 28
2%	-0.002 39	-0.001 63	0.032 94	0.019 55	0.295 03	0.206 92	-0.330 12	-0.195 48

小误差绝对值由改进前的 1.484 降到 0.887,表明改进后的 HASM 由于在计算一阶偏导数时考虑到了更多点的信息,因此模拟结果能够更好的消除关键采样点缺失带来的影响。从模拟结果的等值线对比图(图 4)可以更明显地看出,改进后的 HASM-PCG 算法确实改进了模拟精度,改进后模拟结果的等值线与真实等值线更为符合,而改进前的模拟结果的等值线一方面自身扭曲更为明显,另一方面与真实等值线的偏差也更大。

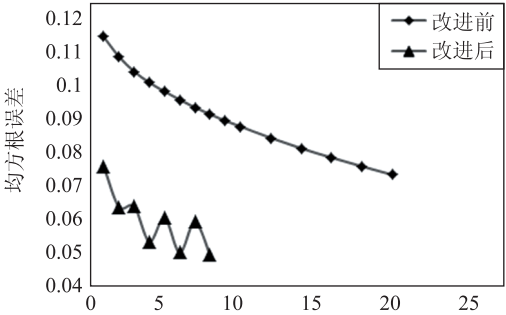
2.2 多次迭代分析

在 HASM 模拟过程中,由于用来计算第 1 类、第 2 类基本量以及克式符号的驱动场数据精度不高,因此单次迭代后的结果往往不能满足精度要求。实验发现若采用方程组的单次迭代解更新第一、第二基本量及克式符号的值,进而更新方程组右端向量,然后重新求解可以获得精度更高的结果,这一过程称为 HASM 外迭代。外迭代可以进行多次,一般而言更多的外迭代次数能够得到精度更高的结果。本研究发现,采用改进后的 HASM-PCG 算法单次迭代精度更高,但继续迭代时精度提高不明显,为此将改进后与改进前的 HASM-PCG 算法交替进行迭代计算,发现模拟误差在震荡中快速下降(图 5)。

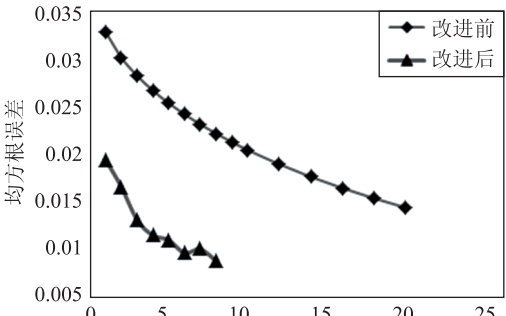
上面分析了改进差分格式前后的 HASM-PCG 算法模拟结果精度随迭代次数的变化规律。需要指出的是,迭代次数的增加会带来计算时间消耗的增加,并且两者呈近似线性关系,若迭代一次计算耗时为 T ,则迭代 k 次计算耗时约为 $k \times T$ 。因此在实际应用中,由于时间的限制不可能设置过大的迭代参数,而是根据精度条件设置一定的迭代停止准则,当模拟精度满足停止条件时就停止迭代,输出结果。本文设置一定的迭代停止准则,然后对于改进前后的 HASM-PCG 算法,分别分析其满足迭代停止条件时的时间消耗。



(a) 0.5%采样率



(b) 1%采样率



(c) 2%采样率

图 5 改进前后 HASM-PCG 算法模拟结果均方根误差随迭代次数变化规律

Fig. 5 Effect of the iteration times to the improved HASM-PCG compared with the origin HASM-PCG

仍然以高斯数学曲面的 3 种采样率下的计算问题为例。考虑到采样率对模拟结果精度的影响, 对 3 个计算问题设计了两种迭代停止准则: 第 1 种是以改进后的 HASM 算法单次迭代结果均方根误差为标准, 分析改进前的 HASM 算法模拟精度达到改进后的精度时的消耗时间, 即对于采样率为 0.5%

的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.099 1 时停止迭代, 对于采样率为 1% 的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.075 6 时停止迭代, 对于采样率为 2% 的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.019 6 时停止迭代。不同采样率下的统计结果如表 2 所示。

表 2 第 1 种迭代停止准则下改进前后结果对比

Table 2 Result analysis of the improved and the origin HASM under the first iteration halt rule

采样率	迭代次数		计算时间/s		最大误差		最小误差	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
0.5%	12	1	1 041	93	0.922 5	0.986 5	-0.632 0	-0.670 1
1%	20	1	1 704	81	0.296 1	0.282 4	-1.022 2	-0.887 2
2%	12	1	1 025	85	0.172 2	0.206 9	-0.224 2	-0.195 5

第 2 种停止准则是在改进后 HASM-PCG 算法单次迭代结果均方根误差的基础上分别降低 20%、20% 和 40%。即对于采样率为 0.5% 的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.079 3 时停止迭代, 对于采样率为 1% 的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.060 5 时停止迭代, 对于采样率为 2% 的计算问题, 当模拟结果均方根误差低于 0.011 7 时停止迭代。设定该停止准则的目的是对比分析改进前后的 HASM 算法随外迭代次数增加其精度提高的速度。不同采样率下的统计结果如表 3 所示。

可以看出, 与改进前相比, 改进后的 HASM-PCG

算法达到指定的精度需要进行迭代次数显著减小。当采样率为 0.5% 时, 需要迭代 8 次就能满足迭代停止的精度标准, 而改进前的 HASM-PCG 算法则需要迭代 25 次。类似的, 当采样率为 1% 和 2% 时, 当达到各自的迭代停止的精度标准时, 改进的 HASM-PCG 算法仅需迭代 6 次和 4 次, 而改进前的算法需要迭代 34 次和 28 次。迭代次数的减少也意味着计算耗时的减少, 对于 3 种采样率下的计算问题, 可以计算改进后的 HASM-PCG 算法在达到相同的迭代停止精度标准时, 其计算耗时分别是改进前计算耗时的 35.74%、20.12% 和 13.34%。

表 3 第 2 种迭代停止准则下改进前后结果对比

Table 3 Result analysis of the improved and the origin HASM under the second iteration halt rule

采样率	迭代次数		计算时间/s		最大误差		最小误差	
	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后	改进前	改进后
0.5%	25	8	206 5	738	0.7850 2	0.7902 5	-0.5439 8	-0.4983 6
1%	34	6	263 9	531	0.2249 6	0.1680 9	-0.8666 6	-0.6715 2
2%	28	4	257 8	344	0.100 2	0.1197 2	-0.1452 3	-0.1053 1

3 结 论

本文得出的主要结论如下: 1) 采用新差分格式计算一阶偏导数后的 HASM 方法可以有效地改善 HASM 单次迭代模拟结果的精度; 2) 采用改进前后的 HASM-PCG 算法交替参与迭代, 能够加速 HASM 模拟结果误差的下降, 改进前的 HASM-PCG

算法需要迭代 10 次以上才能达到改进后的 HASM-PCG 算法迭代一次模拟结果的精度; 当指定相同的迭代停止精度准则时, 组合迭代满足迭代停止准则需要的迭代次数更少, 因而计算耗时也更少。3) 采用新差分格式的 HASM-PCG 算法在取消模拟结果“削峰填谷”上的效果更好, 表明关键采样点缺失对改进后的 HASM-PCG 算法影响更小。

参考文献 (References)

- [1] Yue T X, Ai N S. The mathematic model of cirque morphology [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(3): 227-234. [岳天祥, 艾南山. 冰斗形态的数学模型[J]. 冰川冻土, 1990, 12(3): 227-234.]
- [2] Yue T X, Du Z P, Liu J Y. High accuracy surface modeling and the error analysis [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(2): 83-89. [岳天祥, 杜正平, 刘纪远. 高精度曲面建模与误差分析[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 83-89.]
- [3] Yue T X, Du Z P. High accuracy surface modeling: the core module of the new GIS and CAD [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(3): 73-82. [岳天祥, 杜正平. 高精度曲面建模: 新一代 GIS 与 CAD 的核心模块[J]. 自然科学进展, 2005, 15(3): 73-82.]
- [4] Yue T X, Du Z P, Song D J. High accuracy surface modeling: HASM4 [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(2): 343-348. [岳天祥, 杜正平, 宋敦江. 高精度曲面建模: HASM4 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 343-348.]
- [5] Yue T X, Du Z P, Song D J, et al. A new method of surface modeling and its application to DEM construction [J]. Geomorphology, 2007, 91(1-2): 161-172.
- [6] Song D J, Yue T X, Du Z P. A new method of DEM generation from contour line [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(4): 472-476. [宋敦江, 岳天祥, 杜正平. 一种由等高线构建 DEM 的新方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(4): 472-476.]
- [7] Yan C Q, Yue T X. 3D simulation and Walk-through algorithm of terrain based on high accuracy and speed surface modeling [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(7): 1126-1132. [闫长青, 岳天祥. 高精度高速度曲面建模的 3 维地表模拟和漫游算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(7): 1126-1132.]
- [8] Shi W J, Liu J Y, Song Y J, et al. Surface modelling of soil pH [J]. Geoderma, 2009, 150(1-2): 113-119.
- [9] Wang C L, Yue T X, Fan Z M, et al. HASM-based climatic downscaling model over china [J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(5): 599-610. [王晨亮, 岳天祥, 范泽孟, 等. 基于高精度曲面建模的中国气候降尺度模型[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(5): 599-610.]
- [10] Zhao N, Yue T X. Fast methods for high accuracy surface modeling [J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(3): 281-285. [赵娜, 岳天祥. 高精度曲面建模的一种快速算法[J]. 地球信息科学, 2012, 14(3): 281-285.]
- [11] Song Y J, Yue T X. High accuracy surface modeling based on multi-grid method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(6): 711-714. [宋印军, 岳天祥. 基于多重网格法求解的高精度曲面建模模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(6): 711-714.]
- [12] Yue T X, Wang S H. Adjustment computation of HASM: a high-accuracy and high-speed method [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(11): 1725-1743.
- [13] Yue T X, Chen C F, Li B L. An adaptive method of high accuracy surface modeling and its application to simulating elevation surfaces [J]. Transactions in GIS, 2010, 14(5): 615-630.
- [14] Yan C Q, Yue T X. A novel method for dynamic modeling and real-time rendering based on GPU [J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(2): 149-157. [闫长青, 岳天祥. 基于 GPU 的 HASM 动态模拟与实时渲染方法[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 149-157.]
- [15] Zhao M W, Tang G A, Zhang L, et al. The DEM based 5-Node second-order finite difference model for slope computation [J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(3): 286-291. [赵明伟, 汤国安, 张磊, 等. 基于 DEM 的 5 节点二阶差分坡度算法模型与实验分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 286-291.]