

基于地形特征的 TIN 海量地形裂缝消除方法

吕希奎^a, 王奇胜^b, 李永发^b

(石家庄铁道大学 a. 交通运输学院; b. 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘 要: 针对海量三角网地形分块绘制中出现的裂缝问题, 在地形特征的基础上, 提出一种基于数字高程模型 (DEM) 分辨率动态添加共享边界点的方法。采用盲人寻径法快速求得地形块边界点, 根据 DEM 的分辨率动态确定内插点间距, 计算相邻地形块边界宽度值和交界有效长度。根据内插间距与交界有效长度计算出需要添加的边界共享数据点数, 使得各级分辨率的共享边界点都保持一致, 从而适应地形多分辨率绘制要求。测试结果表明, 该方法在保证地形绘制精度的前提下, 有效消除了不规则三角网海量地形绘制的裂缝, 且能够解决不同分辨率地块裂缝的消除问题。

关键词: 海量地形; 裂缝消除; 地形特征; 不规则三角网; 动态处理

中文引用格式: 吕希奎, 王奇胜, 李永发. 基于地形特征的 TIN 海量地形裂缝消除方法 [J]. 计算机工程, 2019, 45(3): 232-236.

英文引用格式: LÜ Xikui, WANG Qisheng, LI Yongfa. Elimination method of TIN massive terrain crack based on terrain feature [J]. Computer Engineering, 2019, 45(3): 232-236.

Elimination Method of TIN Massive Terrain Crack Based on Terrain Feature

LÜ Xikui^a, WANG Qisheng^b, LI Yongfa^b

(a. School of Traffic and Transportation; b. School of Civil Engineering,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

[Abstract] In order to solve the problem of cracks in massive triangular network terrain block rendering, a method of dynamically adding shared boundary points based on resolution of Digital Elevation Model (DEM) is proposed based on terrain features. The boundary points of terrain blocks are obtained quickly by the blind path finding method. The interpolation point spacing is dynamically determined according to the resolution of DEM, and the boundary width and effective length of the adjacent terrain blocks are calculated. Then, according to the interpolation spacing and the effective length of the boundary, the number of shared boundary points needed to be added is calculated, so that the shared boundary points at all levels of resolution are consistent, so that they can meet the requirements of terrain multi-resolution rendering. Test results show that this method can effectively eliminate the cracks in massive terrain rendering of Triangulated Irregular Network (TIN) under the premise of ensuring the accuracy of terrain rendering, and it can also solve the problem of crack elimination in different resolution blocks.

[Key words] massive terrain; crack elimination; terrain feature; Triangulated Irregular Network (TIN); dynamic processing
DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0049215

0 概述

为解决海量地形场景绘制与计算机硬件渲染能力不足之间的矛盾, 通常做法是将海量地形和影像进行分块处理, 当浏览地形或进行漫游时, 只需要把视野内的地形和影像动态载入内存并绘制渲染, 且把视野之外的数据卸载。在地形分块绘制时, 不可避免地会产生相邻地块之间的裂缝问题, 裂缝的存在严重影响三维地形场景的绘制效

果和精度。用于三维地形场景建模的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 主要有格网 (GRID) 和不规则三角网 (Triangulated Irregular Network, TIN) 2 种类型。TIN DEM 根据地形特征进行离散采样, 可以避免规则格网引起的数据冗余, 且能更精确地表示山区等复杂地形地貌^[1-2], 在工程设计领域应用最广。目前, 针对规则网格由于不同分辨率而出现的裂缝消除方法主要有垂直边缘法^[3-5]、顶点拉伸法^[6-8]、限定四叉树法^[9-11]等。垂直边缘法是在各

基金项目: 国家自然科学基金 (51278316); 河北省自然科学基金 (E2016210133); 河北省引进留学人员项目 (CL201720)。

作者简介: 吕希奎 (1976—), 男, 教授、博士, 研究方向为工程信息技术、虚拟环境仿真技术; 王奇胜、李永发, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-11-07 **修回日期:** 2018-02-27 **E-mail:** Lvxi kui@163.com

节点边界周围生成垂直边以遮挡裂缝,实际上并未真正消除裂缝,且在裙边显示的地方会出现垂直的地形显示,通常不符合实际地形特征^[12]。顶点拉伸法是对裂缝处的顶点高程进行调整,会导致地形失真。限定四叉树法要求相邻格网的剖分层差不大于1,然后通过附加裂缝补丁来消除裂缝,会导致数据存在冗余,且需要反复检测相邻格网的剖分层差,计算量较大^[13-15]。不规则三角网地形点根据地形特征分布,很难确定共享点的范围和数目。因此,上述方法均不适用于不规则三角网地形裂缝的消除。

本文针对海量三角网地形模型地块之间的裂缝问题,在地形特征的基础上,提出一种基于 DEM 分辨率动态确定共享边界点的方法,以解决 TIN 地形相临地块之间的裂缝问题,使地形连续起来,满足海量 TIN 三维地形场景的绘制效果和精度要求。

1 地形分块及裂缝产生

1.1 地形分块方法

图1所示为地形分块示意图,其中,黑色边界线为带状地形边界在 X-Y 平面上的投影,地形分块方法流程为:

- 1) 设定地形块的边长 $Width$,一般设置为 2^n ,如 $1\ 024 \times 1\ 024$ 、 512×512 等。
- 2) 根据整个地形边长计算出需要分成的块数,每块设定唯一的 ID。
- 3) 根据每个地形点的坐标判断其属于哪个 ID 的地形块,并储存到数据库中。
- 4) 当浏览或漫游地形时,只调入和渲染视野内地形块。

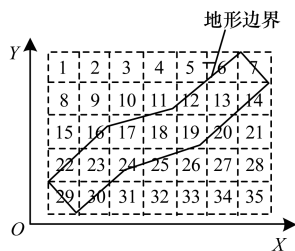


图1 地形分块示意图

1.2 裂缝产生原因

不规则三角网地形中数据点是离散不均匀分布的,分块后每块地形边界处不一定有数据点,且因为每块地形是分别构建三角网,所以相临地块边界处存在或大或小的裂缝,从而导致整块地形非连续。如图2(a)中地形沿中心线分成4块得到图2(b),图2(b)中各个地块之间就产生了裂缝。

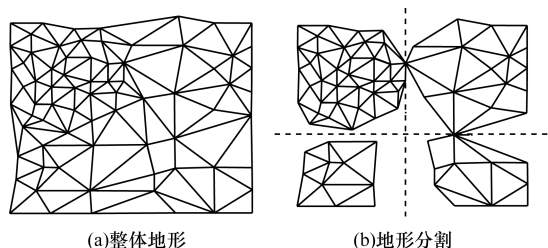


图2 不规则三角网裂缝产生原理

2 裂缝处理

2.1 加点法裂缝处理算法

针对因分块而产生的地形数据不连续导致的地形块边界的裂缝,采用加点法在边界上补充地形点,并作为相临地块的共享数据点参与各地形块的 TIN 三角网构建,其处理方法示意图如图3所示。

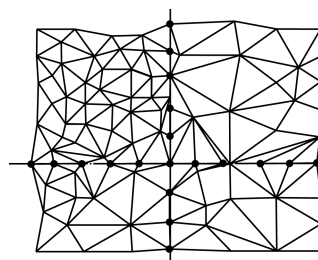


图3 同一分辨率裂缝处理方法

加点法裂缝处理算法的流程如下:

- 1) 按 ID 顺序,依次判断每个地形块是否有数据点,若没有,则跳过处理(如图1中的 ID 块1~块3无数据点,而 ID 块6~块7有数据点)。
- 2) 如果块本身有数据点,则需要判断该块的上、下、左、右相临块是否有数据点。若某侧的块有数据点,就需要在该侧边界上补充数据点,反之,则不需要添加。如图1中 ID 块20,只有上、左侧的地块有数据点,因此只需要添加这两侧的边界点。又如 ID 块13,上、下、左、右块都有点,则4个边都需要添加边界点。
- 3) 若某边界需要添加点,首先需要确定内插间距 l ,并求出2个块交界有效长度 $Length$,再根据 l 与 $Length$ 求出需要添加的边界点个数 $NumPoint$ 。

不同内插间隔的 TIN 边界三角网示意图如图4所示,若内插间隔距离 l 值过大,则会在边界处的地形生成少量斜长三角形,见图4(a);若 l 值过小,则会生成较多斜长三角形,见图4(b),2种情况都会影响边界处的地形真实度。因此, l 值与地形块边界的数据分布密度和内插间距有关。

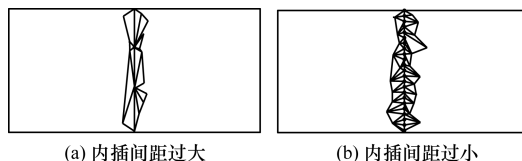


图4 不同内插间隔 TIN 边界三角网示意图

2.2 面向地形特征的加点内插间距计算

由于 TIN 为离散点分布,不同位置数据点分布密度并不相同,在面向地形特征的基础上,本文采用基于 DME 分辨率动态确定 l 值的方法,其计算步骤如下:

步骤 1 在相邻地块边界,根据 DEM 的分辨率,确定 DEM 计算边界宽度 b 。

步骤 2 根据 b 值,计算两地形块所有位置范围内的数据点。

步骤 3 计算每块地形点间的间距,将两地块间距取平均值,作为 l 值,其计算公式如下:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \\ k_2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2} \\ l = \frac{(k_1 + k_2)}{2} \end{cases} \quad (1)$$

各 DEM 比例对应的空间分辨率如表 1 所示。

表 1 DEM 比例对应的空间分辨率

序号	DEM 比例	对应空间分辨率/m
1	1:10 ⁶	1 000
2	1:2.5 × 10 ⁵	100
3	1:10 ⁵	50
4	1:5 × 10 ⁴	25
5	1:10 ⁴	5

2.3 交界有效长度计算

交界有效长度 $Length$ 的获取方法为:

1) 若相交块为上下块关系,如图 5(a)所示,先求出 2 个地块的总边界点,再从边界点中找到相邻的 2 个点 A_1 与 A_2 , A_1 与 A_2 分别属于上下两块,推导出线段 A_1A_2 的方程,进而计算出 A_1A_2 与边界的交点 A 。同理再求出 B , AB 的长度即为 $Length$ 。

2) 若相交块为左右块关系,如图 5(b)所示,先求出 2 个地块的总边界点,再从边界点中找到相邻的 2 个点 C_1 与 C_2 , C_1 与 C_2 分别属于左右两块,推导出线段 C_1C_2 的方程,进而计算出 C_1C_2 与边界的交点 C 。同理再求出 D , CD 的长度即为 $Length$ 。

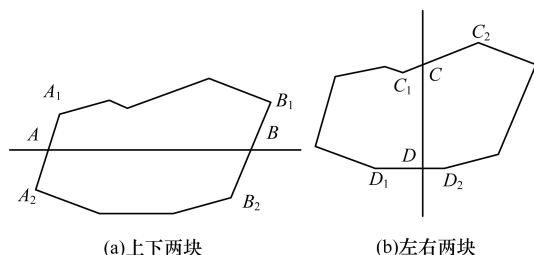


图 5 地块交界示意图

求交界长度 $Length$ 的前提是求出每块地形点中的边界点 $BoundaryPoints$ 。本文通过盲人寻径法求得地形的边界点,算法步骤如下:

步骤 1 取块地形点中的任意一点,设为 p ,并从地形点中获取 p 的最远点 f 。

步骤 2 依次遍历所有地形点 t ,得到向量 pt ,求出向量 pf 与 pt 的夹角 α ,找出 α 最大的点,该点即为一个边界点 t_1 。

步骤 3 将求出的边界点 t_1 设为起点 p ,重复步骤 1、步骤 2 得到 t_2 ,该点即为第 2 个边界点。

步骤 4 依此类推,直到找出所有的边界点。

盲人寻径法寻找边界点的速度较快,本文通过实验得出 524 417 个点只需要 1.04 s 即可求出边界,其效率较高,能够满足大范围地形中快速精确找出边界的要求。

2.4 边界共享点添加

边界共享点是指在两地块之间的交界上,2 个地块共同享有的点,如图 6 所示。

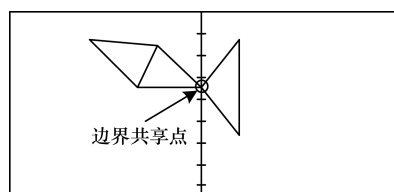


图 6 边界共享点示意图

共享点 (x, y) 的计算方法分 2 种情况:

1) 若是上下块关系,见图 5(a),则从 A 点开始, y 值固定为该块地形水平边上的 y 值,而第 i 个点的 x 坐标为: $x_i = x_A + i \times l$ ($x_i < x_B$)。

2) 若是左右块关系,见图 5(b),则从 C 点开始, x 值固定为该块地形竖直边上的 x 值,而第 i 个点的 y 坐标为: $y_i = y_C - i \times l$ ($y_i > y_D$)。

若点刚好位于分块边界上,按照间距 l ,又刚好跨过了边界共享点,则保留该边界点。

2.5 裂缝添加点高程值计算

在添加点以填补裂缝时,涉及到添加高程点的坐标问题。根据上文得到的添加点 x, y 坐标,计算对应的高程值 z 。本文使用的是逐点内插法^[6],以内插点为中心,初始半径为 R 的圆作为初始区域,用落在初始区域内的点计算内插点的高程值。逐点内插法的基本步骤为:

1) 定义内插点的初始区域范围。

2) 获取落在区域内的采样点。

3) 选定内插的数学模型。

4) 通过区域内的采样点和内插数学模型计算内插点的高程值。

设内插点 p 的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,区域内采样点为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, n 为邻域内采样点的个数, d_{pi} 为内插点与采样点的距离, p_i 为采样点的权重,则由 (x_p, y_p, z_p) 计算 p 点的高程 z_p ,采用加权平均法计算公式为:

$$z_p = \begin{cases} z_i, d_{pi} = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^n (p_i z_i)}{\sum_{i=1}^n p_i}, d_{pi} \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $p_i = d_{pi}^{-u}$, u 为距离乘方, 取值 2。使用逐点内插法求得内差点的高程值, 能够很好地逼近地形的真实高程。

2.6 面向地形特征的加点算法流程

在考虑地形实际特征基础上, 添加点以填补裂缝的算法流程如图 7 所示。

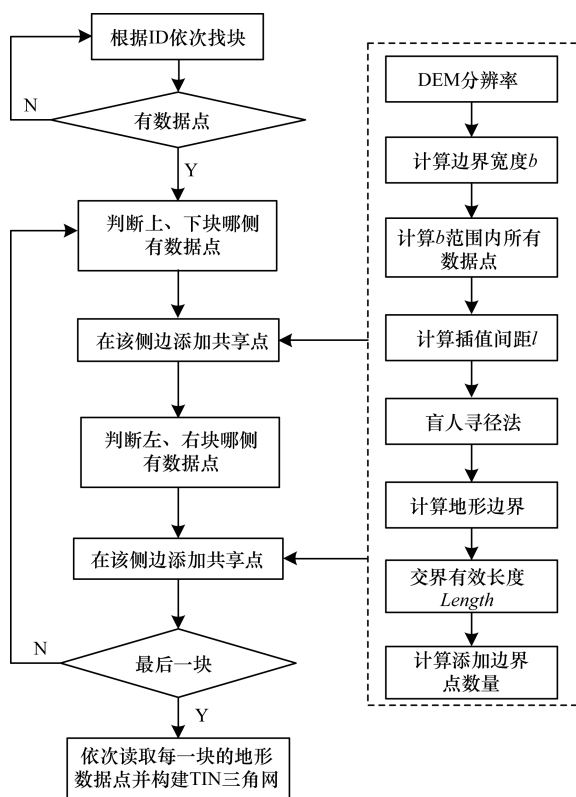


图7 裂缝处理流程

2.7 不同分辨率地块裂缝处理

在对地形点由高分辨率向低分辨率进行分层简化时, 一般可以通过对地形点抽稀的方法^[2]。为防止不规则三角网由于相邻块分辨率不同而产生裂缝, 可采用不抽稀边界点的方法, 但在低分辨率时会产生较多斜长三角形, 影响地形绘制效果。因此, 在对地形点进行抽稀简化时, 动态增大内插间隔距离 l 值, 根据内插间隔距离 l 值的确定方法, 重新计算共享边界加密的数据点, 从而使得各级分辨率的共享边界点都保持一致, 并适应地形多分辨率绘制要求, 防止由于地块之间分辨率不同而产生裂缝。

最后, 将所有添加的共享边界点分别存储在各地形块地形数据中。在地形绘制时, 不再需要重新计算, 以提高地形的渲染速度。

3 实验结果与分析

为验证本文方法的可行性, 基于 Visual C++、NET 编程语言和 Open Scene Graph 三维图形渲染引擎平台对算法进行验证。实验硬件条件为: CPU Intel(R) Core(TM) i5-3230M, 主频 2.60 GHz, 操作系统 64 位 Windows 7, 内存 8 GB, 显存 1 GB。

本文以川藏铁路拉林线(拉萨到林芝)协荣~扎其段实际工程项目为实例, 地形范围长约 35 km, 宽约 6 km, 共有不规则离散 DEM 数据点 1 024 417 个。首先对地形点和影像纹理进行分块处理, 根据金字塔模型中等间隔划分方法对地形进行分层处理^[1], 通过保持特征点的方式从下到上对地形点抽稀, 分辨率依次以 0.5 倍的速率降低, 直到金字塔顶端, 共分 4 层, 并结合内插边界共享点的方法填补裂缝。对地形块使用 Delaunay 三角网并以前缀形式存储在 Oracle 数据库中, 再对各级地块建立四叉树索引, 最后通过动态调度的方式, 根据视点的位置判断视域范围内需要绘制的地形块和各个地块的分辨率。通过 OCI 接口从 Oracle 数据库中读出并渲染, 并且剔除视域外不需要的地形块, 实现地形动态调度与绘制。实验结果如图 8~图 11 所示, 其中, 图 8 与图 9 分别为裂缝处理前、后对比, 图 10 与图 11 为多分辨率地形裂缝处理效果。

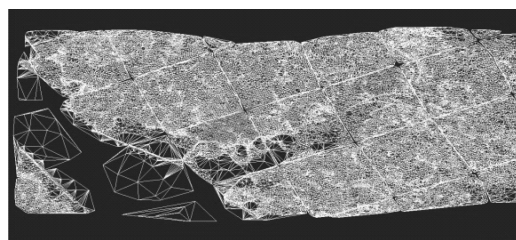


图8 裂缝处理前(三角网模式)

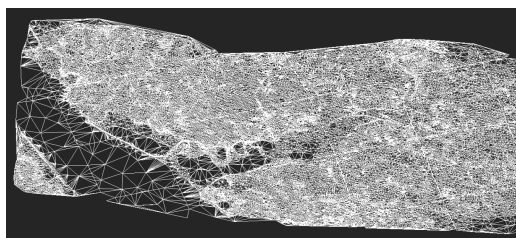


图9 裂缝处理后(三角网模式)

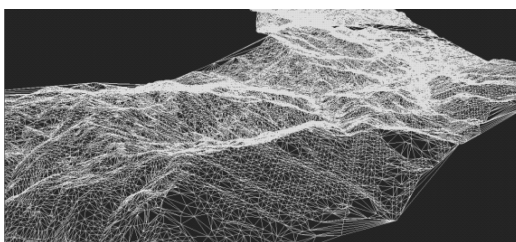


图10 多分辨率地形裂缝处理效果(三角网模式)

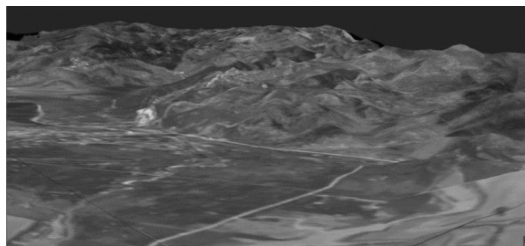


图 11 多分辨率地形裂缝处理效果(纹理模式)

裂缝消除前后三角面片数和地形漫游帧速对比实验结果如表 2 所示。

表 2 裂缝消除前后三角面片数和地形漫游帧速对比

裂缝消除前后	三角面片数	帧速/(frame · s ⁻¹)
消除前	5 544 703	30
消除后	5 550 418	29

从表 2 可以看出,因消除裂缝而增加的少量三角形数量对地形漫游帧速影响微小。

4 结束语

本文针对由不规则三角网模型组成的海量地形分块绘制中出现裂缝的问题,在地形特征的基础上,提出基于 DEM 分辨率动态计算内插间隔并添加共享边界点的方法。实验结果表明,该方法有效解决了海量 TIN 地形分块绘制中出现裂缝的问题,且能够适应不同分辨率地块裂缝的处理,为处理不规则三角网大范围地形分块绘制产生的裂缝提供新的思路。下一步将采用图形处理器来提高用于工程设计的海量地形裂缝消除后三维地形的渲染速度和漫游帧速,以更好地满足工程三维设计要求。

参考文献

- [1] 熊汉江,郑先伟,龚健雅.面向虚拟地球的海陆地形多尺度 TIN 建模及可视化方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1597-1603.
- [2] 尤磊,唐守正,宋新宇.以优先点为中心的 Delaunay 三角网生长算法[J].中国图象图形学报,2016,21(1):60-68.
- [3] 张俊峰,刘文玉.大规模地形实时显示中的裂隙消除算法研究[J].测绘科学,2013,38(4):80-82,100.
- [4] IVKOVIC R,PETROVIC M,GARA B,et al. Dental image analysis with different edge detection operators[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2014, 59(11):1289-1297.
- [5] 郭涛,平西建.基于 OpenGL 的三维地形可视化技术研究[J].计算机工程与设计,2008,29(1):193-195.
- [7] 宋力兵,龚华军,王新华.基于改进的约束四叉树 LOD 全球地形实时绘制[J].计算机与数字工程,2013,41(10):1668-1671,1697.
- [8] 任宏萍,靳彪.基于四叉树的 LOD 地形实时渲染技术[J].华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(2):6-10.
- [9] 李钦,戴树岭,赵永嘉,等.分块 LOD 大规模地形实时渲染算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(5):708-713.
- [10] 李丹,陶飞.三维场景实时建模中地形生成算法优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(10):1387-1392.
- [11] 陈希亮,曹雷,崔平.基于 ROAM 算法的实时地形可视化研究[J].计算机技术与发展,2013,23(1):237-241.
- [12] 侯绍洋,赵学胜,王鹏飞.基于多分辨率半边的三维地形自适应无缝建模[J].地理与地理信息科学,2015,31(2):12-15,53.
- [13] 万明,梁霞,张凤鸣.一种四叉树地形渲染裂缝的改进消除算法[J].系统仿真学报,2015,27(7):1520-1525.
- [14] 石祥滨,武凯华,王越.一种视点相关的 LOD 地形生成算法[J].小型微型计算机系统,2010,31(2):312-316.
- [15] 龙熙华,靳玉萍,宋勇利.大规模地形真实感渲染技术研究[J].计算机工程,2012,38(7):260-262.
- [20] PERRONE D,FAVARO P. A clearer picture of total variation blind deconvolution[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2016,38(6):1041-1055.
- [21] PALUBINSKAS G. An unsupervised clustering method by entropy minimization pattern recognition [M]//LINDEN W, DOSE V, FISCHER R, et al. Maximum entropy and Bayesian methods garching. Berlin, Germany: Springer,1998:1816-1818.
- [22] WU L,GANESH A,SHI B,et al. Robust photometric stereo via low-rank matrix completion and recovery[C]//Proceedings of Asian Conference on Computer Vision. Berlin,Germany:Springer,2010:703-717.
- [23] KAZHDAN M,BOLITHO M,HOPPE H. Poisson surface reconstruction eurographics[C]//Proceedings of Symposium on Geometry Processing. Berlin,Germany: Springer,2006:61-70.

编辑 司森森

编辑 陆燕菲

(上接第 231 页)