

7-31-2020

Improved Crack Removing Algorithm for Quad-Tree Terrain Rendering

Wan Ming

1. *Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;*

Liang Xia

2. *Air Force Command, Beijing 100038, China;*

Fengming Zhang

1. *Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Improved Crack Removing Algorithm for Quad-Tree Terrain Rendering

Abstract

Abstract: In 3D large scale multi-resolution terrain rendering, *an improved algorithm based on LOD control and visibility for crack removing was proposed*. It is proved that *quad-tree grid is restricted while the ratio of visible distance to grid extent is large than 3*. In preprocess stage, cracks were classified to raise crack and dropped crack, and *crack patches with the same size as cracks* were generated and attached to the latter. In real-time rendering stage, no special calculation by CPU for restriction of level of detail or for crack removing between adjacent grids was needed. Example shows that the algorithm is simple, reduces additional patches about 75% than traditional skirt algorithm, and removes cracks efficiently.

Keywords

restricted quad-tree grid, terrain rendering, multi-resolution, terrain crack, crack patch

Recommended Citation

Wan Ming, Liang Xia, Zhang Fengming. Improved Crack Removing Algorithm for Quad-Tree Terrain Rendering[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1520-1525.

一种四叉树地形渲染裂缝的改进消除算法

万明¹, 梁霞², 张凤鸣¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 空军司令部, 北京 100038)

摘要: 在大地形三维多分辨率显示中, 针对裂缝消除问题提出了一种基于 LOD (Level of Detail) 控制和裂缝可视性的改进算法。证明在四叉树网格可视距离/尺寸比 >3 时, 必然满足限制四叉树约束; 基于裂缝的可见性, 在预处理阶段通过区分地形上升裂缝和地形下降裂缝, 为后者添加与裂缝大小一致的几何图形来生成裂缝消除补丁; 在实时渲染过程中, 既不需要通过 CPU 计算来控制网格的层次差, 也不需要通过 CPU 来识别相邻网格层次差和消除裂缝。实验测试表明: 该算法简单有效, 附加网格数据比裙边算法减少约 75%, 且完全能够避免地形裂缝的显示。

关键词: 限制四叉树网格; 地形渲染; 多分辨率; 地形裂缝; 裂缝补丁

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2015)07-1520-07

Improved Crack Removing Algorithm for Quad-Tree Terrain Rendering

Wan Ming¹, Liang Xia², Zhang Fengming¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force Command, Beijing 100038, China)

Abstract: In 3D large scale multi-resolution terrain rendering, an improved algorithm based on LOD control and visibility for crack removing was proposed. It is proved that quad-tree grid is restricted while the ratio of visible distance to grid extent is large than 3. In preprocess stage, cracks were classified to raise crack and dropped crack, and crack patches with the same size as cracks were generated and attached to the latter. In real-time rendering stage, no special calculation by CPU for restriction of level of detail or for crack removing between adjacent grids was needed. Example shows that the algorithm is simple, reduces additional patches about 75% than traditional skirt algorithm, and removes cracks efficiently.

Keywords: restricted quad-tree grid; terrain rendering; multi-resolution; terrain crack; crack patch

引言

三维大地形的实时渲染广泛应用于地理信息系统、虚拟现实系统、飞行模拟系统、视频游戏以及数字地球软件等, 一直是计算机图形学中的研究热点。对于大地形的三维显示, 由于现有计算机存

储与运算能力的限制, 通常采用 LOD(Level of Detail)技术进行设计。在 LOD 技术中, 由于 LOD 层次差异引入的裂缝问题是其中一个需要解决的关键性问题。该问题通常是由于相邻网格存在层次差, 当高层次网格顶点不在低层次网格的边线上时, 使得渲染地形不完整或不连续。传统的裂缝消除方法主要分为附加补丁、模板分解和顶点调整 3 大类。

附加补丁的典型算法是裙边算法^[1-2], 也称为裙带算法, 即为各层次所有网格添加沿网格边线垂直向下的包围体, 当相邻网格层次差不一致时, 由



收稿日期: 2014-07-03 修回日期: 2014-12-30;
作者简介: 万明(1979-), 男, 江西南昌人, 博士, 讲师, 研究方向为飞行仿真与虚拟现实技术; 梁霞(1979-), 女, 云南昆明人, 硕士, 研究方向为航空电子技术; 张凤鸣(1963-), 男, 四川梁平人, 教授, 博导, 研究方向为智能信息处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1520 •

裙边弥补网格之间的空隙, 从视觉上挡住裂缝。这类方法的优点在于: (1) 算法简单, 计算量小; (2) 允许较大的层次变迁, 不要求相邻网格层次差不大于 1; (3) 裙边以及地形网格等可以离线生成并存储, 在地形渲染过程中不需要 CPU 的额外计算。其缺点包括: (1) 为消除裂缝所需增加的几何体数较多, 例如对于一个四边形网格, 所需增加的网格数至少是 4 个, 即增加的网格数为 400%, 这使得最终渲染的网格数大大增加; (2) 裙边的高度不好控制, 太短挡不住裂缝, 太长又将占用更多的处理资源; (3) 裙边通常都是垂直向下的, 因此在裙边显示的地方会出现垂直的地形显示, 这与一般地表高度通常为斜变的特征不符。

模板分解^[3-4]是另一类地形裂缝的处理方式, 算法在四叉树分解过程中, 实时判断相邻网格的层次差, 并按照若干标准三角化模板进行分解, 确保相邻网格之间不存在裂缝。该类算法的优点是裂缝的消除与网格的生成是同步进行的, 因此处理的速度较快, 有利于地形的实时渲染。但该类算法的缺点也很突出: (1) 网格实时生成, 需要大量的 CPU 计算资源; (2) 基于模板个数的限制, 通常要求网格之间的层次差 ≤ 1 。

第 3 类地形裂缝方法是调整造成裂缝的顶点, 具体又分为 3 种: (1) 直接将造成裂缝的高层次网格几何图形顶点移至低层次网格边线上^[5]; (2) 分裂较高层次网格^[6]; (3) 合并低层次网格^[7]。这类算法实际上是最早出现的裂缝消除算法, 不仅适用于规则网格, 也适用于非规则网格, 但算法: (1) 需要 CPU 的实时计算; (2) 当相邻网格层次差 >1 时算法会变得极为复杂。

除以上裂缝消除算法外, 文献[8]提出了一种自适应网格裂缝消除算法, 基于检查-修正函数实时检测并填补裂缝。文献[9]提出了基于渐进网格的簇层次模型, 可有效消除模型显示中的裂缝。文献[10]利用正切函数控制顶点偏移消除裂缝。文献[11]通过一种复杂的“拉链”算法处理裂缝。文献[12]则通过建立顶点的依赖关系实现裂缝的消除。

从以上讨论可以看出, 传统裂缝消除算法虽然能够消除裂缝问题, 但通常都存在 CPU 计算量较大或附加裂缝填补几何体数较多的问题。针对限制四叉树^[12](也称为限定四叉树或约束四叉树)规则网格, 提出一种基于离线数据的多分辨率地形渲染裂缝消除方法。此处限制四叉树是指在地形渲染过程中, 以四叉树细化规则生成地形的多分辨率分层网格, 并在显示时限制相邻网格层次差 ≤ 1 。采用该限制的原因之一是在处理裂缝的过程中, 仅需要考虑相邻层次差造成的裂缝, 因此需要考虑的情况较少, 计算也简单得多。算法首先证明在可视距离/尺寸比 >3 时, 地形渲染的 LOD 控制算法满足限制四叉树约束, 然后通过离线附加裂缝补丁来消除裂缝。

1 四叉树地形网格的 LOD 限制

1.1 地形网格的四叉树表示

采用与文献[12]类似的四叉树地形网格分解规则, 如图 1 所示。地形数据被采样为分辨率递增的若干层次, 以满足多分辨率 LOD 显示的需要。

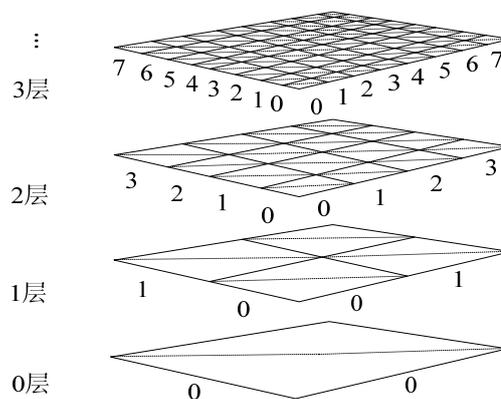


图1 地形网格四叉树

0 层网格对应于地形数据的初始大小, 从下至上按 1/2 采样距离递减规则生成更高层次的网格。上一层每个几何网格的地理面积大小为下一层次几何网格的 1/4, 即层次越深网格尺寸越小, 分辨率越高。每个网格均为矩形, 但被存储为 2 个等腰三角形, 如图中虚线分割所示。设原始高程数据

的尺寸为 $E_x \times E_y$, 原始高程数据 X, Y 轴分辨率分别为 res_x 和 res_y , 可计算网格的层次数 N 为

$$N = \min(\lfloor \log_2 E_x / res_x \rfloor, \lfloor \log_2 E_y / res_y \rfloor) \quad (1)$$

对于同层次网格, 由于相邻网格共享边线, 因此在渲染时不存在裂缝问题。在渲染时根据观察者视域和距离, 选择所需的网格区域和层次进行显示。

1.2 限制四叉树的 LOD 控制条件

一般显示器的分辨率为 0.3 mm/pixel 左右。设本文中地形网格对应的纹理文件像素尺寸为 512×512 , 对应的显示地形宽度为 $512 \times 0.3 \times 10^{-3} = 0.1536$ m。人眼一般与屏幕的距离约为 0.6 m 左右, 也就是说, 在 0.6 m 处以像素 512×512 显示地形的宽度约为 0.1536 m。相应的对于一块几何尺寸为 $d \times d$ 的地形, 当在屏幕上以 512×512 像素显示时, 观察者与地形块的距离上界可近似计算为

$$d_{Lod} = d / 0.1536 \times 0.6 \approx 3.91d \quad (2)$$

例如对于一块 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的地形块, 该距离可大致计算为 $3.91 \times 100 \times 10^3 = 391 \text{ km}$ 。

对于一个几何层次为 $0 \sim N-1$ 的网格, 设 $N-1$ 层网格的几何尺寸为 $d \times d$, 则其可见距离设置为 $(0, d_0]$, 即在该距离范围内时显示 $N-1$ 层次网格, 其中 $d_0 = 3.91d$ 。 $N-2 \sim 0$ 层网格的可见范围依次为 $(d_0, d_0 \times 2]$, $(d_0 \times 2, d_0 \times 4]$, $(d_0 \times 4, d_0 \times 8]$, ...。即距离越远, 所见网格分辨率越低, 反之越高。可视距离连续但不重叠, 且可视距离上界以 2 的指数倍增长。在实际计算中, 视角的计算量要远大于距离的计算量, 此处分辨率切换规则仅依据网格与观察者的距离, 而未考虑视角, 以便减小 LOD 切换控制的计算量。

定义可视距离/尺寸比为网格可视距离上界与网格几何尺寸的比值。显然, 对于本文线性四叉树网格, 该比值为常数, 即 3.91。

定理 1: 对于采用四叉树网格的地形网格表示方式, 若可视距离/尺寸比 > 3 , 则满足限制四叉树约束。

证明: 将地形网格表示为如图 2 的形式, 该视

图为垂直平面内视图, 其中 O 为观察者。设 CE 网格的几何尺寸为 d , 对应网格的层次为 l_{CE} , 可视距离为 $(d_{lod}/2, d_{lod}]$, 根据题设有可视距离/尺寸比 > 3 , 即 $d_{lod}/d > 3$ 。 D 为 CE 网格的中点, 显然有 $d_{lod}/2 < OD \leq d_{lod}$ 。为证明定理 1, 需证明 CE 相邻网格层次 ≤ 1 。

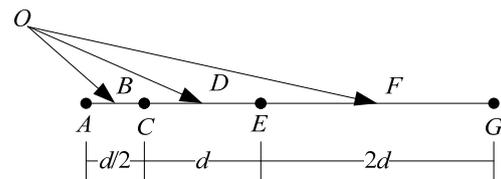


图2 垂直视图内的相邻网格

下面分远、近 2 种情况进行分析:

(1) 设 B 距离 C 的水平距离为 $d/4$, 有

$$OB \geq OD - BD \geq d_{lod}/2 - 3d/4 > d_{lod}/4$$

即在较近位置, 由线性四叉树网格的定义, AC 网格的 LOD 层次 $= l_{CE}$ 或 $l_{CE} + 1$ (后者可视距离为 $(d_{lod}/4, d_{lod}/2]$);

(2) 设 F 距离 C 的水平距离为 d , 有

$$OF \leq OD + DF \leq d_{lod} + 3d/2 < 1.5d_{lod} < 2d_{lod}$$

即在较远位置, 由线性四叉树网格的定义, EG 网格的 LOD 层次 $= l_{CE}$ 或 $l_{CE} - 1$ (后者可视距离为 $(d_{lod}, 2d_{lod}]$)。

综上所述, 即证。

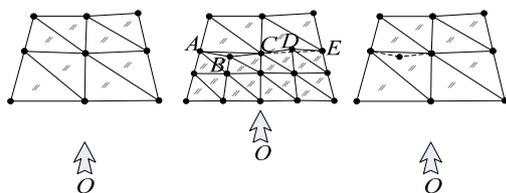
本文中的可视距离/尺寸比为 3.91, 由以上讨论可知满足限制四叉树条件, 因此自然满足相邻网格层次差 ≤ 1 (即分辨率 ≤ 2 倍) 的约束条件, 在渲染过程中无需进行额外的判断控制。

2 限制四叉树地形网格的裂缝消除

2.1 地形裂缝可视性分析

当相邻网格的 LOD 不一致时, 若较高层次网格的顶点不在较低层次网格的边线上, 即可能出现地形裂缝。如图 3(a) 所示, 当观察者 (O) 较远时, 由于此时网格的 LOD 相同, 因此可保证所有图形共享边线, 不存在裂缝。当观察者趋近地形块时,

如图 3(b)所示, 较近处的地形首先增加 LOD, 使得较高细节地形的顶点位于较低细节图形中点的铅垂线上, 当两者不在同一高度时, 就可能出现裂缝, 如图中 B 点低于边线 AC 的中点, 因此在视景中 ΔABC 处将可透视出背景, 因而出现裂缝。



(a) 相同层次 (b) 不同层次 (c) 裂缝补丁

图3 地形裂缝问题

再次观察图 3(b), 在 B 点处, 由于 B 点低于 AC 的中点, 因而出现裂缝, 此情形称为“地形下降裂缝”。而观察 D 点可以看出, 虽然 D 点的高度与 CE 边线的中点并不在同一高度, 但由于 D 点的高度高于 CE 边线的中点, 从观察者的角度在 D 点处的网格是重叠的, 因此裂缝不可见, 该情形称为“地形上升裂缝”, 对于该类裂缝实际上不需要处理。

2.2 基于裂缝补丁的地形裂缝消除算法

本文提出一种新的裂缝消除方法, 该方法结合较高细节网格总是距离观察者较近的特点, 通过在相邻层次细节层次之间产生补丁图形, 避免不同层次间网格裂缝的显示。从上文分析可见, 算法的主要任务是识别可能出现的地形下降裂缝, 并为较低层次网格添加相应的裂缝补丁, 从而避免裂缝的显示。算法步骤如下:

步骤 1. 设初始层次为 $l=N-2$, 即次高层 (N 为网格层次数);

步骤 2. 若 $l=-1$, 算法结束退出, 否则转步骤 3;

步骤 3. 对 l 层所有网格的所有边线, 计算边线(设为 AC)中点与 $l+1$ 层网格相应位置(设为 B)的高度差 Δh , 若 $\Delta h > 0$, 则生成网格补丁三角 ΔABC , 并将其添加至 AC 边线所属的网格;

步骤 4. $l=l-1$, 转步骤 2。

生成的补丁实际均为等腰三角形, 并以附加图

形的形式与较高层次网格离线存储在同一网格文件中, 以便在渲染时统一读取。在渲染阶段, 不仅要渲染网格图形, 同时也要渲染裂缝补丁, 以便消除可能出现的裂缝。该算法计算简单, 且所有计算在数据预处理阶段完成, 不需要在渲染时用 CPU 判断裂缝。

需要说明的是, 在生成裂缝补丁图形后, 原始网格文件的数据有所增加, 但每个网格增加的图形数最多为 4 个三角形。在相邻网格层次相同时, 即使绘制裂缝补丁, 但由于裂缝补丁总是向下的, 并低于同层次网格, 此时裂缝网格不可见, 如图 3(c)所示, 并不影响显示的效果, 注意该处实际上有两个相同的补丁三角, 分别属于前后两个网格。

3 实验与分析

为验证本文方法, 取典型山区地形数据进行验证。验证数据高程来源于 SRTM, 经纬度范围为 $E85^\circ \sim E86^\circ$, $N29^\circ \sim N30^\circ$, 水平分辨率为 3 弧秒(约 90 m), 垂直分辨率为 0.1 m。地形网格对应的纹理文件由 Global Mapper 9.03 软件根据高度着色生成, 着色算法采用“地图阴影”。根据该着色算法, 蓝色部分表示较小高度, 红色表示较高高度。实验验证的硬件平台 CPU 为 Intel Core i5 3.2GHz, 内存 3 GB, 显卡为 NVIDIA GeForce 210 / 256MB 显存; 软件平台为 Vega Prime v2.2(以下简称 VP)。实验软件基于 VP 构建, 具备基本的天体气象环境, 并采用其场景遍历控制组件。针对同一区域, 分别使用其原有的大地形算法(简称 VP 算法, 即用 Creator Terrain Studio 离线构建大地形数据库, 用 MeteFlight 数据库组件实时载入)、裙边算法、本文算法进行实验, 以便对比分析。

本文算法裂缝消除效果的对比实验如图 4 所示。其中(a)为未消除裂缝时的地形显示, (b)为采用本文方法生成裂缝补丁的单独显示; (c)为合并显示的裂缝消除结果。图中左侧为贴纹理后的显示, 右侧为线框模式下的显示。

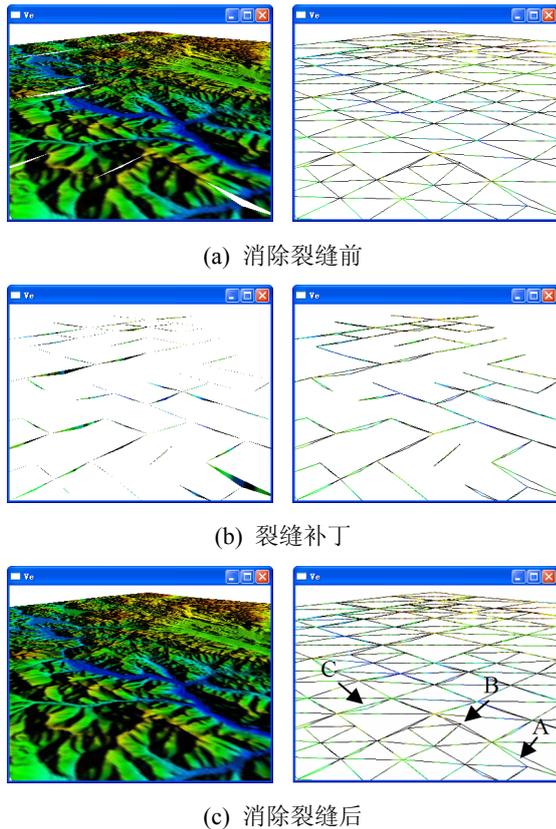


图4 裂缝消除结果

图 4(c)中地形下降裂缝如 A 处所示, 对比图 4(b)可知生成了裂缝补丁, 而对于形如 B 处的地形下降裂缝, 并未生成补丁。需要说明的是, 不论相

邻网格之间是否存在层次差, 本文算法中裂缝补丁都进行绘制而不进行判断选择, 如 C 处所示。此时虽然补丁也显示, 但由于补丁都是向下的, 因此并不可见。这样做的目的是减少 CPU 的计算判断, 以便空出更多的计算资源给诸如人机交互、场景管理、模型显示、特效显示、碰撞检测、时间管理等其他关键任务。

对生成的补丁三角进行统计, 并与裙边算法生成的附加三角个数进行比较(裙边长度设定为 10 000 m, 每个裙边图形按通常做法分解为 2 个三角形), 如表 1 所示。其中 0 层网格的边线都在地形边界上, 10 层没有更高层, 两者都不需要产生附加图形来消除裂缝。在本文算法中, 由于每个网格有 4 条边, 相比于较高层次网格, 边线中点下降造成地形下降裂缝的概率为 50%, 即每个网格为消除裂缝平均需增加 2 个三角, 而传统的裙边算法需要 4 个垂直裙边即 8 个三角, 因此附加三角减少个数约为 75%。这与实验数据的统计结果 75.01% 是近似的。从线框模式显示可以看出, 裂缝补丁的大小与裂缝的尺寸是完全一致的, 因此并不需要像裙边算法一样设定长度参数。

表1 实验数据统计(网格层数 $N=11$)

层次	网格数	分辨率(m)	d_{lod} (km)	附加三角个数		
				裙边算法	本文算法	减少率(%)
0	1	111 317.10	435.25	0	0	-
1	4	55 658.55	217.62	32	6	81.25
2	16	27 829.27	108.81	128	35	72.66
3	64	13 914.64	54.41	512	147	71.29
4	256	6 957.32	27.20	2 048	552	73.05
5	1 024	3 478.66	13.60	8 192	2 224	72.85
6	4 096	1 739.33	6.80	32 768	9 151	72.07
7	16 384	869.66	3.40	131 072	36 394	72.23
8	65 536	434.83	1.70	524 288	137 108	73.85
9	262 144	217.42	0.85	2 097 152	513 166	75.53
10	1 048 576	108.71	0.43	0	0	-
合计	1 398 101	-	-	2 796 192	698 783	75.01

任意选择一处存在地形裂缝的区域, 采用不同视角进行观察, 结果如图 5 所示。为便于观察, 在

图中被观察点位置放置了一个三维的方位指示模型并顺时针旋转了 45°。图中从上至下依次为方位

角为 0° , 90° , 180° , 270° 时的地形显示, 从左至右分别为裂缝消除前、裂缝消除后、线框模式的地形显示。从实验结果可以看出, 对于同一地点, 不同视角的显示画面中均未出现可见裂缝(中间一列), 说明了本文方法的视角无关性。实际上移动观察者漫游整个场景, 均未发现有可见裂缝现象的出现。

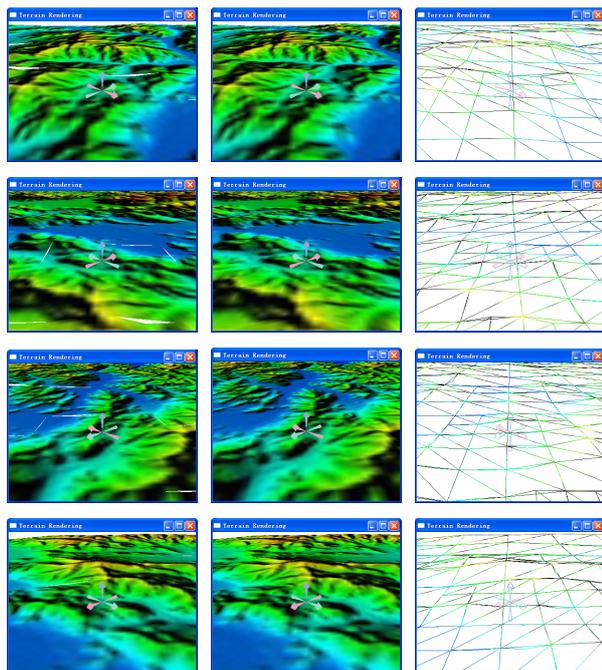


图5 多视角地形观察结果

设定显示窗体的大小为 800×600 像素, 将本文算法与 VP 算法、裙边算法的实验结果进行对比, 如表 2 所示。

表2 实验结果对比分析

实验算法	VP 算法	裙边算法	本文算法
是否完全消除裂缝	否	是	是
附加三角个数/网格数(%)	0	200	49.98
帧速率(帧/秒)	185~238	71~202	148~221
平均帧速率(帧/秒)	235	178	216

实验结果表明: 在地形渲染过程中, 本文算法很好地解决了地形裂缝问题, 确保了显示场景的完整性; 相比于 VP 算法, 虽然补丁三角的引入一定程度上降低了帧速率, 但显示效果仍然非常流畅, 且运行效率大大优于裙边算法。

4 结论

针对大地形显示中地形裂缝这一关键问题, 提出了一种改进的多分辨率四叉树网格地形裂缝消除方法, 该方法利用了较高细节层次网格总是距离观察者近的特点, 通过增加有限的附加补丁图形避免裂缝的显示, 其优点概括为以下几点: (1)预处理过程简单, 计算量小: 在判断地形下降裂缝的过程中, 仅需要处理网格边界中线上的顶点, 对于网格中的其它顶点其地形完整性由网格自身保证; (2)存储需求小: 附加裂缝消除网格大大减少, 优于传统的裙边裂缝消除技术; (3)实时渲染过程中不增加 CPU 负担: 相比于模板分解和顶点调整方法, 既不需要额外计算来限制网格层次差, 也不需要在线生成裂缝补丁。该方法的缺点与裙边方法相同, 即补丁图形均为垂直向下, 与实际地形高度斜变的特征略有不同, 在局部细节处造成地形过渡的不自然。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ulrich T. Rendering massive terrains using chunked level of detail control [C]// Computer Graphics Proceedings, Course Note #35. New York: Annual Press, 2002.
- [3] 郑新, 刘玮, 吕辰雷, 等. 海量地形实时动态存储与绘制的 GPU 实现算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(8): 1146-1152.
- [4] 许妙忠. 大规模地形实时绘制的算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(5): 392-395.
- [5] Feng W W, Kim B U, Yu Y Z, et al. Feature-preserving triangular geometry images for level-of-detail representation of static and skinned meshes [J]. ACM Transactions on Graphics (S 0730-0301), 2010, 29(2): 23-38.
- [6] Duchaineau M, Wolinsky M, Sigtet D E, et al. ROAMing terrain: real-time optimally adapting meshes [C]// Proceedings of the 8th Conference on Visualization. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press, 1997: 81-88.
- [7] 赵学胜, 范德芹, 王娇娇. 退化四叉树格网的全球多分辨率 DEM 无缝表达[J]. 测绘学报, 2012, 41(6): 918-925.
- [8] 张小虎, 邵永社, 叶勤. 基于自适应四叉树的地形 LOD 算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2596-2598.

(下转第 1531 页)