基于 web3d 的海底地层三维可视化平台

苏天赟[1]，吕智涵[2]，周林[1]，贾贞[1]，李新放[1]
（1.国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室，青岛 266061；
2.中国科学院深圳先进技术研究院，深圳 518055）

摘要：针对海底多源综合数据的内容和特点，设计了“剖面—钻孔”三维空间建模方法，将海上地震勘探获取的海底地层剖面离散点数据进行 Kriging 插值，得到每一地层界面的均匀网格；然后，为每一层界面构建 Delaunay 三角网模型，同时以钻孔测试数据对其缓冲区内的点集进行高度值修正，确定海底地层界面模型，并且采用 GPU 着色器对每一层进行专题渲染。*通过对三维网络引擎技术的研究，实现了网络环境下的海底地震剖面、地层结构和地质体的三维建模和显示*。采用东营附近海域获得的海底综合数据，对该平台的功能进行了初步的应用和示范，取得了较好的效果。

关键词：网络虚拟现实；克里格插值；Delaunay 三角网；GPU；海底地层
中图分类号：TP391.9　　文献标识码：A　　文章编号：1004-731X (2013) 10-2403-05

Web3d Based Seabed Strata Visualization Platform

SU Tian-yun[1], *LV Zhi-han*[2], *ZHOU Lin*[1], *JIA Zhen*[1], *LI Xin-fang*[1]
(1. First Institute of Oceanography, SOA, China, Qingdao 266061, China;
2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology Chinese Academy of Science, Shenzhen 518055, China)

Abstract: According to the characteristics of the multi-source comprehensive data under the seabed, "section-boring" three-dimensional model was designed. In this model, the seabed stratigraphic profile obtained by seismic reflection was digitized into discrete points and interpolated with approved Kriging arithmetic to produce uniform grid in every strata layer. Then Delaunay triangular model was constructed in every layer and calibrated using boring data to rectify the depth value of the dataset within the buffer. Finally, the constructed 3D seabed stratigraphic model was rendered every layer by GPU shader engine. *With research of the web3D engine technology, web-based 3D modeling and rendering of undersea seismic sections, geological structure and stratigraphy were implemented.* Using comprehensive undersea data obtained near Dongying area, a preliminary application and demonstration of the platform was achieved.
Key words: Web3D; Kriging; Delaunay triangular; GPU; seabed

引言

由于海底的特殊地理环境，人们无法直接对海底地质现象和特征进行认识、分析，往往需要进行大量的多学科的综合海洋调查活动来获取海底信息，包括间接探测数据(如地球物理数据、遥感等)和直接采样数据(如底质取样、钻探取样等)，如何将这些海底多维信息进行可视化表达，让人们对海底信息进行更直观的认识和交互式综合分析，一直以来是众多学科领域专家研究的热点问题。

目前可视化技术在海洋地学领域的应用主要集中在二维环境下通过海底的水平、垂直或一定方向的切面来分析、显示三维海底信息(如水深地形图、海底地貌和障碍物图、综合柱状图和地质剖面图)，三维海底地质体的完整信息分散在各个独立的二维图像中，很难了解海底的三维甚至多维的细节特征。随着三维可视化技术的发展，人们开始尝试对海底多维数据的高程信息(z)进行表达，比如将带有地形起伏的海底表面投影到二维平面上，或者采用数字高程

收稿日期：2013-05-28　　修回日期：2013-07-25
基金项目：国家自然科学基金面上项目(61070147)；国家科技重大专项子任务(2011ZX05056-001-02)；海洋公益性行业科研专项经费项目(201205001)
作者简介：苏天赟(1977-)，男，山东青岛人，博士，副研，研究方向为海洋环境信息管理与多维动态可视化；吕智涵(1984-)，男，山东青岛，博士后，助研，研究方向为虚拟现实与网络虚拟现实、地理信息系统。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模型(Digital Elevation Model, DEM)的方法来处理和表达海底地形的起伏，实现三维环境下的海底漫游浏览。在这种表达方式下，高程信息仅仅作为一个显示控制的属性值在三维环境中进行表达，只能显示地表的信息，而对于地表内部任意一点的特征却不能有效地表示，因此只能称之为假三维或2.5维环境下的海底表面信息的可视化。

随着三维可视化技术的发展，许多专家和学者针对不同的应用特点对三维空间对象的内部结构和属性进行建模，提出了许多地学三维空间对象的建模方法[1-3]，在三维可视化[4,5]、三维拓扑[6,7]、三维空间分析和检索[8]等方面的理论研究工作也取得了较大的进展，形成了一些成熟的三维可视化商业软件，如美国 Dynamic Graphic 公司的 IVM 可视化软件、加拿大 LYNX GEOSYSTEM 公司开发的 LYNX、C Tech 公司的软件产品 EVS 等。特别是近些年来，Web3D 和 WebVR[9]技术得到迅速发展，使得空间对象三维可视化交互浏览更加便捷、灵活[10,11]。

本文借鉴已有的可视化研究成果，针对海底综合数据的内容和特点，基于钻孔数据和剖面数据对海底地质体的三维空间构模方法和网络三维交互技术进行研究，实现网络环境下海底综合数据直观、全面的表达。

1 数据准备

本文采用东营附近海域的实测海底数据作为建模对象，数据内容包括多波束水深数据、侧扫声纳影像、浅地层剖面、钻孔数据和表层取样数据。这些数据的原始格式和空间标准都不一致，为了在三维环境下对海底综合数据进行整合和表达，需要采用统一的格式和空间标准对海底综合数据进行处理和转换。其中，水深数据和浅剖数据均转化为(x, y, z)格式的文本，可以直接用于插值和表面建模；钻孔数据转换为文本文件，按照指定的格式记录钻孔的经纬度、孔口水深、孔径、钻孔长度、每个地层的底界面深度、地层描述等，用于对空间模型进行校正；表层取样数据经过分析和处理，制作成底质类型图，以 ESRI shape 格式进行存储；侧扫影像数据采用 geotiff 格式进行存储。所有数据采用统一的空间标准(北京-54 坐标系统、高斯克吕格投影)进行转换和配准。

2 三维空间建模

所谓三维地质体空间建模，就是运用计算机虚拟现实技术，在三维环境下，将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来，并用于地质分析的技术。在过去的十几年中，人们已经提出了 20 余种空间构模方法，如 Grid 与 TIN 模型、B-rep 模型、多层 DEM 构模、CSG 构模、Octree 构模、TEN 构模、Tri-Prism, TP 构模、3D FDS 和 SSM 等。每种空间数据模型有其优缺点，适应不同的应用领域。

海底钻孔资料可以直接反映采样点的地层分布状况，并且通过相应的实验进而可以获得岩土的物理和化学性质，从而可以详细、准确的描述海底内部的构造特征。但是，由于海洋复杂的地理环境，钻孔数据的获取非常困难，成本极高，因此在一定研究区域内获得的钻孔数量较少，覆盖密度低。如果单纯基于这些少量的钻孔资料构建海底地质体空间模型显然不能准确、完整的描述海底的内部构造特征，特别是在钻孔之间变化比较复杂的区域。为了能够详细获取海底区域性的地质现象和特征，通过间接的地球物理勘探方式获取了大量的地层剖面资料，经过专家解释后可以反映出钻孔之间或钻孔周边区域的地层信息。但是，由于剖面资料是通过间接方式获得的海底信息，需要经过人为的分析和解释，仅依靠剖面资料对海底地质体进行三维空间建模存在较大的不确定性。因此，本文将钻孔资料与剖面资料相结合，采用局部的准确数据和区域性的解释数据对海底地质体进行三维空间建模，从而提高海底三维空间模型的精确度与表现能力。

2.1 建模流程

“剖面-钻孔”三维空间建模方法的具体建模流程如图 1。

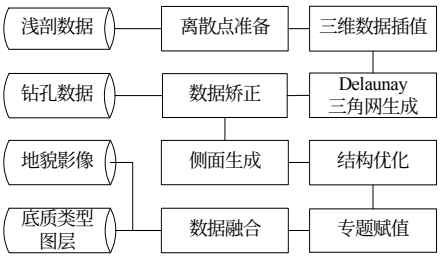

图 1 建模流程

(1) 离散点准备

将获取的浅剖数据中，每一层的离散点数据分别写入一个文本文件中，每行记录一个点的信息，每个点格式为“$X\ Y\ Z$”。

(2) 三维数据插值

合理运用插值可以拟补源数据的不足，获取更平滑的数据。根据输入的区域参数[Xmin, Xmax], [Ymin, Ymax]，将该范围内的离散点数据读入内存，利用 kriging 插值方法，设置网格区间参数，插值为均匀的网格点数据集。这种方法将首先考虑的是空间属性在空间位置上的变异分布，确定对一个待插点值有影响的距离范围，然后用此范围内的采样点来估计待插点属性值。它是一种求最优线性无偏内

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

插估计量的方法，是在考虑了信息样品的形状、大小及其与待估块段相互间的空间分布位置等几何特征以及品位的空间结构之后，为达到线性、无偏和最小估计方差的估计，而对每一样品值分别赋与一定的系数,最后进行加权平均来估计块段品位的方法。

(3) Delaunay 三角网生成

以 Bowyer/Watson 算法[12,13]为基础, 结合 Lawson 算法等对网格点数据集进行 Delaunay 剖分，生成三角网，存入几何体中，再插入场景根节点。Delaunay 三角网能保证每个三角形的角度最接近于正三角形，符合“三角剖分最小内角为最大”的图形优化准则；另外，Delaunay 三角网具有唯一性, 即对同一个不规则离散数据点集, 其对应的 Delaunay 三角网是唯一的，因此 Delaunay 是最优三角网。

(4) 数据矫正

将钻孔数据存入控制点集，以圆形缓冲区算法计算每个控制点的辐射区域。以控制点的高度值对该区域内的插值数据点的高度值进行矫正。假设对于控制点 $V0(x0,y0,z0)$, 存在由浅剖数据插值后生成的 $V1(x0,y0,z1)$, 则矫正误差为 $H=z1-z0$, 假设控制点 $V0$ 的缓冲区 $A0$ 的半径为 $R0$, 则对于待矫点 $Vi(xi,yi,zi)\in A0$, 距离 $V0$ 的二维距离 $R0i=((yi-y0)2+(xi-x0)2)1/2$, 则矫正后的高度值为 $zi=zi+H*(R0i/R0)\lambda$, $\lambda>0$。如遇到缓冲区重叠情况则将待矫点与每个控制点的差求几何平均值后矫正。矫正完成后，删除待矫正点，采用 Lawson 算法将矫正点加入 Delaunay 三角网。

(5) 侧面生成

首先选出每一层各边界的点集。显然第 n 层的各点中 X,Y 值的最大最小值分别为初始设置的区域参数 Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, 则满足条件 $X=X$min, $X=X$max, Y=Ymin, $Y=Y$max 的各点分别为：X 值最小，X 值最大，Y 值最小，Y 值最大的边界点集。将各边界点集分别存入矢量集：coordsnxmin, coordsnxmax, coordsnymin, coordsnymax。

将相邻的 i, i+1 层的同侧边的各点以逆时针方向存入一个矢量集 vectori(i+1)。逆时针排序将定义该侧面的法线方向向外，可以适合光照与 GPU 渲染。逆时针存储的方式是：以 X 值最小的边界为例，Z 值较小的 i 层边界点集 coordsixmin 由小到大的排序存入 vectori(i+1)后，Z 值较大的 i+1 层边界点集 coords(i+1)xmin 再按照由大到小的排序存入。然后由这个 vectori(i+1)中的有序顶点为顶点生成多边形。此外，由于地形起伏导致地层侧面可能是凹多边形，为完全显示，要进行分格化(Tessellator)处理。将该侧面存入几何体类型，而后插入场景根节点。

(6) 结构优化

为每一由 Delaunay 三角网建模而来的层底面建立三角带对三角面元统一管理并索引，可以减少 I/O 次数，提升运行效率。并实现塌陷法[14]对生成的地层几何体化简，生成结果的渲染将占用更少系统资源。

(7) 专题赋值

专题赋值主要包含如下几方面：a. 依据每一层的地质类型对该层的顶面和侧面赋以专题颜色，或者贴赋相应的岩土纹理; b. 对海面采用 GPU 着色器渲染出动态波浪效果。

(8) 数据融合

将海底地貌影像贴赋到起伏的海底地形表面，可帮助观察海底基础地貌环境，进行特征识别和区域划分；对于底质数据，将底质类型矢量图层导入内存后，与海底地形高程数据进行融合，贴赋至海底地形表面。

2.2 剖面分析

用户通过两次点击选取地质体剖切线段的起止点，将由两点确定的剖切线延长，与地层边缘相切，获取交点。假设起始点分别为$(x0,y0)$和$(x1,y1)$, 则剖面公式为$(y1-y0)X+(x0-x1)Y+y0\times x1-y1\times x0=0$。将面向视景体的剖面外侧裁剪掉，露出剖面内部。之后根据剖面同各个层面边界的交点生成剖面图。假设数据的边界为 X 范围(Xstart,Xend)，Y 范围(Ystart,Yend)，对应的交点 X 极值为(minx, maxx)，Y 极值为(miny, maxy)，则有：

$$miny=((y1-y0)/(x1-x0))*Xstart+(x1*y0-x0*y1)/(x1-x0);$$

$$maxy=((y1-y0)/(x1-x0))*Xend+(x1*y0-x0*y1)/(x1-x0);$$

$$minx=((x1-x0)/(y1-y0))*Ystart+(x0*y1-x1*y0)/(y1-y0);$$

$$maxx=((x1-x0)/(y1-y0))*Yend+(x0*y1-x1*y0)/(y1-y0);$$

对每一层各个二维交点的高度值进行插值，求得三维空间交点，并进行缝合构成剖面。地质体剩余部分与剖面结合到一起构成剖面分析后的可视化结果。

2.3 平台设计

基于上述设计的“剖面-钻孔”三维空间建模流程，对可视化平台中的核心模块和类图进行设计，便于模型的程序实现和可视化表达。

针对应用需求，利用面向对象思想设计了工厂模式和观察者模式,增强了系统地延展性和灵活性。工厂模式主要面向资源管理，能够实现多类型、多格式地理数据的读取和加载；观察者模式主要面向用户的交互，通过设计事件响应机制来实现。

3 网络引擎

3.1 基于图的场景拓扑

采用层次包围盒来实现场景图形的管理，综合采用包

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围球和包围盒两种形式来实现场景的包围体层次结构。采用有向无环图结构保存信息。一个场景图包括一个根节点、多级内部的枝节节点，以及多个末端的叶子节点。根节点和枝节节点负责构建图的层次，以及完成某些特定的功能；而叶子节点则保存了某一个或多个可绘制对象的信息。每个节点都维护一个自身的包围体，以此类推，构成一系列分明的层次。这种层次包围盒图，可以加速正确表达场景图形的信息组成，也可以加速场景对象的裁减、相交测试、碰撞检测等一系列操作。该结构使得每个节点可以有多个父节点。当同一个几何对象需要被多次引用，由多个父节点指向同一个子节点，同每个父节点都指向一个新的子节点的树状结构相比，节点总数减少，内存占用率和场景遍历步数降低，而渲染的最终结果可以保持不变。

3.2 基于四叉树的多尺度地理数据分块

本文采用的地理数据包括 Tin 三角网构建的地形模型、覆盖在地形表面的真实影像以及矢量数据。因为这些地理数据都是地表数据，在垂直方向极少重叠，因此以基于均匀分割的区域四叉树结构划分和索引，四叉树的每一级都代表一个级别的精度。一个成熟例子是 World Wind[15]。四叉树构建过程为：把整个地形作为根节点，从这个根节点出发，检查根节点是否满足某种分割条件，若不满足，则不分割，并作为叶子节点保存；否则，递归地把根节点不断地分割成相等的四个子节点区域，直到不能再分割为止。最后，将所有叶子节点绘制渲染。分割的深度越大，得到的分辨率就会越高，即分割深度每提高一层，采样密度提高一倍。对于地球表面则需要对分割方式经过一个从平面投影到经纬度的投影变换。

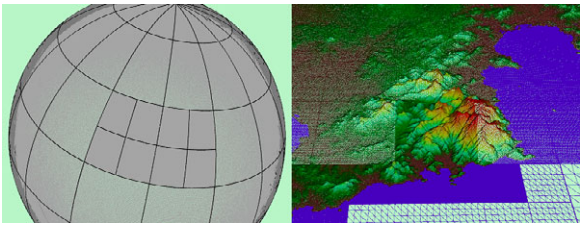

图 2　四叉树地球分块

3.3 数据多尺度预处理

对于地形数据，根据四叉树分割的不同层级，划分出 LOD 数据并存储至外存；对于对象节点，每个节点对象单元都从精致到粗糙生成四级精度数据 L1 至 L4，其中 L2 和 L3 为对 L1 采用塌陷法生成的简化模型，L4 利用图像缓存生成的 Impostor 节点。节点对象单元的纹理依据 2:1 的长宽比例生成 3 张简化纹理存储至外存，对应 L2-L4 三个等级的简化模型。LOD 数据生成通过调用 CUDA 库实现了 GPGPU 将纹理压缩为 DTX3 格式。不同尺度的外存模型根据需要依次调用，效率比一次性调入 mipmap 文件要高。

3.4 基于剔除结果的数据请求

对于大规模的场景，当将大量的模型读入内存时，必然会造成计算机系统的巨大负担，并且可能会导致内存不足。此时就需要一种动态调度的机制。时间是单向的，无法准确预测用户在未来的行为，因此对调度前的数据载入采取空间相关调度。对于可以实现动态调度的节点，当他的某些子节点对场景绘制长期没有参与时，可以将子节点自动卸载，释放内存空间；反之，也可以即时加载某些不在内存中的子节点，即动态的对其场景子树进行调度控制。

3.5 定时的内存数据释放

对调用后数据撤销采用时间相关调度。LOD 节点的某个细节层次如果长期不参与场景绘制，则将其卸载，否则将其加载。在实现上设计智能指针作为所有节点的基类，有效防止了内存释放不完全导致的泄露。

3.6 传输策略

当数据搜索完成后，根据搜索到的数据来源节点列表开始传输数据。

本文从两个方面解决缓冲机制：一是在发送端，发送文件块时，会利用一个一直运行的线程控制发送数据的字节，这是一个限流的过程；二是在接收端，在文件传输前，首先创建一个和源文件相同大小的缓冲区，传输时每个文件块将对号填坑，依次填满缓冲区。当软件退出时，文件没有全部接收完成，会自行记录下载的数据，下次启动时实现断点续传。

在传输的过程中，对模型数据采用 zip 标准压缩，对纹理数据采用 Jpeg2000 标准压缩。

3.7 组件化封装

采用微软的 ATL 库对网络引擎进行封装，将安全证书与组件打包为 cab 格式。数据库采用 Sqlserver，数据库连接采用 C#，渲染与网络部分以 C++实现，基于 ext 库实现网络界面，采用 Javascript 脚本调用组件接口，实现用户与三维场景的交互。该组件符合 com 标准，可以方便的嵌入 IE 浏览器中。

4　模型实现

论文采用 VC++与 OpenGL 对设计的“剖面-钻孔”三维空间建模方法进行实现，利用 ATL 库和 JavaScript 开发了三维网络引擎组件，研发了面向网络的“虚拟海底”原型系统。模

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

型测试的数据范围为北纬 38.2-38.3，东经 118.8-118.9。图 3 是对海底贴赋地貌影像数据，并对每一层贴赋专题纹理后的渲染效果。模型 X 轴坐标为经度，Y 轴坐标为纬度，Z 轴坐标为水深。图 4 是地震剖面数据建模和基于 GPU 的快速渲染。图 5 是载入钻孔数据对地层数据进行修正的效果。其中图 3、4、5 中 Z 轴拉伸 0.01 倍。

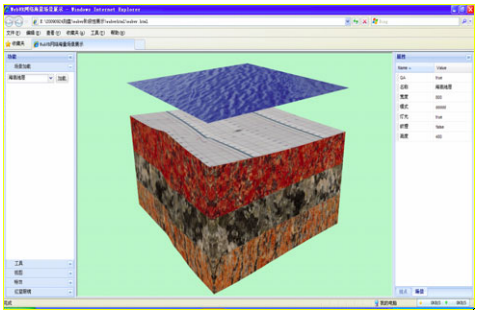

图 3　地质体模型

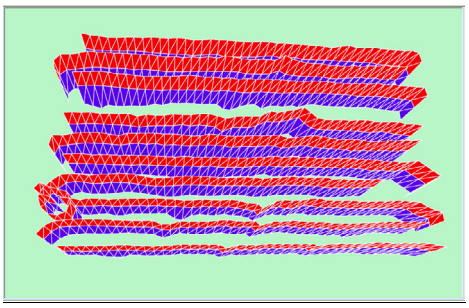

图 4　地层剖面

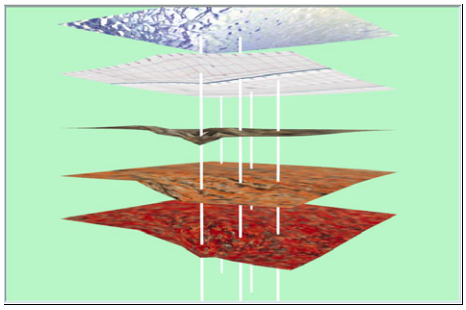

图 5　钻孔矫正

5　结论

本文提出的“剖面-钻孔”三维空间建模方法和三维网络引擎技术，能够实现网络环境下的海底综合数据的集成和三维可视化表达，向海洋科研工作人员和公众提供一个全面、直观、便捷的海底信息浏览工具。

空间信息的三维可视化和网络可视化是目前研究的热点，也是难点。本文提出的空间构模方法和三维网络引擎技术只是对海底多维数据可视化技术的初步性研究和探讨，许多关键问题还没有深入研究，如动态数据的网络可视化表达、断层和褶皱等特殊地质现象的表达等，需要今后进一步探索和解决。

参考文献:

[1] Bak P, Mill A. Three Dimensional Representation in a Geoscientific Resources Management System for the Minerals Industry [M]. Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems. London, UK: Taylor and Francis, 1989: 155-182.

[2] Fritsch D. Towards three-dimensional data structures in Geographic Information Systems [M]. Utrecht, The Netherlands: EGIS Foundation, 1990: 335-345.

[3] Zlatanova, S. 3D GIS for urban development [D]. The Netherlands: ITC Netherlands, 2000.

[4] Kofler M, Rehatschek H, Gruber M. A database for a 3D GIS for urban environments supporting photo-realistic visualization Photorealistic Visualization [C]// Int. Archives of Phototgrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B 2.

[5] Yoshida T. Three-dimensional object modelling in a three-dimensional urban map [C]// Proceedings of UM3’98.

[6] International Workshop on Urban Multi-media/3D Mapping, Tokyo, Japan. University of Tokyo [Z]. Japan: Center for Spatial Information Science, Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, 1998: 55-62.

[7] Arnaud S, Bernard C. 3D topological modelling and visualization for 3D GIS [J]. Computer & Graphics (S0097-8493), 1999, 23(4): 469-478.

[8] Pfund M. Topological data structure for a 3D GIS [C]// Proceedings of The 3rd ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS, 34, Part 2W2, 23rd-25 May, 2001, Bangkok, Thailand. 2001: 233-237.

[9] ESRI. ArcView 3D Analyst [M]. Redlands, California, USA: Environmental Systems Research Institute Inc., 1997.

[10] Zhihan Lv, Tengfei Yin, Yong Han, Yong Chen, Ge Chen. WebVR-Web Virtual Reality Engine Based on P2P network [J]. Journal of Networks (S1796-2056), 2011, 6(7): 990-998.

[11] Zlatanova S, Gruber M. 3D Urban GIS on The Web: Data Structuring And Visualization [C]// Proceedings of ISPRS, Commission, IAPRS, Vol. 32, Part 4 GIS-Between Visions and Applications, Stuttgart, Germany,1998: 691-699.

[12] Coors V. 3D GIS in networking environments [C]// Proceedings of International Workshop on 3D Cadastres, 28-30 November, Delft, The Netherlands. Denmark: International Federation of Surveyors, 2001: 159-169.

[13] Bowyer Adrian. Computing Dirichlet tessellations [J]. The Computer Journal (S1460-2067), 1981, 24(2): 162-166.

[14] Watson David F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes [J]. The Computer Journal (S1460-2067), 1981, 24(2): 167-172.

[15] Alashker Y, Li H, El-Tawil S. Approximations in Progressive Collapse Modeling [J]. Journal of Structural Engineering (S1943-541X), 137, SPECIAL ISSUE: Commemorating 10 Years of Research since 9/11: 914-924.

[16] David G Bell, Frank Kuehnel, Chris Maxwell, Randy Kim, Kushyar Kasraie, Tom Gaskins, Patrick Hogan, Joe Coughlan. NASA World Wind: Open Source GIS for Mission Operations [C]// Aerospace Conference (S1095-323X). New York, USA: IEEE, 2007: 1-9.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net