

面向虚拟地球的多尺度矢量数据可视化方法

陈 静¹ 刘婷婷¹ 侯小波¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:为了实现网络环境下虚拟地球的多尺度矢量、影像和地形数据的集成可视化,便于矢量空间数据的查询分析,本文根据几何绘制的方法,将二维矢量数据、多尺度地形和全球等经纬度离散网格集成,提出了面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构和多尺度矢量数据分块构建与组织方法;在此基础上,针对虚拟地球中矢量数据高效可视化的要求,提出了面向可视化的 Douglas-Peucker 矢量数据压缩算法。最后,基于网络三维虚拟地球平台 GeoGlobe 开发了实验系统,实现了面向虚拟地球的多尺度矢量数据的构建、组织以及可视化。

关键词:虚拟地球;矢量数据结构;多尺度;矢量压缩;可视化

中图法分类号:P208

文献标志码:A

网络三维虚拟地球利用网络优势向用户提供全球多尺度、交互式、分布式的空间信息,使得海量地理信息服务和处理的方式从原来的集中、独占走向分布、共享,现有网络三维虚拟地球系统对于矢量空间数据的可视化多采用栅格化的方式,具有较好的符号特征表达,能够提供面向公众的三维可视化服务,但是,相对于几何绘制的机制,这种方式没有保留矢量数据的空间特征,难以实现矢量空间对象的拾取操作,也不利于矢量空间对象的查询和分析^[1]。

基于几何绘制的相关研究主要集中在单机环境下矢量数据与多尺度地形数据叠加和可视化方法^[2-3]。在基于球面剖分模型将矢量数据与地形数据集成的研究方面,文献[4]提出用三角裁剪有向无环图这种数据结构将二维矢量数据与多分辨率地形格网的关系记录下来,在绘制时将其解析以提高可视化的效率;文献[5-6]分别基于等经纬度球面剖分模型和球面退化四叉树格网模型将矢量数据无缝叠加到 DEM 格网中,主要侧重于矢量数据在球面上的绘制方法,没有将矢量数据与球面离散网格进行集成建模。文献[7]基于球面三角四叉树剖分模型探讨了基于球面离散网格的三维矢量数据的组织,但是没有集成地形模型。文献[8]基于球面退化四叉树格网模型,针对几何叠加方法中插值相交计算复杂这一问题,提出了矢量线数据与地形数据集成的“漂移”算法,提高

了可视化的效率,但是相关实验主要集中在本地客户端进行。

在应用方面,Google Earth 对矢量数据基于几何机制的可视化表达侧重于小比例尺,对于大比例尺矢量数据仍采用栅格化的表达方式;World Wind 基于插件机制,在客户端加载矢量数据;ArcGlobe 采用预先矢量数据栅格化方式,供客户端集成显示。

综上所述,相关研究侧重于单机环境下矢量数据与球面网格模型和地形数据的集成可视化,同时,矢量数据与地形数据内插生成的三维矢量数据具有一定的数据冗余,面向网络环境的高效可视化需要在保证可视化效果的前提下,减少数据传输量。对此,本文基于球面离散网格将矢量数据与地形数据叠加进行分块组织,针对可视化效果和网络传输要求,对分块数据进行压缩处理,探讨网络环境下面向虚拟地球的多尺度矢量数据可视化方法。

1 面向虚拟地球的矢量数据结构

已有较多球面离散格网方法,其中,等经纬球面离散格网模型易于对全球范围进行四叉树结构索引,检索效率高,适合全球多尺度地形数据、影像数据集成组织。基于上述因素,本文选择等经纬度的球面离散格网作为球面剖分模型。

基于统一的大地坐标系统,采用几何叠加的

收稿日期:2013-09-26

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41171314);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助项目。

第一作者:陈静,博士,研究员。主要从事网络三维虚拟地球的理论、方法和应用研究。E-mail:jchen@whu.edu.cn

方法将全球矢量数据与多尺度地形数据叠加,构建面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构,如图1所示。矢量数据按照图层进行组织,并与多层次等经纬度离散网格,以及网格对应尺度的全球地形数据进行无缝集成,形成不同尺度的矢量数据。每一个尺度的矢量图层都由全球等经纬度格网对象组成,格网对象封装了其格网范围内的矢量数据及其相关信息,包括格网编码、格网范围、要素类型、要素数量、要素数据等。矢量数据分为点、线和面这三类基本要素。每一个矢量数据从二维矢量数据进行扩展,具有二维矢量数据的地图比例尺的信息。同时,每一个矢量数据也具有与二

维矢量数据对象一致的ID标识、属性、纹理等特征,并且还具有全球离散网格编码的属性,一个要素可能跨多个离散网格,因此,一个要素对象可能包含多个不同的网格编码。在此基础上,根据各个要素的不同特征,分为独立点、非独立点、线段、弧度和多边形等5类对象。其中,依据非独立点与球面离散网格、地形集成的不同条件,又分为格网点、内插点、结点和中间点4类。结点为线段或弧段的起点和终点,决定了它们的方向;中间点为构成弧段的点要素中除去起结点和终结点的点,它决定了弧段的形状。

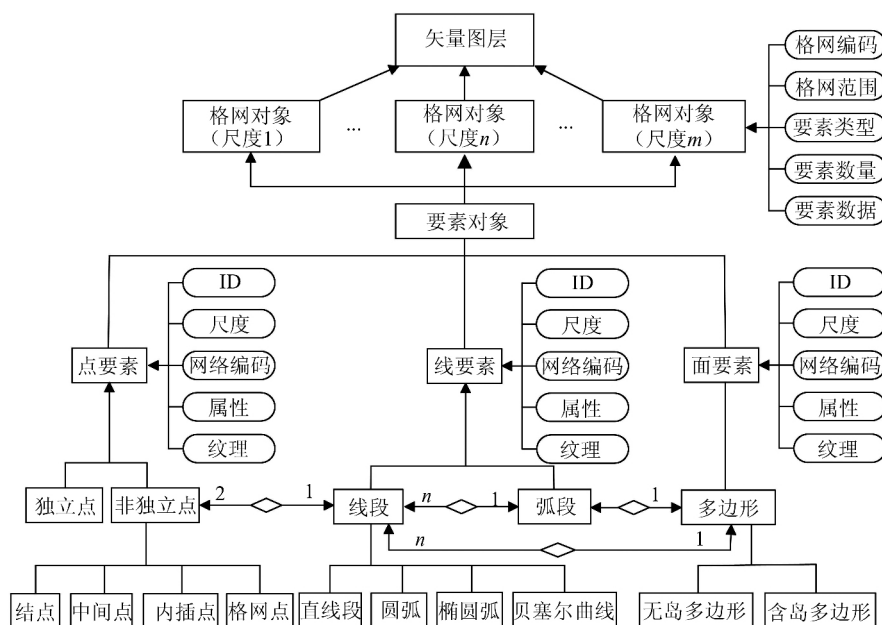


图1 面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构

Fig. 1 Data Structure of Virtual Globe-Oriented Multi-scale Vector

上述面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构具有以下特点:(1)面向虚拟地球。以全球离散格网为块单元,对传统二维矢量数据进行分块,并且对块中的要素进行分类和抽象,便于与虚拟地球中分块组织的影像、地形数据集成与表达。(2)多尺度特征。对于同一比例尺矢量数据,不仅对应于全球多层次离散格网,并且与格网对应多尺度的地形数据进行集成,从而具有多尺度特征。

2 多尺度矢量数据的分块构建与数据组织方法

本文基于上述面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构,提出了面向虚拟地球的多尺度矢量数据分块构建与组织方法。

矢量数据的分块构建是指以全球等经纬度离

散格网为块单位,分别获取格网范围内的矢量数据与相应尺度的全球地形数据,然后进行叠加,构建面向虚拟地球的矢量数据。在矢量数据分块的过程中,对于点要素只需要根据经纬度判断所在的瓦片,而线要素和面要素则存在与球面离散格网相交的情况。将产生的交点定义为格网点,如图2所示,弧段 N_1N_4 与全球等经纬度格网相交产生格网点 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 和 I_5 ,被截为6段,分布于不同的格网中,类似地,多边形 P_1 、 P_2 和 P_3 也跨越多个格网。二维矢量数据与地形数据叠加时,点要素可以直接通过内插计算出高程,但是对于线要素和面要素,如果仅计算构成点的高程值,就会出现“悬空”或者“入地”的现象,使得矢量数据不能贴伏于地表,因此需要增加二维矢量数据与地形格网的交点,即内插点。基于这种方法,当同一个矢量数据与不同尺度的地形格网叠加时,

就会产生不同详细程度的内插点,在可视化调度时,要确保对应矢量数据与地形数据的同步调度和无缝匹配。同时考虑到交互可视化过程中在相邻不同级别的瓦片接边处矢量数据有可能不连续,需要首先重构地形格网,再将矢量数据与重构后的地形网格求交,以保证矢量数据的连续性。

矢量数据的分层组织通过将矢量与多尺度全球等经纬度离散格网集成来实现。将同一比例尺的矢量数据与多尺度全球等经纬度离散格网叠加,可以形成多尺度矢量数据,而多尺度全球等经纬度离散格网与全球地形模型的尺度一一对应,

从而面向虚拟地球的矢量数据的分层与全球地形模型尺度也一一对应,也就实现了面向虚拟地球的矢量数据的分层多尺度构建。

在此基础上,按照矢量数据的图层的概念,以一个比例尺的图层为单元,将图层中的矢量数据进行分层分块组织,形成一个比例尺图层的面向虚拟地球的分层分块的金字塔结构矢量数据集,如图 2 所示。以此类推,可以构建多比例尺、多个图层的面向虚拟地球的分层分块的金字塔结构矢量数据集。

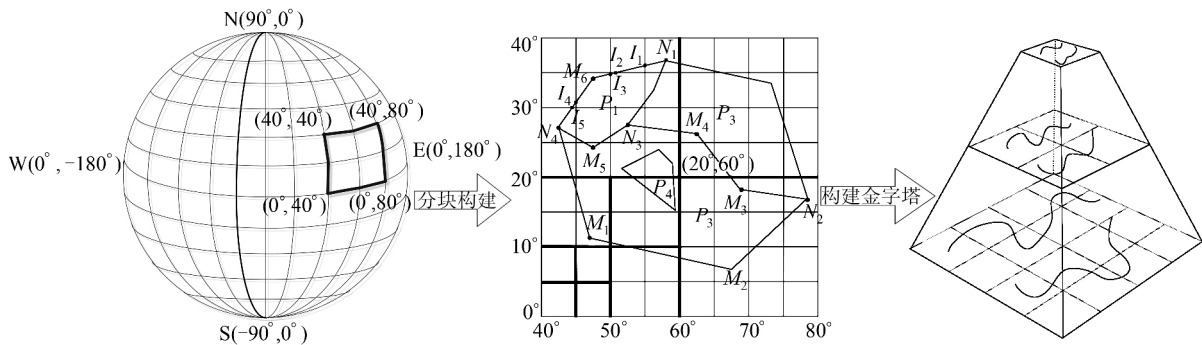


图 2 面向虚拟地球的矢量分块构建与组织示意图

Fig. 2 Virtual Globe-Oriented Tile-Based Construction and Organization Method of Vector Data

3 面向可视化的矢量数据压缩方法

构建矢量数据集之后,对于线要素和面要素,有些内插点分布非常密集,并且高程非常相近,甚至可能相等,造成数据冗余。同时,在场景渲染时,如果两个或者多个共面矢量数据同时绘制,将会在 Z-Buffer 中保存相同的 Z 值(通常是浮点数取整造成的),从而出现 Z-Buffer 冲突现象。对此,设计了面向可视化的 Douglas-Peucker 矢量数据压缩算法,对线要素以及面要素的边界进行压缩。

Douglas-Peucker 算法是一种常用而有效的矢量数据压缩算法,其使用的一个重要前提条件是所处理的矢量线对象位于同一个平面,而二维矢量线对象数据和地形数据叠加后形成三维空间中的矢量,不处于同一个平面上,因此不能直接对生成的矢量对象使用 Douglas-Peucker 压缩算法。如图 3 所示,二维矢量线对象 AZ 和地形叠加后生成空间矢量弧段 $A'Z'$,在 X 轴和 Y 轴构成的平面中 $A'Z'$ 不共面,但是在 $A'ABB'$ 平面上组成 AZ 的直线段 AB 生成的矢量弧段 $A'B'$ 共面,即 $A'B'$ 是一条平面曲线,于是像 $A'B'$ 这样的矢量弧段就可以用 Douglas-Peucker 算法来进行压缩, $A'B'$ 曲线段中 C' 、 D' 、 E' 、 F' 、 G' 和 H' 这些

新增的内插点就是压缩的对象。

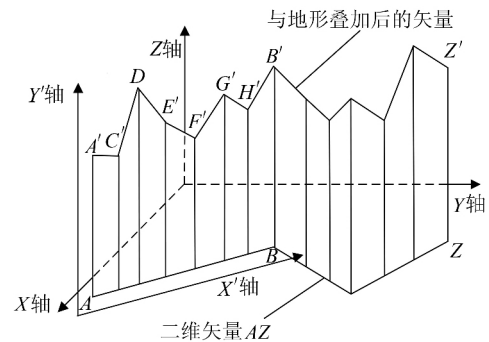


图 3 二维矢量及其与地形叠加后的矢量

Fig. 3 Two-Dimensional Vector and Result Vector After Superposition with Terrain

考虑到弧段 $A'B'$ 具有高程信息,因此对 Douglas-Peucker 算法基于以下三点进行扩展:(1)采用点到线段的高程差作为限差,即多大的高程差内可以保证压缩后矢量可视化的效果,如图 3 中将点 C' 到直线 $A'B'$ 的竖直距离而不是垂直距离与设定的限差比较。采用高程差作为限差,不仅比垂距容易计算,而且也使得该算法在地形平坦的地区压缩率较高,在地形起伏较大的地区压缩率较低,更贴近实际情况。(2)为了避免出现 Z-Buffer 冲突现象,在设定限差时将矢量数据做适当的抬高处理,使矢量数据不会因为 Z-Buffer

冲突被遮挡。(3)在矢量数据压缩完以后,如果有被舍去的点位于弧段上方,则说明该弧段会有部分点被埋在地形格网之下,因此对这部分点需进行适当保留,从而避免矢量数据被地形遮挡。

根据以上三点,矢量数据压缩算法的基本步骤为:(1)以线状矢量数据中共面的弧段为单位,以该弧段在地面的投影为 X 轴,高程方向为 Y 轴,建立一个平面坐标系,如图 3 中的 X' 轴和 Y' 轴;(2)连接弧段的首尾两点,计算所有的中间点到首尾两点所确定的直线的竖直距离,即高程差;(3)选取其中高程差最大的点,如果该点的高程差小于给定的限差,则弧段上的所有中间点都舍去;(4)如果该点的高程差大于给定的限差,则该点作为第一个保留点,通过该点把弧段分成两个弧段,对每条弧段重复步骤(1)至(4)直到完成压缩过程;(5)检查压缩后的弧段数据,看有没有被舍去的点位于压缩后的弧段之上,如果没有,算法结束,如果有,找出距离弧段高程最大的点,将其保留,通过该点将弧段分成两段,重复执行直到压缩后的弧段上方没有点。

根据面向可视化的 Douglas-Peucker 算法对图 4 中的数据进行压缩,图中弧段 L_1 是按照算法的(1)~(4)步进行压缩处理的结果,可以看到有部分点(实心点)位于 L_1 之上,经过算法第(5)步,得到弧段 L_2 ,避免了地形遮挡。弧段 L_2 为没有将矢量数据高程值增加得出的结果,如果将矢量抬高 R ,则处理后的结果为曲线 L_3 ,可以看出,矢量数据高程值增加后,矢量数据得到进一步简化,圈中的点在矢量数据高程值增加后被舍弃。

经过反复试验,将矢量数据高程增加值区间设定为 $0.5 \sim 1$ m 之间,就可以避免 Z -Buffer 冲突现象。面向可视化的 Douglas-Peucker 算法还存在限差如何确定的问题,这也是所有 Douglas-Peucker 算法共性的问题。限差的大小也应随着可视化中视点高度的不同而变化,在满足矢量可视化的效果下尽可能设得高一些。在视点较低时,限差值应该设置得较低;反之,视点较高时限差值也相应提高。

4 实验与分析

根据以上方法,本文采用 C++ 开发了两个实验系统进行验证。实验数据为全球 $1:400$ 万国界矢量数据、中国地区 $1:100$ 万省界矢量数据、局部地区 $1:5$ 万和 $1:1$ 万宗地矢量数据。地形数据为全球 90 m 分辨率 SRTM 数据,构建了 10 层分辨率为 2 倍关系的连续多尺度地形数

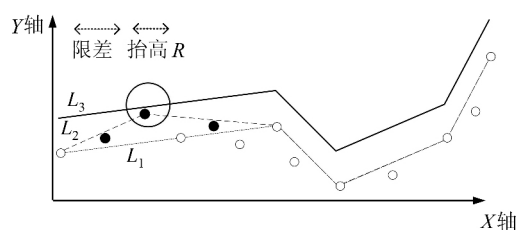


图 4 面向可视化的 Douglas-Peucker 算法示意图

Fig. 4 Algorithm of Visualization-Oriented Douglas-Peucker

据集,影像数据为局部 0.2 m 分辨率影像数据、全球 30 m 分辨率影像数据、全球 $1\,000$ m 分辨率影像数据,构建了 20 层分辨率为 2 倍关系的连续多尺度影像数据集。

第一个实验系统是面向虚拟地球的多尺度矢量数据分块构建与组织系统 VisualVectorBuilder,主要实现二维矢量数据与地形数据、全球等经纬度离散格网的集成,矢量数据的分层分块数据组织。图 5 是浏览集成构建后的分块矢量编码等信息。

第二个实验系统是基于开放式虚拟地球集成共享平台 GeoGlobe 进行。图 6(a)为 $1:100$ 万中国省界矢量数据与全球 SRTM 多尺度地形数据集第 1 层匹配下的可视化效果图,由于视点较高,地形数据分辨率较低,看不到矢量数据的可视化效果。

图 6(b)是同一矢量数据与全球 SRTM 多尺度地形数据集第 10 层匹配下,视点贴近地面时看到的矢量可视化的效果图,可以看到图中地形的起伏较大,矢量数据和地形叠加显示效果较好。

图 7 是地块查询分析的效果图,可以拾取并高亮显示地块对象,并查询到地块 ID。

为了验证面向可视化的 Douglas-Peucker 算法的有效性,采用某地 48.8 MB 地块二维矢量数据,分别设置 3 组不同的参数进行对比实验, 3 组实验数据结果如表 1 所示。

表 1 矢量数据压缩与可视化实验结果对比表

Tab. 1 Comparison of Vector Data Compression and Visualization Experiment

	第一组 (无简化)	第二组 (限差 1 m)	第三组(限差 1 m,抬高 1 m)
数据集总量/Bytes	95 369 898	65 249 965	46 138 501
点对象数量/个	8 736	5 927	4 573
数据量压缩比	1	1.46	2.07
绘制效果	Z-Buffer 冲突	无 Z-Buffer 冲突	无 Z-Buffer 冲突
绘制帧率/(帧/s)	18	21	28

通过表 1 可以看出,采用面向可视化的 Douglas-Peucker 算法后,不仅实现了矢量数据的

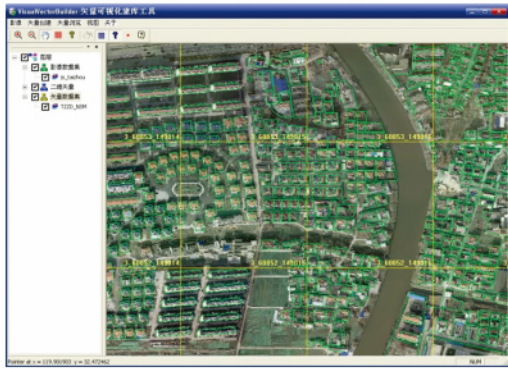
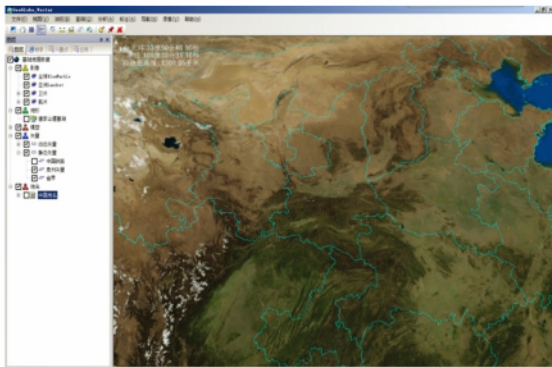
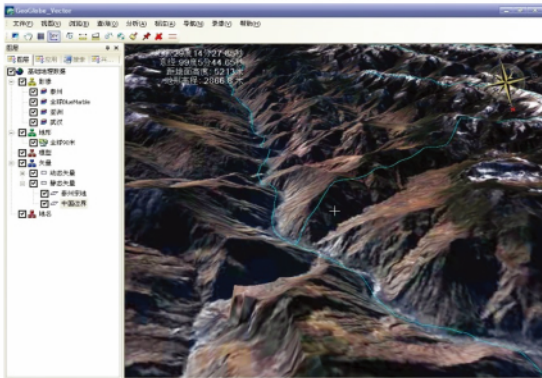


图 5 多尺度矢量数据分块与组织

Fig. 5 Organization of Multi-scale Vector Data



(a) 省界矢量数据效果图



(b) 与地形数据叠加效果图

图 6 矢量数据可视化效果图

Fig. 6 Visualization of Vector Data

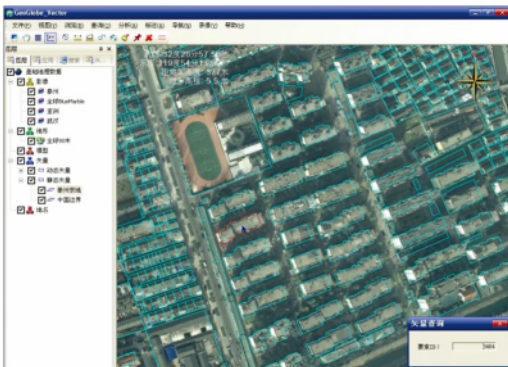


图 7 矢量对象拾取示意图

Fig. 7 Selection of Vector Object

简化压缩,而且消除了 Z-Buffer 冲突,绘制帧率也相应提高了。在限差 1 m、抬高 1 m 的参数下,压缩比达到 2.07。更改算法的参数,压缩率也会变化,这需要在综合考虑地形因素以及可视化效果后确定合适的限差值。

5 结 语

本文主要探讨了网络环境下虚拟地球中基于几何绘制的矢量空间数据可视化方法,研究了面向虚拟地球的多尺度矢量数据结构,实现了多尺度矢量数据分块构建与组织,设计了面向可视化的 Douglas-Peucker 算法,在保证可视化效果条件下,实现了矢量数据的压缩。实验结果表明,该方法在达到约 2 倍的压缩率、提高约 50% 的可视化帧率条件下,能够实现三维虚拟地球中多尺度矢量数据可视化,同时易于实现矢量空间对象的拾取和查询操作。下一步将探讨矢量分块多尺度组织后空间对象拓扑关系的重建以及空间分析方法。

参 考 文 献

- [1] Sun Min, Zhao Xuesheng, Zhao Renliang. Global GIS and Its Key Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 41-45 (孙敏, 赵学胜, 赵仁亮. Global GIS 及其关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(1): 41-45)
- [2] Schneider M, Guthe M, Klein R. Real-Time Rendering of Complex Vector Data on 3D Terrain Models[C]. *The 11th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Ghent, Belgium, 2005
- [3] Yang L, Zhang L Q, Kang Z Z, et al. An Efficient Rendering Method for Large Vector Data on Large Terrain Models[J]. *Sci China (Info Sci)*, 2010, 53(6): 1 122-1 129
- [4] Wartell Z, Kang E, Wasilewski T, et al. Rendering Vector Data over Global Multiresolution 3D Terrain [C]. *The Symposium on Data Visualization*, Grenoble, Grenoble, France, 2003
- [5] Sun W B, Shan S G, Chen F, et al. Geometry-Based Mapping of Vector Data and DEM Based on Hierarchical Longitude/Latitude Grids [C]. *The Second International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, Qingdao, 2010
- [6] Sun Wenbin, Hu Bailin, Wang Hongbin, et al. Seamless Integration of Vector and Terrain Data

- Based on Degenerate Quadtree Grid[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(1): 39-42 (孙文彬, 胡伯林, 王洪斌, 等. 基于球面 DQG 的矢量与地形数据无缝集成[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(1): 39-42)
- [7] Guan Li, Chen Chengqi, Lv Xuefeng. Study on the Organization Model for Vector Data Based on Global Subdivision Grid[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(3): 23-27 (关丽, 程乘旗, 吕雪锋. 基于球面剖分的矢量数据模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 23-27)
- [8] Wang Jiaojiao. Adaptive Integration Modeling of DEM and Vector Data Based on Special DQG Framework[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013(王姣姣. 基于球面 DQG 的地形与矢量数据自适应集成建模[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013)

Virtual Globe-Oriented Visualization Method of Multi-scale Vector Data

CHEN Jing¹ LIU Tingting¹ HOU Xiaobo¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing,
Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In order to achieve the integrated visualization of multi-scale vector data, image, and terrain data on a web virtual globe and facilitate the analysis and query of vector spatial data, based on a geometry-based method, we integrate two-dimensional vector data, multi-scale terrain data, and a global latitude-longitude discrete grid. We propose a virtual globe-oriented multi-scale vector data structure with a blocked-based construction and organization method for multi-scale vector data. Furthermore, aiming at efficient visualization of vector data on a virtual globe, a visualization-oriented Douglas-Peucker vector data compression algorithm is also proposed. Finally, based on the web 3D virtual globe platform GeoGlobe, we develop an experimental system to realize the construction, organization and visualization of global multi-scale vector data. Our experimental results show that these methods are practical and efficient.

Key words: virtual globe; vector data structure; multi-scale; vector compression; visualization

First author: CHEN Jing, PhD, professor, specializes in the theory and application of 3D virtual globe. E-mail: jchen@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41171314; LIESMARS Special Research Funding.