

基于椭球面三角格网的数字高程建模

白建军¹ 赵学胜¹ 陈 军²

(1 中国矿业大学(北京)资源学院,北京市海淀区学院路丁 11 号,100083)
(2 国家基础地理信息中心,北京市紫竹院百胜村 1 号,100044)

摘 要:针对传统的 DEM 在模拟表达大面积地形时具有存在裂缝、地理分析不精确、数据冗余等问题,在椭球面四元三角格网 QTM 层次剖分的基础上,提出了一种基于椭球面三角格网层次剖分的数字高程建模方法,该方法避免了上述缺陷。应用全球 GTOPO30 数据对该方法进行了验证。
关键词:椭球面;四元三角格网;层次剖分;数字高程模型
中图法分类号:P231.5

数字高程模型(DEM)是对地面特征进行空间描述的一种数字方法途径,其应用已经从局部向大区域甚至全球范围发展。当前人类面临着许多全球性的问题,如全球环境与资源监测、气候与海洋变化、国防安全等等,迫切需要全球性的 DEM 为其提供地理信息基础数据及辅助分析手段。然而,传统的 DEM 在表达大区域时存在许多局限性。大型的 DEM 数据库通常采用规则格网和经纬度两种尺度表示 DEM 数据,其坐标和投影系统互不相同。前者沿用地图投影作为其空间数学基础,采用大比例尺投影(如高斯-克吕格分带投影),用于大区域时将产生跨带裂缝,地形数据难以进行全局统一分析;采用小比例尺投影(如 Lambert 投影)时,其数学基础变形严重,转化集成数据精度差,度量系统不可靠,分析困难甚至无法进行^[1]。后者以经纬度来划分空间格网,格网间距在不同区域(特别是随着纬度的变化)会有较大的变化,而且数据存储会有冗余。

目前,国内外对全球地形建模及表达方法^[2~8]的研究具有代表性的有如下 3 类:基于经纬度剖分的方法、基于地图投影与分块的方法和基于 Voronoi 剖分的方法。这些方法依然没有摆脱上述一些缺陷。

美国地质调查局提供的 GTOPO30 数据、美国国防制图局和美国国家航空航天局/哥达德宇航中心(NASA/Goddard Space Flight Center)编辑的 JGP95E5'全球地形数据库均是以经纬度格

网的形式给出的,我国 1:25 万、1:5 万 DEM 数据库也提供该格式的地形数据。基于经纬度剖分的方法非常符合人们的习惯,以经纬度表示的坐标系统也被广泛采用,其数据组织简单,占用存储空间少;计算简单,与其他坐标系统之间的转换技术也很成熟。但是由经纬度划分的格网空间分辨率变化很大,甚至格网形状会发生变化,在两极三角形,其他地区为四边形;另一方面,其数据存在很大的冗余,例如对 GTOPO30 数据来说,单个极点的高程值就要纪录 43 200 次。

VGIS(virtual GIS)^[4~5]是通过将全球分块再投影后建立地形模型的。其不仅避免了分带投影所带来的褶皱和缝隙,而且便于全球数据的检索查询及多分辨操作,但该系统有一些显著的缺点:首先,在局部区域仍然采用平面投影来表达曲面地形,这样不可避免会带来投影误差;其次,随着分辨率的提高,该系统采用的局部坐标系会达数万个,这增加了系统的数据转换负担,不利于数据的实时处理。此外,还有 SRI 的 TerraVision 地形浏览器^[6],美国海军研究生院研发的 NPSNET 系统^[7]以及 T-Vision 研究工程或多或少存在上面一些问题。

Hipparchus system^[8]提出了一个无缝的全球地面模型,该模型在球面 Voronoi 多边形剖分的基础上,再建立全球地形 TIN 模型。尽管该模型也满足全球无缝,且便于数据的查询检索,但其所需存储量巨大且算法相当复杂,而且难以进行

多分辨率 LOD(level of detail)表达,因而在表达全球多分辨率地形时不够实用。

针对上述问题,本文在椭球面 QTM(quaternary triangular mesh)格网层次剖分的基础上,提出了一种多分辨率的全球地形建模方法。该方法采用大地坐标系,即采用经度、纬度及大地高(B, L, H)描述球面上任意一点点位。度量空间采用椭球面几何系统,视图采用圆球地理空间沿法线向二维球面投影,可视化时只需将经纬度坐标(B, L)转换为三维空间直角坐标即可。该模型基于的椭球面格网不仅具有很强的规则性,而且便于进行自适应细分,因而其很好地将规则格网和不规则三角网结合起来,数据点的分布既具有很强的规律性,又能顾及到地形的变化,便于数据组织存储,且数据存储无冗余。几何系统建立在椭球面的基础上,因此也避免了地图投影带来的问题。

1 基于椭球面 QTM 剖分的数字高程地面建模

对区域进行层次剖分是建立该区域层次多分辨率高程模型的基础。本文在对椭球面 QTM 递归剖分的基础上,建立了多分辨率全球数字高程模型。

1.1 基于椭球面 QTM 的层次细分方法

为了管理全球数据,众多学者对球面剖分方法进行了研究。基于经纬度格网的剖分方法会引起格网大小的极不均匀;基于 Voronoi 多边形剖分则要记录格网结点的坐标及其间的拓扑关系;而基于多面体的球面剖分方法^[3,10~13](通常以球体的内接正多面体为基础进行球面剖分)是针对于理想圆球的分割。它们均难以满足全球地形建模的要求,为此下面给出另一种全球剖分方法。

首先选择 6 个地面采样点,这 6 个采样点包括两极极点、赤道与主子午线、 90° 、 180° 和 270° 子午线的交点,已知这六个采样点的高程值,将这六个采样点按图 1(a)所示进行连接,形成一个初始的椭球面三角形格网(也可看成八面体),就成为地球表面的一个最粗分辨率的剖分。

对于组成八面体的每个椭球面三角形,对其 3 个顶点的经纬度进行两两平分,得到 3 个新的顶点。将这 3 个新顶点和原顶点通过如图 1(b)所示彼此连线,形成 4 个新的三角形。用这 4 个新的三角形代替原来的三角形,就得到一个较高分辨率的逼近。如此进行递归,直到满足一定的

分辨率要求为止。

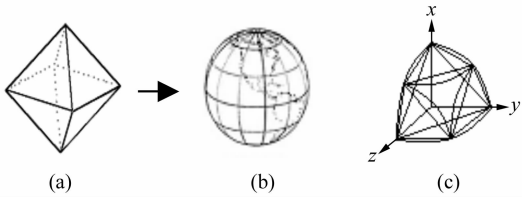


图 1 由 6 个地面采样点连接而成的椭球面三角形格网及其递归剖分
Fig. 1 Triangular Meshes Connected by Six Sample Points on the Ellipsoidal Surface and the Hierarchical Subdivision of the Triangular Mesh

这样的递归剖分称为四元三角剖分,每次剖分后连接的三角网称为 QTM 格网。注意,这里的 QTM 格网是基于椭球面的,格网点位于椭球面上,是以椭球面作为空间参考基准的,其坐标用经纬度表达。由于其剖分的规则性(类似于规则格网),因而格网点的坐标及它们之间的空间关系可以根据层数及其位置隐含求出。

1.2 层次 QTM 格网的生成

基于椭球面的 QTM 数据结构是一个空间层次数据结构,其将初始的椭球面三角形区域按各边中点相连接,递归细分成 4 个子三角形区域。基于 QTM 的数字高程模型可以通过选择 QTM 格网点,并通过建立在上述剖分上的线性插值函数来建立。建立 QTM 层次高程模型的准则如下:对于任何 QTM 球面三角形区域,如果其误差超过了规定的阈值,则通过 QTM 递归细分将其分为 4 个 QTM 球面三角形区域。该模型可以用四叉树来表示,如图 2 所示。每个结点对应一个球面三角形区域,非叶结点表示的区域有四个子区域(根结点除外,根结点有 8 个子结点)。

建立 QTM(四叉树)的一个方法如下。

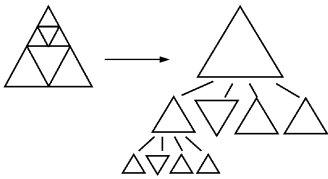


图 2 QTM 格网及 QTM 层次树
Fig. 2 QTM and Its Hierarchical Tree

1) 通过创建一个对应于根结点的剖分 Σ_0 来初始化层次 D 。 Σ_0 是在最初的椭球面区域 D 的基础上,通过连接 D 中选定的 6 个点所形成的 8 个球面三角形区域。

2) 考虑每个子剖分 Σ_i 的 4 个三角形区域 q_i

($j=1,\cdots,4$), 如果其误差大于阈值, 则通过上述层次剖分方法递归细分, 这样, 在层次中一个新的结点 Σ_j 被创建, 其通过边标签 q_j 连接到 Σ_i 。

3) 当所有叶结点表示的区域误差满足给定的阈值时, 该过程终止。

这样建立的四元三角网在剖分层数不一样时并不能保证剖分边界的连续性, 如图 3 所示。下面对其进行修正, 使其能进行自适应剖分, 在不同剖分层数间保持边界的连续性。

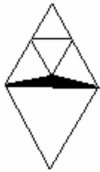


图 3 QTM 分裂引起的裂缝

Fig. 3 Crack Caused by QTM Hierarchical Non-matching Subdivision

1.3 自适应多分辨率椭球面三角格网的生成

在此首先介绍一种称为最长边二等分或分裂最新顶点的三角形细化方法, 如图 4 所示。对于一个初始的等腰直角三角形区域, 通过递归二等分其最长边(或最新产生的顶点, 或直角顶点), 并以二等分后的三角形代替原来的三角形, 以此来细化该三角形区域。

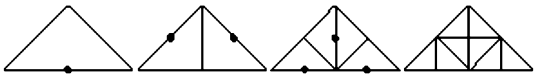


图 4 等腰直角三角形的二等分分裂

Fig. 4 Binary Longest Side Bisection Hierarchy of Icoscales Right Triangle

对于椭球面层次剖分来说, 由于它由三角形格网组成, 所以同样可以用上述方法来细化椭球面三角形区域。只是在二等分时, 是依据经纬度平分进行的。这样细化所增加的每个顶点必然和 QTM 格网点相重合。

如图 1 所示, 整个椭球面对应于 8 个椭球面三角形区域, 对于每个椭球面三角形来说, 由于它不同于等腰直角三角形, 无直角, 第一次细分时需要指定待分裂的边。为了方便, 首先通过连接极点 and 其对边中点来细化该椭球面三角形, 即二等分位于纬线的一条边。以后每次细化时, 均分裂其最新产生的顶点所对的边。在此, 将此边称为欲细化的三角形的基边, 共用一条基边的两个三角形称为三角形对, 如图 5 所示, 三角形 a 和三角形 b 互为三角形对。二等分某一三角形时, 有两

种情况。

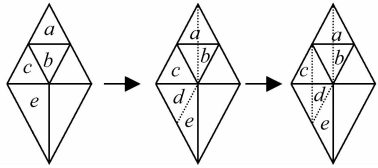


图 5 椭球面三角形的二等分分裂

Fig. 5 Bisection Subdivision of Triangle Mesh on the Ellipsoid Surface

1) 当欲二分的三角形基边同时也是通过该基边与其相邻三角形的基边时, 同时分裂共用该基边的三角形对。如图 5, 三角形 a 和 b 构成三角形对, 分裂 a 时必须同时分裂 b 。

2) 当欲分裂的基边不是其相邻的三角形的基边时, 先分裂该相邻三角形, 递归此过程, 然后执行 1)。如图 5, 要分裂三角形 c 时, 必须首先分裂通过其基边与其相邻的三角形 d , 然后同时分裂 c 和 e 。以此类推, 递归此过程。总之, 共用一条基边的三角形对总是同时分裂的, 这样的分裂避免了裂缝的出现。

基于上述二叉树递归分裂的地形模型可以用一个树结构来表示: 整个地球对应一个根结点, 由八棵子树组成, 每棵子树的根结点对应一个椭球面三角形区域, 子树的非叶结点有两个孩子。建立一个二叉子树的方法如下: 通过连接极点与其对边中点, 将此三角形区域细分为两个三角形, 分别对应于该棵子树的左右孩子结点, 考虑孩子结点表示的三角形区域, 若其误差超过给定的阈值, 则按上述分裂方法递归细分, 直到所有结点表示的三角形区域误差满足该阈值为止。因此其很好地顾及了地形的变化, 地形表面相对平坦的区域, 选择相对较少的格网点; 而当地形表面粗糙或变化剧烈时, 选择相对较多的格网点。

2 实 验

目前能得到的最高分辨率的全球地形数据是美国地质调查局提供的 GTOPO30 数据, 其数据的存储(写入)格式是纬度从北极到南极, 经度从 0° 到 360° , 每隔经纬度各 $30''$ 给出一个高程值。每个高程值用一个双字节整型字表示, 原数据量约 1.74GB。首先将其转换成经纬度格式表示的大地高, 并对其进行插值, 然后转换成 QTM 格式(即每个 QTM 格网点对应一个高程值)。全球地形 GTOPO30 数据转换成 4 个包含 $8\ 193 \times 8\ 193$ 个高程点的数据文件, 每个数据文件对应南北两

个 QTM 格网数据集,其精度大约为 45″。在同等精度情况下,以 QTM 格网表示的数据量大约 是 原数据量的一半。其数据量之间的比例关系为:

$$Q/G = \frac{4n^2 - 4(2n - 1)}{(2n - 1) \times (n - 1) \times 4} = \frac{(n - 1)^2}{2n^2 - 3n + 1} \approx \frac{1}{2}$$

式中,Q、G 分别表示以 QTM 和经纬度格式表示的地形数据量。采用上述转换后的数据,在 VC++ 环境下,以 OpenGL 作为图形编程接口,对所建的球面格网高程模型进行可视化。如图 6 所示,图 6(a)为单一分辨率的全球地形显示,图 6(b)为多分辨率的全球地形可视化表达,其中海洋地区没有显示。由于地球表面的起伏相对于地球半径是很微小的,因此出于视觉效果考虑,图中所示的高程数据都放大了 100 倍。

3 结 语

本文提出的基于椭球面 QTM 剖分的数字高程建模,由于是直接建立在椭球面格网层次递归剖分的基础上,因而从根本上避免了地图投影引起的问题,且易于分辨率的地形可视化表达。该模型基于的椭球面三角格网不仅具有很强的规则性,而且便于进行自适应细分,因而数据点的分布既具有很好的规律性,又能顾及到地形的变化。与目前的全球地形(经纬度表达格式)GTOPO30 数据、ETOPO5 数据 和 JGP95E5'数据等相比,其数据量也几乎减少了 1/2。本文采用转换后的全球数据 GTOPO30 所做的实验也验证了这一点。度量系统采用椭球面几何系统,因而同时也满足大区域地理分析的要求。全球地形数据量很大,需进一步重点研究的是多分辨率 LOD 数据的组织、存储、索引等。

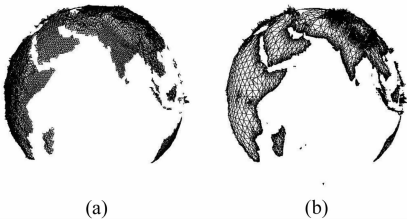


图 6 基于椭球面三角格网层次剖分表达的全球地形
Fig. 6 Delineation of Global Terrain Based on Hierarchical Subdivision of the Triangular Meshes on Ellipsoidal Surface

参 考 文 献

1 胡 鹏, 吴艳兰, 杨传勇, 等. 大型 GIS 与数字地球的空间数学基础研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 296~299

2 孙洪君, 杜道生, 李征航, 等. 关于地球形状的三维可视化研究. 武汉测绘科技大学报, 2000, 25(2): 158~162

3 赵学胜. 基于 QTM 的球面 Voronoi 数据模型:[博士论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2002

4 Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W, et al. An Integrated Global GIS and Visual Simulation System. Tech. Rep. GIT-GVU-97-07, Georgia Institute of Technology, 1997

5 Faust N, Ribarsky W, Jiang T Y. Real-Time Global Data Model for the Digital Earth. <http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids/papers/faust.pdf>, 2000

6 Reddy M, Leclerc Y, Iverson L, et al. Terravision II: Visualizing Massive Terrain Databases in VRML. IEEE Computer Graphics & Applications, 1999, 19(2): 30~38

7 Falby J S, Zyda M J, Pratt D R, et al. NPSNET: Hierarchical Data Structures for Real-Time Three-Dimensional Visual Simulation. Computer and Graphics, 1993, 17(1): 65~69

8 Lukatela H. A Seamless Global Terrain Model in the Hipparchus System. <http://www.geodyssey.com/global/papers>, 2000

9 Floriani L D, Marzano P, Puppo E. Multiresolution Models for Topographic Surface Description. The Visual Computer, 1996, 12(7): 317~345

10 Dutton G. Planetary Modeling via Hierarchical Tessellation. ACSM, Baltimore, 1989

11 Dutton G. Encoding and Handling Geospatial Data with Hierarchical Triangular Meshes. In: Kraak M J, Molenaar M (eds). The 7th International Symposium on Spatial Data Handling, Netherlands, 1996

12 Goodchild M F, Yang S. A Hierarchical Data Structure for Global Geographic Information Systems. Computer Vision and Geographic Image Processing, 1992, 54(1): 31~44

13 White D, Kimmerling A J. Comparing Area and Shape Distortion on Polyhedral Based Recursive Tessellations of the Sphere. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(8): 808~827

第一作者简介: 白建军, 博士生, 主要研究方向为空间数据模型、GIS 的应用等。
E-mail: jianjunb@sina.com

Digital Elevation Modeling Based on Hierarchical Subdivision of the Triangular Meshes on Ellipsoidal Surface

BAI Jianjun¹ ZHAO Xuesheng¹ CHEN Jun²

(1 School of Resource, China University of Mining and Technology (Beijing), D11 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100083, China)

(2 National Geomatics Center of China, 1 Baishengcun, Zizhuyuan, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to overcome the crack, imprecision of geographic analysis and data redundancy caused by the traditional digital elevation model in modeling the large scale terrain, this paper presents a method of global digital elevation modeling based on hierarchical subdivision of the quaternary triangular mesh on ellipsoidal surface. This method not only eliminates the gap and imprecision of geographic analysis caused by map projection, but also reduce the data redundancy. The authors has used the global GTOPO30 data to prove the reliability of the proposed method.

Key words: ellipsoidal surface; quaternary triangular mesh; hierarchical subdivision; digital elevation model

About the first author: BAI Jianjun, Ph.D candidate. His research interest is spatial data model and the application of GIS.

E-mail: jianjunb@sina.com

欢迎订阅 2005 年《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》，是以测绘为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是：立足测绘科学前沿，面向国际测量界，通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果，展示中国测绘研究的最高水平，引导测绘学术研究的方向。本刊为中国中文核心期刊，EI 刊源期刊。为国家优秀科技期刊，并获中国国家期刊奖，入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技新闻等，内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索机构包括 EI、CAS、PJK 等，其中 EI2004 年收录率达 82%，其影响因子长期名列中国高校学报前列。本刊读者对象为测绘及相关专业的科研人员、教师、研究生等。

本刊为月刊，国内外公开发行，邮发代号 38-317，国外代号 MO1555。A4 开本，96 面，定价 8 元/册，每月 5 日出版。漏订的读者可以与编辑部联系补订。