

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.003

海底地形数据组织与可视化选取技术

陈殿称^{1,2}, 卜宪海^{1,2}, 阳凡林^{1,2}, 云天宇^{1,2}, 艾波¹

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要: 海洋测绘数据信息化是构建智慧海洋的基础, 而海底地形数据是海洋测绘数据中的重要内容。为更加便捷和高效地管理与利用地形数据, 本文结合工程实际需求, 研发了海底地形数据管理平台。首先, 基于海底地形数据的特点, 提出多分辨率海底地形组织模型, 对不规则区域的海底地形进行多分辨率模型构建, 实现了对多波束实测数据的组织管理; 在此基础上, 提出了多尺度海底地形分级渲染优化算法与海底地形数据空间截取算法, 利用分级渲染与数据裁剪算法实现对海底地形数据的可视化表达预览和选取服务; 最后, 以典型的多波束测深数据为例, 基于研发平台完成了数据从存储、组织管理到可视化预览选取的一体化管理与服务, 验证了本文算法的可靠性与实用性, 同时可为海底地形数据管理服务提供一定参考。

关键词: 海底地形数据; 地形数据组织; 地形分级渲染; 空间数据截取; 可视化技术

中图分类号: P717; P229

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2022)02-0140-07

Organization and visual selection technologies for marine terrain data

CHEN Dianchen^{1,2}, BU Xianhai^{1,2}, YANG Fanlin^{1,2}, YUN Tianyu^{1,2}, AI Bo¹

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao 266590, China)

Abstract: The informatization of marine surveying and mapping data is the basis for building a smart ocean, and the seabed topography data is an important part of the marine surveying and mapping data. In order to manage and utilize topographic data more conveniently and efficiently, this paper develops a submarine topographic data management platform based on the actual needs of the project. First, based on the characteristics of the seabed topography data, a multi-resolution seabed terrain organization model is proposed to realize the organization and management of the multi-beam measured data. Then, a multi-scale seabed terrain classification rendering optimization algorithm and seabed terrain data space are proposed. The interception algorithm realizes the visual expression preview and selection service of the seabed topography data. Finally, based on the research and developed platform, large quantities of multi-beam bathymetric data are taken as a typical case to show the integrated management and service of data from storage, organization and management to visual preview selection. The experimental results verified the reliability and practicability of the methods in this paper.

Keywords: seabed topography data; topographic data organization; terrain graded rendering; spatial data interception; visualization technology

21 世纪是海洋的世纪, 世界各国都在加快推进海洋探索活动。近年来, 我国提出海洋强国战略, 各种海洋开发活动急速增加。作为海洋开发活动的基础, 海洋测绘愈发受到各相关部门的重视。随着技术的发展与革新, 当前海洋测绘涉及的技术

主要包括多波束测深技术、单波束测深技术、侧扫声呐技术、机载 LiDAR 测深技术、浅地层剖面测量技术、浮标测量技术、AUV/ROV 技术等^[1], 海洋测绘数据也形成了包含水文、水体、海底地形、地貌、底质等从海面至海底乃至浅地层的海洋全方

收稿日期: 2021-06-17; 修订日期: 2021-09-10

基金项目: 山东省研究生教育创新计划建设项目 (SDYJG19083)

作者简介: 陈殿称 (1996—), 硕士研究生, 主要从事海洋测量数据管理与可视化研究。电子邮箱: chendianchen2019@163.com

通讯作者: 卜宪海, 博士研究生, 主要从事海底地形地貌测量研究。电子邮箱: buxianhai2012@163.com

位、立体化信息的局面。其中,海底地形数据作为海洋测绘数据的重要组成部分,具有种类多样、格式复杂、数量巨大等特点^[2],难以高效地组织与管理;同时,庞大的数据量也给海底地形的可视化渲染带来了极大的困难。如何利用计算机技术对海量、冗杂的海底地形数据进行组织管理,并实现多分辨率可视化预览与高效选取目标数据,对于提升海洋测绘信息化管理程度、提高海洋测绘数据利用率具有重要意义。

当前,已有不同的国家机构、高校院所从不同需求角度出发,利用计算机、互联网、GIS 等技术,以提高海洋测绘数据的利用率为目的,设计建设了一些针对特定需求的海洋数据服务平台。以美国为代表的沿海发达国家在海底地形数据管理与共享服务方面起步较早,已形成完善的海洋数据管理与共享技术体系^[3]。如美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)建立的海洋数据管理服务平台,将全球物理海洋、海底地形、气象数据等海洋科学数据进行统一管理并向用户免费提供数据查询、下载服务^[4-5];欧洲在整合了原有的局部或区域海洋观测系统的基础上,联合 30 个沿海国家建立了欧洲海洋观测和数据管理共享信息系统,实现了对海洋数据的存储管理与共享,为社会公众提供了海洋地质、物理海洋、气候监测等众多调查资料^[6]。此外,国际海洋组织也设立了不同的海洋数据共享系统,如全球海洋气候数据系统(Marine Climate Data System, MCDS)、全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, GOOS)等^[7]。我国在海洋观测数据管理方面的研究虽然起步稍晚,但近年来也取得了非常显著的成就。在“908 专项”支持下,国家海洋信息中心、中国科学院海洋研究所、厦门大学、中国海洋大学等单位各自研发了不同规模的海洋信息平台系统^[8]。李海涛等根据海洋科学数据的特点,分析研究了海洋科学数据的管理与空间可视化方法,建设了相应的海洋数据管理平台^[9];李安虎等基于 WebGIS 技术研究了海洋科学数据服务平台的建设思路,解决了海洋数据格式复杂多样的问题^[10]。

面对大规模海底地形数据,必须采用合理的算法对其进行组织管理。Lindstrom 等提出基于规则格网的连续细节层次算法(Continuous Level of

Detail, CLOD),实现了地形数据的组织存储^[11];Pajarola 等提出基于 Ouf-of-Core 思想的地形数据组织方法,原理是利用大小一致的正方形瓦片将地形数据进行分割存储,然后将瓦片按照编码进行排序^[12]。关于地形数据的组织管理,国内学者也进行了一定的研究,田珊珊等以金字塔模型为基础,研究了大规模地形数据的组织管理和数据调度技术,并实现了三维地形可视化漫游系统^[13]。渠润涛等针对大规模地形数据处理速度缓慢的问题,基于瓦片金字塔模型进行组织存储,利用 C/S 架构实现了对大规模地形数据的分块处理^[14]。

通过研究对比发现,当前海底地形方面的数据管理平台存在以下问题:①大规模海底地形实测数据会因数据量大造成处理速度缓慢,数据组织模型仍有优化提升空间;②地形可视化表达不足,缺少直观的海底地形数据可视化服务,导致用户在查询选取数据时缺乏对其直观的认识;③对于同一海底地形数据,缺乏针对不同分辨率情况下进行空间截取的功能,不利于海量数据中感兴趣区数据的选取与利用。

针对上述问题,本文基于 WebGIS 技术搭建了相应数据管理平台,以实现海底地形地貌数据的高效管理,其关键技术是利用提出的多分辨率海底地形组织模型,实现对海洋多波束实测数据中海底地形地貌数据的高效组织管理,并利用海底地形渲染优化算法和空间截取算法,实现对海底地形数据的可视化表达和选取服务。研发成果可为我国海洋测绘数据信息化建设与海洋科学研究提供一定参考。

1 关键技术

1.1 改进的多分辨率海底地形组织模型

当面对大规模、高分辨率的海底地形数据时,通常采用多分辨率的海底地形组织模型以最大程度地加快海底地形数据调取速率并减少数据存储冗余。常规的金字塔模型对原始数据尺寸有着严格要求,必须为 $2^n \times 2^n$,自上而下,当前层的地形数据点是由下面一层每 2×2 网格的 4 个高程点合成的,以此类推,分辨率和尺寸变小,但表示范围不变^[15]。因此,该模型只能针对规则正方形区域的原始地形数据,而实际情况多波束等声呐探测得到的海底地形数据大多为不规则的区域,不能很好地

满足该要求。因此,本文提出一种改进的多分辨率海底地形组织模型,考虑了不规则区域的海底地形情况,按照先分层、再分块的流程,构建多分辨率海底地形模型,并将数据存储于数据库中,以实现海底地形数据的高效组织与调取。具体过程如下:

(1) 由于原始离散水深数据具有不规则、数量大等特点,在建模前需对数据进行规则格网化处理^[16]。网格插值方法包括反距离权重法、克里金法、样条函数法等^[17-18]。本文采用反距离权重法对离散点进行插值,网格最大分辨率可依据离散点云密度确定,格网化流程如图 1 所示。

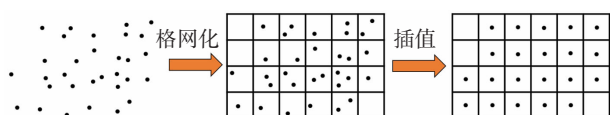


图 1 离散数据格网化

(2) 格网化后的 DEM 数据即为改进模型的最底层数据,设格网中行列数中最大值为 M ,最小值为 N ,则由条件 $2^{m-1} < M \leq 2^m$ 和 $2^{n-1} < N \leq 2^n$,可得到完全包含 DEM 数据的外包矩形尺寸为 $2^m \times 2^n$;同时,外包矩形内除 DEM 数据区域外的无效数据用空值进行填充,如图 2 中灰色区域。

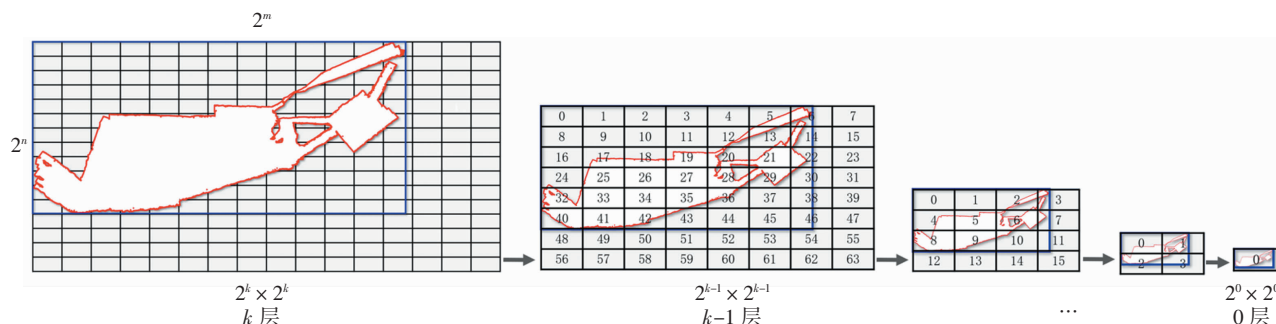


图 3 多分辨率海底地形数据组织模型

1.2 海底地形分级渲染及调度索引

因海底地形数据需要在不同分辨率、不同缩放层级的地图上叠加显示,为兼顾可视化加载的效率与海底地形的细节,故采用分级渲染及可视化方法。依据前文搭建的多分辨率海底地形数据组织模型,对实测的离散水深数据进行多尺度地形分级渲染,建立多级分辨率的海底地形表面模型,以实现数据平台的可视化预览需求。

为使地形晕渲图更具真实感、层次感,采用渐

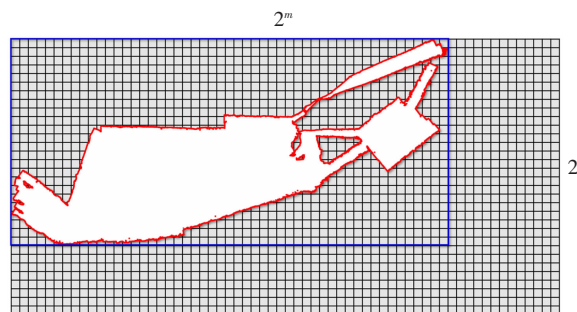


图 2 DEM 外包矩形示意图

(3) 通常模型最顶层数据行列数取值均以小于 1024 为标准^[15],结合 (2) 中外包矩形尺寸,求得组织模型中最适层数 k ,具体为公式 (1) 结果不等式的最小正整数:

$$\begin{cases} 2^{m-k} \leq 1024 \\ 2^{n-k} \leq 1024 \end{cases} \quad (1)$$

(4) 最底层 DEM 数据为第 k 层,对其每 2×2 个水深点数据进行合成重采样,用于依次生成 $k-1$ 至 0 层的多分辨率海底地形数据,当边界数据不满足 2×2 的规格要求时,可利用存在数值的邻近格网进行插值。

(5) 分层完成后,对每层数据进行分块^[19],数目为 $2^k \times 2^k$,为便于每层各分块数据的调取使用,需对各分块数据建立编号索引,建立的多分辨率海底地形数据组织模型如图 3 所示。

变颜色渲染与光照模拟相结合的方式对水深数据进行地形建模处理。其中,颜色渲染采用 RGB 渐变渲染技术,根据颜色各分量取值将其分为四个颜色区间,即红到黄、黄到绿、绿到青、青到蓝^[20]。然后将水深划分为相应四个等分的水深区间,每个水深区间对应不同的颜色区间,即可得到每个网格单元的所对应的 RGB 值。颜色区间如表 1 所示。

光照模拟可以模拟太阳光照射地形产生的阴影与明暗变化,使得海底地形更具有真实性和层次

表 1 颜色区间表

颜色	R (红)	G (绿)	B (蓝)
红→黄	255	0→255	0
黄→绿	255→0	255	0
绿→青	0	255	0→255
青→蓝	0	255→0	255

性, 其主要影响因素包含 DEM 单元的坡度、坡向以及太阳方位角和高度角。利用相对辐射模型计算公式 (2) 可得到每个格网单元所对应的光照强度值, 即所对应的灰度值^[21]:

$$I_R = G_{\max} (\cos(A_f - A_s) \sin H_f \cos H_s + \cos H_f \sin H_s) \quad (2)$$

式中, $G_{\max}$ 指最大灰度级, 一般取 255; A_f 指格网

单元的坡向, 范围为 $0 \sim 360^\circ$; A_s 指太阳方位角, 一般取 315° ; H_f 指格网单元坡度, 范围为 $0 \sim 90^\circ$; H_s 指太阳高度角, 一般取 45° ; I_R 指光照强度, 取值范围为 $0 \sim 255$, 0 为最黑, 255 为最亮。

将颜色渲染得到的 RGB 值与光照模拟得到的灰度值以相应比例叠加, 即可得到最终的地形晕渲图。最后, 将渲染生成的各分层与分块的海底地形晕渲图, 按照多级索引进行组织管理^[22], 如图 4 所示。数据管理平台依据索引编号进行读取加载, 当底图缩放层级较低时, 叠加显示大范围、低分辨率的地形晕渲图, 当底图缩放层级较高时, 调取加载可视范围内小范围、高分辨率的地形晕渲图, 以空间换细节的机制提高地形晕渲图的加载效率。

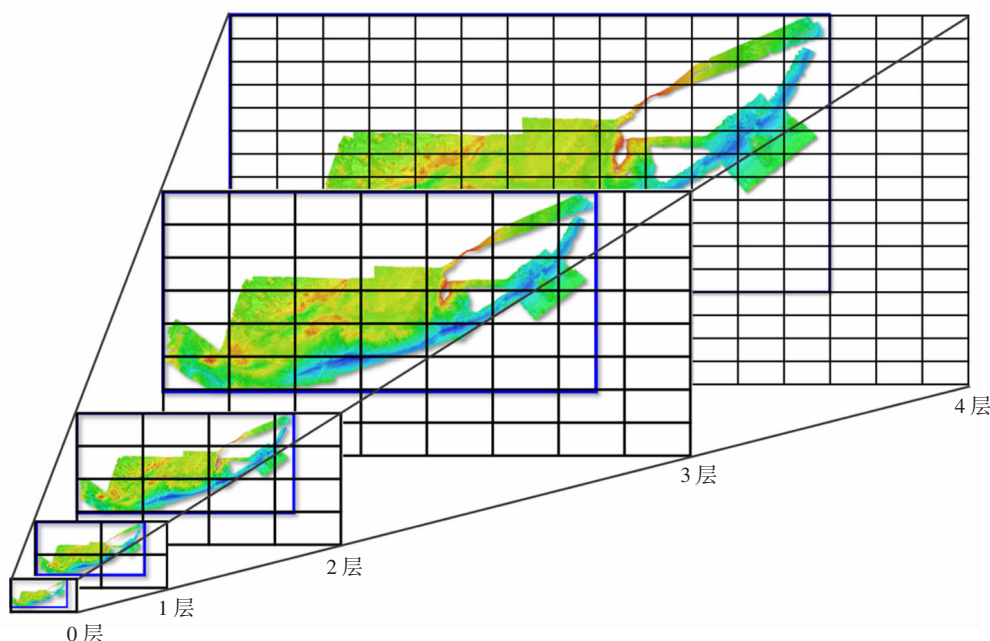


图 4 多尺度海底地形晕渲图模型

1.3 多分辨率海底地形数据空间截取

在实际操作中, 通常不需要下载整个项目包含的全部海底地形数据, 而只需下载特定分辨率下的某一感兴趣区的地形数据及相关联数据。因此, 本文依据前文搭建的多分辨率海底地形数据模型提出基于空间过滤的多分辨率海底地形数据截取方法。

海底 DEM 以地形晕渲图形式叠加在地图上, 用户利用绘图工具在地形上选择感兴趣区, 根据当前视图层级的分辨率对海底地形数据模型中的相应分辨率数据进行读取调度。由于数据模型中每层数据以分块的方式进行组织存储, 只需将与所绘制多边形相交的分块数据调入内存计算, 提高计算效

率。具体方法流程如图 5 所示。

(1) 在地图上绘制任意多边形区域, 即图 5A 中蓝色区域。

(2) 根据视图当前分辨率索引至相应分辨率的数据模型层, 将每一分块数据当作矩形数据, 判断其是否与感兴趣区相交, 从而读取相交分块数据, 即图 5B 中红色分块。

(3) 遍历 (2) 中全部红色分块数据, 判断每一分块数据是否完全在感兴趣区内部, 若在内部, 则该分块数据中全部散点都符合条件, 即图 5C 中蓝色分块内散点, 将其内部散点存入集合 Q。

(4) 除 (3) 完全相交的分块数据, 其余均为

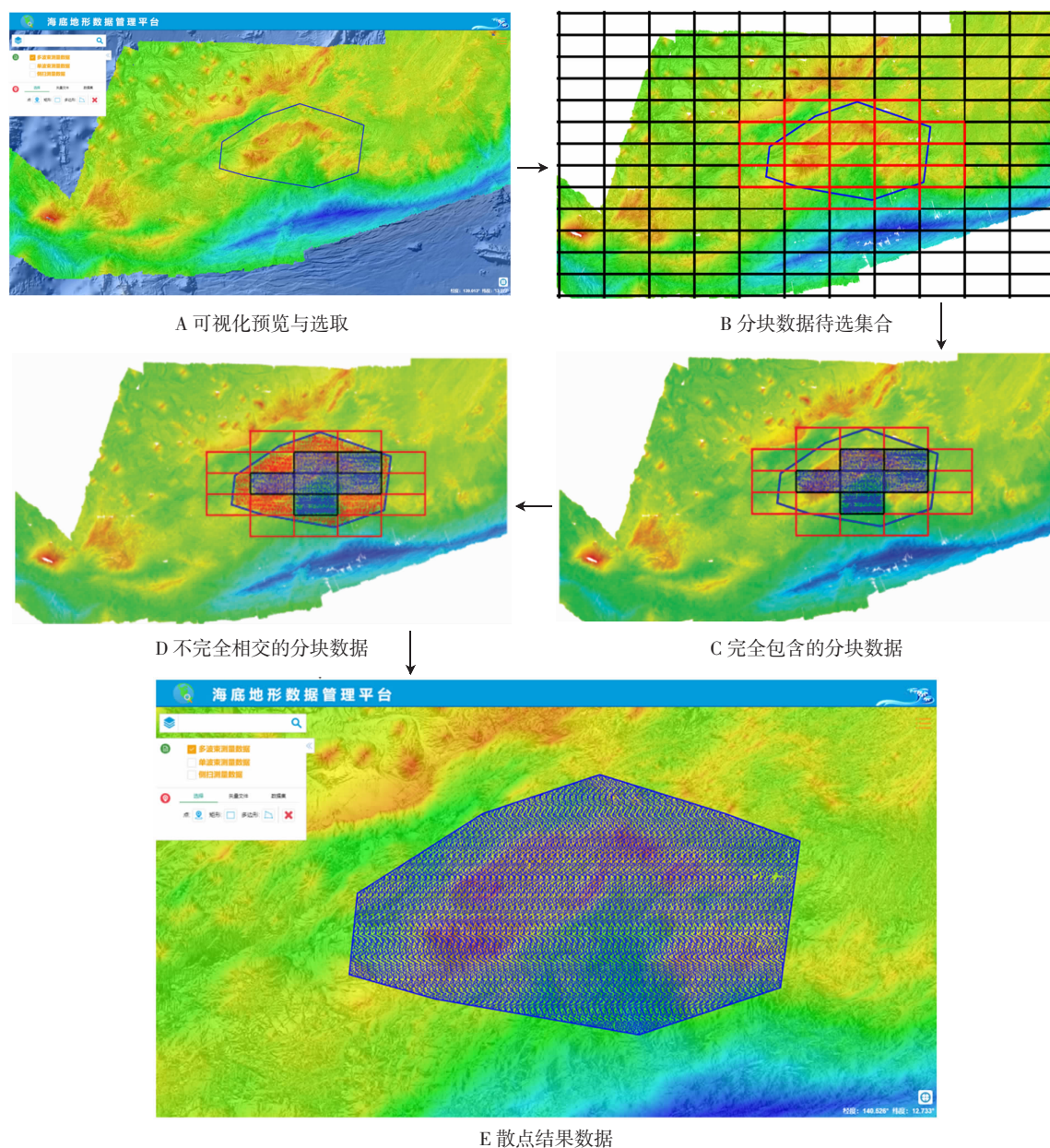


图5 空间数据截取流程图

不完全相交的分块数据, 遍历该部分分块数据中的散点, 利用射线法^[23]判断是否在绘制的多边形区域内, 从而将多边形选区内的散点存入集合 P, 即图 5D 中红色散点。

(5) 将集合 Q 和 P 中的散点进行组合, 即为用户截取所需的地形数据。

2 实验评估

2.1 实验环境与测试数据

为检验实验平台的数据组织与管理性能及本文

算法的效率, 对 16 个多波束测量项目数据进行了组织管理实验。实验数据由 NOAA 数据分发平台 Bathymetric Data Viewer 提供, 主要分布于东南亚以东以及关岛附近的西太平洋海域, 共包括 1532 条测线, 总量约为 87.6 GB。实验平台在局域网环境下进行部署^[24], 服务器具体配置为: CPU 为 Intel Core I5-9400F 2.90 GHz, 内存容量为 16 GB, 硬盘容量为 1 TB, 网络环境为千兆局域网。同时, 以其中一个多波束实测数据为例, 对本文所提算法进行验证评估, 数据位于马里亚纳海沟南部, 具体情况如图 6 所示。

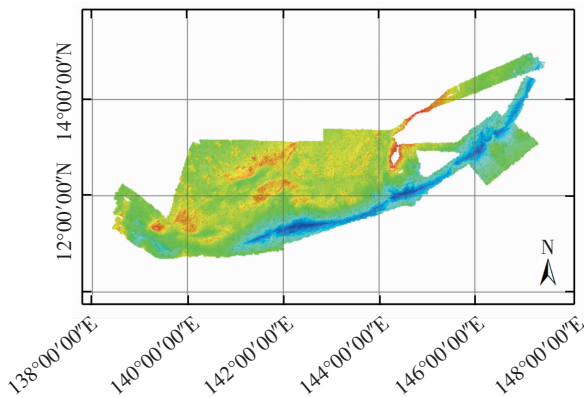


图 6 实验数据区域

2.2 系统平台测试

本文采用 Oracle 关系型数据库对海底地形数据进行存储管理, 利用 HTML 与 ASP.NET 语言搭建海底地形数据管理平台, 为综合检验研发平台的数据管理与共享性能, 本文对 16 个多波束测量数据集进行组织管理。

经多次实测验证, 得到各项操作的真实响应数据, 如表 2 所示。可见, 本系统交互性操作良好, 各操作基本实现较低延迟响应。

表 2 操作响应时间表

操作事项	响应时间 /ms
平均地形图加载响应	957
平均测线加载响应	304
平均查询响应	501
平均下载响应	1506
平均空间数据截取响应	3402

2.3 算法验证与评估

为进一步检验本文提出的多分辨率海底地形组织模型生成与存储算法的综合性能, 选取其中一例多波束数据, 分别对本文改进组织模型与常规金字塔模型进行实验。针对该实验数据, 两种方法均构建了 5 层数据模型, 两组实验结果如表 3 所示。

表 3 两种方法处理效果对比

方法	原数据量/MB	处理后数据量/MB	处理与存储时间 /s	调度响应时间 /s
本文方法	465	1075.2	973	1.42
常规方法	465	1485.7	1794	2.75

由表 3 可知, 本文方法处理后的数据量为 1075.2 MB, 为原始数据量的 2.3 倍, 而常规方法处理后的数据量为 1485.7 MB, 为原始数据量的 3.2 倍。这是因为本文方法使用 $2^m \times 2^n$ 的外包矩形

策略, 不必限制为正方形数据范围, 因此可有效避免数据冗余, 减少数据存储量, 提高数据存储效率。

从处理效率及存储时间来说, 本文方法消耗时间为 973 s, 而常规方法处理时间为 1794 s。本文方法相较于常规方法在处理与存储时间上减少了 45.7%, 一方面原因是本文方法将数据直接存入数据库, 减少了常规方法中多次读取与存储文件的操作; 另一方面是本文方法在面对无效数据时采用忽略的策略, 降低了数据冗余, 加快了数据处理与存储效率。

从调度响应时间来说, 本文方法调度响应时间为 1.42 s, 而常规方法的响应时间为 2.75 s, 本文方法相较于常规方法响应时间减少了 48.3%。主要原因是常规方法是利用文件形式进行数据存储, 在读取加载数据过程中, 需先遍历查找到具体文件再进行读取加载; 而本文方法利用索引机制, 对各层各分块的数据进行了编号记录, 可直接索引到所需数据, 此方法策略加快了数据加载操作, 大大减少了调度响应时间。

同样, 基于上述多波束数据生成的海底地形组织模型, 对本文提出的海底地形分级渲染及可视化策略进行验证, 并将本文方法与传统渲染加载方法在搭建多级地图模型、可视化调度方面的算法性能进行比较, 两组实验的具体数据如表 4 所示。

表 4 两种处理策略效果对比

方法	生成地图数据量/MB	所用时间/s	调度响应时间/s
本文方法	46.9	433	0.92
传统方法	48.2	552	1.61

由表 4 可知, 本文方法生成的地图数据量为 46.9 MB, 传统方法生成的地图数据量为 48.2 MB, 两种方法生成的地图数据量差别不大。在所用时间方面, 本文方法所用时间为 433 s, 传统方法所用时间为 552 s, 本文方法相较于传统方法所用时间减少了 21.5%, 主要是因为本文方法采用多线程的分级渲染机制, 提高了运算效率, 减少了运行时间。

在调度响应时间方面, 传统方法平均调用响应时间为 1.61 s, 本文方法平均调用响应时间为 0.92 s, 相较于传统方法加载响应时间减少了 42.8%。一方面原因是本文方法在构建分级晕渲图模型时, 将各

分层、各分块的晕渲图以分级索引进行数据库组织存储;另一方面是利用可视区范围加载视图范围内的晕渲图,避免了将全部地形晕渲图加载到浏览器视图中。该策略大大降低了所需加载地图的数据量,提高了加载效率,减少了响应时间。

3 结论

本文以海底地形数据为切入点,深入分析当前海底地形数据组织、管理与可视化服务所存在的问题,并结合海底地形数据特点,设计开发了专门针对海底地形地貌数据的一体化数据管理平台。重点研究了多分辨率海底地形组织模型技术、海底地形分级渲染及调度索引技术和高效的空间数据截取技术,提高了海量海底地形数据的管理水平与服务效率,对提升海洋测绘数据的管理效率以及提高海洋测绘信息化具有重要参考意义。

参 考 文 献

- [1] 赵建虎,陆振波,王爱学.海洋测绘技术发展现状[J].测绘地理信息,2017,42(6):1-10.
- [2] 龚强.我国海洋测绘市场、海洋测绘技术综述[J].信息技术,2021(1):12-17.
- [3] 宋转玲,刘海行,李新放,等.国内外海洋科学数据共享平台建设现状[J].科技资讯,2013(36):20-23.
- [4] 杨锦坤,韩春花,杨扬,等.国内外海洋环境数据公开发布现状综合分析及有关考虑[J].海洋信息,2021,36(1):1-10.
- [5] 李帅,郭俊如,姜晓轶,等.海洋水文气象多时空尺度资料来源分析[J].海洋通报,2020,39(1):24-39.
- [6] 于婷,王海波,董明媚.欧洲海洋数据管理网络及服务[J].海洋开发与管理,2013,30(6):1-9.
- [7] MOLTSMANN T, TURTON J, ZHANG H M, et al. A Global Ocean Observing System (GOOS), delivered through enhanced collaboration across regions, communities, and new technologies [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 1-34.
- [8] 辛冰,符昱,王漪,等.海洋科学数据共享平台设计与实现[J].海洋信息,2018,33(1):43-48.
- [9] 李海涛,关煜,黄海广.海洋科学数据管理与可视化平台[J].计算机系统应用,2017,26(9):62-68.
- [10] 李安虎,周玉斌,刘海行,等.基于 WebGIS 的海洋科学数据共享平台的分析与设计[J].海洋科学进展,2004(1):85-90.
- [11] LINDSTROM P, PASCUCCHI V. Visualization of large terrains made easy [C]// Conference on Visualization. IEEE Computer Society, 2001.
- [12] PAJAROLA R. Efficient level-of-details for point based rendering [J]. Computer Graphics & Imaging, 2003: 141-146.
- [13] 田珊珊,王慧青,张小国.大规模地形数据实时绘制的技术研究[J].控制工程,2018,25(2):224-230.
- [14] 渠润涛.地形可视化系统中数据存储及处理方法研究与实现[D].开封:河南大学,2016.
- [15] 田珊珊.大规模三维地形多分辨率快速生成及显示优化研究[D].南京:东南大学,2018.
- [16] 徐广袖,黄漠涛,欧阳永忠,等.海洋磁重数据库建设及关键技术研究[J].海洋测绘,2010,30(4):33-37.
- [17] 顾春雷,杨漾,朱志春.几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证[J].测绘与空间地理信息,2011,34(5):99-102.
- [18] 徐洋,战超,王庆,等.基于海图数据的水下岸坡插值精度分析对比研究[J].海洋通报,2019,38(6):632-639.
- [19] 吕奕杰,叶健,徐清杨,等.面向大规模滑坡灾害模拟的地形建模与三维可视化 [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(3):467-474.
- [20] 马丹.多波束海底地形可视化表达若干关键技术[D].青岛:山东科技大学,2018.
- [21] MCDONNELL R A, LLOYD C, BURROUGH P. Principles of geographical information systems [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [22] 袁建峰.海量地形数据的组织模型和调度策略研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2009.
- [23] DONG S W, WANG D, WANG Y. A new algorithm for detecting position relationship between point and polygon [J]. Advanced Materials Research, 2012, 433: 4248-4253.
- [24] 宋晓,梁建峰,李维禄,等.基于多架构混搭模式的极地海洋数据库建模技术研究[J].极地研究,2018,30(4):411-418.

(本文编辑:李红军)