

多波束声呐技术应用设计

王立平[†]

(交通运输部南海航海保障中心广州海事测绘中心,广东 广州 510320)

摘要:随着海洋探索技术的不断进步,基于多波束声呐技术应用的海底地形三维模型可视化建模已经成为海洋科学研究的重要工具。为此,提出了一种综合方法,该方法利用多波束声呐系统采集的海底地形数据,通过数据预处理、格网化、三维建模、纹理映射及可视化等步骤,实现海底地形的精确三维表示。实验结果表明,该技术不仅提高了海底地形数据的可用性和可解释性,而且通过高效的数据处理算法,增强了模型的分辨率和细节表现。水平分辨率和垂直分辨率分别高达2 m和0.5 m,为海洋地质、生态、考古及工程应用提供了强有力的支持。

关键词:多波束声呐;海底地形;三维模型;格网化;纹理映射

中图分类号:TP39 **文献标识码:**A

Application Design of Multi-beam Sonar Technology

WANG Liping[†]

(Guangzhou Hydrographic Surveys Center, Navigation Guarantee Center(South), Ministry of Transport, Guangzhou, Guangdong 510320, China)

Abstract: With the continuous progress of ocean exploration technology, the visualization modeling of seabed terrain 3D models based on Application of multi-beam sonar technology has become an important tool for marine scientific research. This study proposes a comprehensive method that utilizes seabed terrain data collected by a multi beam sonar system to achieve accurate 3D representation of seabed terrain through data preprocessing, gridding, 3D modeling, texture mapping, and visualization. The experimental results show that this technology not only improves the availability and interpretability of seabed terrain data, but also enhances the resolution and detail representation of the model through efficient data processing algorithms. The horizontal resolution and vertical resolution are as high as 2m and 0.5m, respectively, providing strong support for marine geology, ecology, archaeology, and engineering applications.

Key words: multi-beam sonar; submarine topography; 3D model; grid based; texture mapping

海洋覆盖了地球表面的约71%,蕴藏着丰富的生物资源和矿产资源,同时也是全球气候系统的重要组成部分。然而,由于海洋环境的特殊性,海底地形的探测和研究相对陆地而言更为困难。传统的单波束声呐技术虽然能够提供水深数据,但效率较低,难以满足大面积海底地形快速、高精度测

量的需求。因此,发展高效、准确的海底地形三维模型可视化建模技术具有重要的理论价值和实际意义^[1]。

针对上述问题,国内外学者对于直流充电机的能效综合优化方面有着不同的研究。文献[2]提出了将高精度曲面模型算法应用于珊瑚礁地形建模,

实现了高精度的建模效果。但是该研究中所使用的机载激光测深系统对环境因素较敏感,会导致测量数据的不稳定性或误差增大。文献[3]利用重力数据和高斯曲面函数估计海底地形模型,实现了对先验海底模型的精化。但先验模型的选择和精度也会对最终结果产生影响,若先验模型本身存在较大的误差或偏差,其最终的精化结果也会受到影响。文献[4]采用非线性方法来抑制噪声,在更好地保留数据的原始特征和细节的同时有效去除噪声,实现了更高精度的海底地形分析。但其对特定的场景适应性可能有限,在面对不同类型的噪声或海底地形特征时,需要调整或优化模型参数。文献[5]将岸边验潮站的实际观测数据与 MDTVN22 模型相结合,提高了深度观测的精度和海底地形评估的精度。但该系统在远离验潮站的地方,数据的覆盖面不足,会导致测量精度下降。

为此,本文提出了一种多波束声呐技术应用设计。该技术充分利用了多波束声呐系统的测量优势,结合先进的三维建模和可视化技术,实现了对海底地形的高精度表达和直观展示。

1 三维模型可视化建模整体方案设计

通过对于以上文献中存在问题的思考与总结,提出了一种多波束声呐技术应用设计方法。该方法采用多波束测深声呐技术和测扫声呐技术,用于获取海底深度数据和海底表面的二维图像数据。采用地理信息系统技术处理、分析和展示地理空间数据。采用三维建模技术构建海底地形的三维模型,并将三维模型以可视化形式展现给用户。该研究的系统框图如图 1 所示。

在图 1 中,数据采集模块使用串口通信来接收多波束测深声呐和测扫声呐的原始数据,数据预处理模块包括数据解码、数字信号处理、滤波和去噪。对采集到的原始数据进行解码,提取出位置、深度等信息。应用数字信号处理技术对数据进行滤波和去噪,提高数据质量,并进行数据同步,确保位置、深度等信息的准确对应^[6]。数字高程模型生成模块采用三角网格化和插值算法,首先点云数据转换为网格数据,并使用插值算法生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),DEM 数据优化与平滑处理,生成海底地形的三维高程模型。底质分类与分析模块采用模式识别分类算法,进行底质数据特征提取,应用分类算法进行底质类型划分,并进行底质分布可视化。三维建模与可视化模块使用三维建模软件导入 DEM 和底质数据,构建三维地形和地貌地形,应用纹理和材质,增强视觉效果

果,并设计用户交互界面和视图导航^[7]。质量控制与验证模块进行模型精度和分辨率评估,现场采样数据与模型数据对比,并进行模型修正与优化。

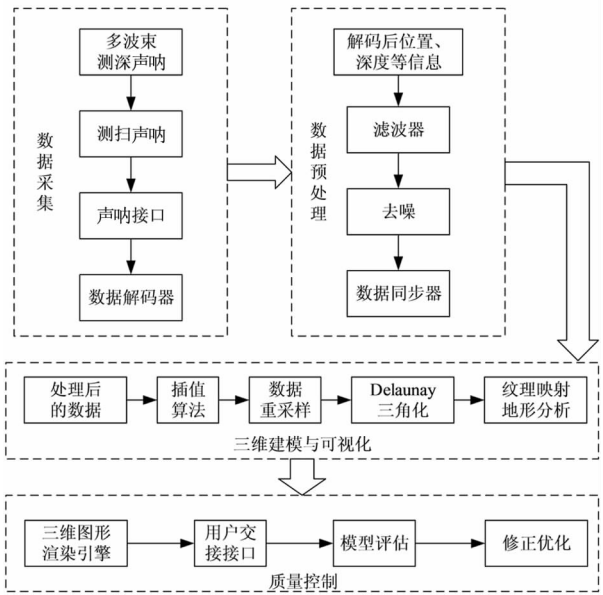


图 1 海底地形三维模型建模系统框图

本系统充分利用了多波束测深声呐和测扫声呐的技术优势,结合地理信息系统、三维建模和可视化技术,实现了海底地形的高精度三维可视化建模。多波束测深声呐技术通过广角度发射和多信道定向接收,获取水下高密度条幅式海底地形数据。测扫声呐技术对海底地形进行实时测深数据的采集,通过发射扇形脉冲声波并接收来自海底的回波,形成了照射脚印,获得了海底地形的详细数据。采用数字高程模型和 Delaunay 三角网的合成算法,对海底地形数据进行处理和分析,构建了高精度海底地形三维模型。

2 多波束声呐技术设计

多波束声呐技术主要可以分为单波束声呐、测扫声呐、多波束测深声呐、合成孔径声呐和前视声呐等。本研究将多波束测深声呐技术与测扫声呐技术相结合,通过多波束测深声呐获取高精度、高分辨率的地形数据,再利用测扫声呐进行连续、实时的地形测绘,实现对海底地形的全面、精确的刻画^[8]。多波束声呐技术设计原理框图如图 2 所示。

多波束测深声呐技术中,波束形成是核心部分,通过精确控制声波发射与接收的角度和强度,形成多个窄波束,实现对海底地形的精细扫描。信号处理是多波束声呐技术的关键。在接收海底回

波后,需要对信号进行滤波、放大、数字化等处理,以提取出有用的地形信息。由于数据量巨大,需要采用高效的数据压缩和传输技术,确保数据的实时性和完整性。

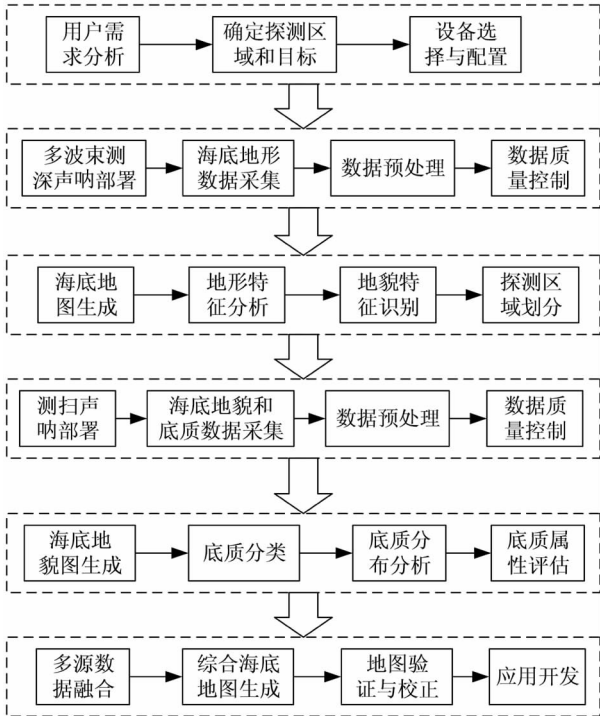


图 2 多波束声呐技术模块框图

首先需要进行阵列设计,多波束声呐的性能与阵列形状、大小、排列方式等都有关系。在阵列设计时,需要考虑管道尺寸、声波频段、扫描范围等因素,选取合适的阵列设计方案。多波束测深系统利用发射换能器阵列向海底发射宽扇区覆盖的声波。这些声波以多个波束的形式传播,每个波束都对应一个特定的角度和范围。信号接收,即当声波遇到海底或其他水下目标时,会被反射回来并被接收换能器阵列接收^[9]。接收换能器阵列会对声波进行窄波束接收,以获取更准确的位置和深度信息。然后进行信号滤波,即接收到的声呐信号首先需要进行滤波处理,以去除噪声干扰。对滤波后的信号进行时频分析,提取深度信息。这涉及对信号进行频率和时间的分析,以确定声波的传播时间和路径,进而计算海底的深度。为了获得更准确的深度测量值,需要对每个波束进行幅度和相位补偿。这是因为声波在传播过程中会受到衰减和相位偏移的影响,通过补偿可以消除这些影响。随后进行数据处理,在获取了所有波束的深度信息后,需要进行数据处理以生成海底地形图,包括将深度信息转换为三维坐标,并使用插值和平滑算法来填充和修正

数据中的空缺和异常值。最后,将处理后的海底地形图输出到显示器或存储设备中,以供后续分析和使用。

其中,声呐方程是描述声呐系统性能的基本方程,它将声呐系统的设备性能、信道影响、目标特性等作为一个整体来考虑^[10]。其基本形式可表示为:

$$SL-2TL+TS=RL-DT \tag{1}$$

式中,SL 表示声源级,TL 表示传播损失,TS 表示目标强度,RL 表示接收灵敏度,DT 表示检测阈。其中,声源级用于描述声源辐射能力,可表示为:

$$SL=170.8+10\lg P+DI_T \tag{2}$$

式中, P 表示发射声功率, DI_T 表示发射指向性指数。传播损失指当声音信号在介质中传播时,会发生衰减,其公式可表示为:

$$TL=20\lg r+\alpha r \tag{3}$$

式中, r 表示传播距离, α 表示海水吸收系数,与声波频率有关。在多波束声呐中,波束形成是通过不断调整不同阵元上的信号相位来实现的。当回波到达角度等于某个波束的波束角时,对于其他波束,理论上也可以计算出回波到达角度。这其中涉及到相位差的计算,可表示为:

$$\sin \theta(n)=\frac{\lambda}{2\pi D}\Delta\varphi(k,n)+\sin \theta_k \tag{4}$$

式中, $\theta(n)$ 表示回波到达角度, λ 表示声波波长, D 表示阵元间距, $\Delta\varphi(k,n)$ 表示不同波束之间的相位差, θ_k 表示其他波束的波束角。

测扫声呐技术中的声呐阵列设计需要考虑工作频率、波束宽度和指向性等因素。通过优化阵列结构,可以提高声呐的分辨率和探测范围,从而获取更为准确的地形信息^[11]。并采用步进扫描方式,该方式可以通过调整步长,实现对特定区域的精细测绘。

3 海底地形三维模型可视化

在本研究中,关于海底地形三维模型可视化建模方法,采用的是不规则格网建模,并生成 DEM,将数据导入三维建模软件中并进行一系列视觉优化,采用 DEM 和 Delaunay 三角网的合成算法,对海底地形数据进行处理和分析,从而构建海底地形的三维模型。该模块原理框图如图 3 所示。

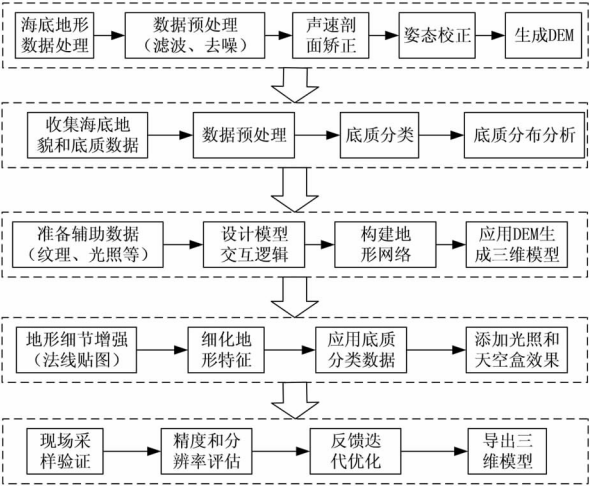


图3 三维可视化建模框图

在本模块中,首先进行数据获取,使用多波束测深声呐技术和测扫声呐技术,通过向海底发送声波并接收回波,获取海底地形的深度和形态数据。然后进行数据处理,包括数据解码、数据同步和数据插值与平滑。数据解码,即对原始数据进行解码,提取出位置、深度等关键信息。数据同步,即由GPS、姿态、声呐上传数据都是由不同的端口进行传输,数据间没有时间上的直接关联,所以需要将三种信息进行同步,获得同一时刻的组合信息。数据插值与平滑,即为了提高数据的精度和可视化效果,需要对数据进行插值和平滑处理^[12]。本研究使用的插值处理方法是反距离加权插值。

本模块的核心是三维建模,利用处理后的数据生成DEM,DEM是表示地形高程的一种模型。DEM数据通常以栅格形式呈现,每个栅格单元包含一个高度值。DEM数据通常包含高程值、分辨率、坐标系统和数据源。高程值,即每个栅格单元的高程值,以m为单位。分辨率,即栅格单元的大小,以m为单位。坐标系统,即DEM数据的空间参考系统,用于定位DEM数据在地球上的位置。数据源,即DEM数据的来源和获取方式。在生成DEM时,需要对数据点之间的高程进行插值。TIN是通过连接高程数据点形成的三角形网络,从TIN生成栅格数据通常涉及对三角形内的点进行高程内插^[13]。

其中,将地理坐标转换为空间直角坐标系的坐标,公式可表示为:

$$X = \frac{N(\varphi) + H}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \tag{5}$$

$$Y = \frac{N(\varphi) + H}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \tag{6}$$

$$Z = \frac{(1 - e^2)(N(\varphi) + H)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \cdot \sin \varphi \tag{7}$$

式中, φ 是纬度, λ 是经度, H 是椭球体相对大地水准面的高程, $N(\varphi)$ 是卯酉圈半径^[14]。将DEM数据转换为灰度图,其中每个像素的灰度值与高程值相关联,这关系到将实际高程值归一化到灰度值范围内的映射,可表示为:

$$\delta_{\text{grid}} = \frac{H_{\text{grid}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \cdot (\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}) + \delta_{\text{min}} \tag{8}$$

式中, H_{grid} 是栅格点的实际高程, H_{min} 和 H_{max} 分别是地形高度的最小值和最大值, δ_{grid} 是对应的灰度值, δ_{min} 和 δ_{max} 是灰度值的最小值和最大值。

将DEM数据导入Unity3D三维建模软件中,构建海底地形的三维模型。为了提高模型的真实感,需要将测扫声呐获取的海底表面纹理应用到三维模型上,通过法线贴图技术来实现^[15]。在三维建模软件中添加光照、水面效果、管道模型等场景要素,并设置摄像机视角,实现海底场景的可视化交互。

4 实验结果与分析

为了验证上述系统,为了验证上述系统与算法的有效性,本研究以“海底地形三维模型的分辨率”为例对该系统进行验证。使用Python来编写处理Delaunay三角网和DEM的算法,采用多波束测深声呐和测扫声呐设备收集海底地形的三维数据。本研究实验环境如图4所示。



图4 实验环境

首先采集海底地形数据,利用多波束测深声呐和测扫声呐系统获取海底地形数据。对采集到的海底地形数据进行预处理,包括数据清洗、格式转换等操作。利用预处理后的海底地形数据构建DEM,即地表区域上地形的三维向量的有向序列。

在DEM的基础上采用Delaunay三角网生成算法构建无重叠、无重叠边且最大化最小角度的三角网。将构建好的DEM和Delaunay三角网导入

可视化建模软件中进行建模,得到图 5 所示结果。

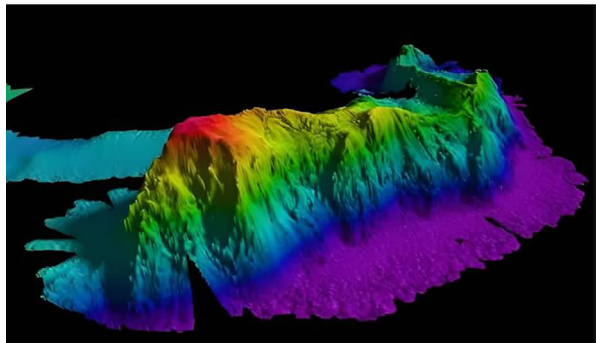


图 5 海底地形三维模型

在本系统中,通过波束密度、声呐频率、发射频率、脉冲长度和声速等方面来估算分辨率,得出如表 1 所示分辨率。

表 1 实验数据及分辨率

组数	经度/ (°)	纬度/ (°)	水深数据/ m	水平 分辨率/ m	垂直 分辨率/ m
1	-30.000	45.000	1000,1020,1040	2	0.5
2	-30.005	45.005	1010,1035,1055	2	0.5
3	-30.010	45.010	1020,1050,1070	2	0.5

表 1 中,水深数据表示从多波束声呐系统采集的三个连续波束的平均水深值。分辨率的数值越小,表示分辨率越高;数值越大,表示分辨率越低。

为了验证该方法三维建模的能力,分别使用文献[2]系统和文献[3]的系统作为对比实验,在同一经纬度进行三组实验,得出如表 2 和表 3 所示数据。

表 2 文献[2]实验数据

组数	经度/ (°)	纬度/ (°)	水深数据/ m	水平 分辨率/ m	垂直 分辨率/ m
1	-30.000	45.000	995,1015,1030	5	1
2	-30.005	45.005	1005,1030,1050	5	1
3	-30.010	45.010	1025,1055,1075	5	1

表 3 文献[3]实验数据

组数	经度/ (°)	纬度/ (°)	水深数据/ m	水平 分辨率/ m	垂直 分辨率/ m
1	-30.000	45.000	1000,1025,1050	3	0.75
2	-30.005	45.005	1010,1040,1065	3	0.75
3	-30.010	45.010	1030,1060,1085	3	0.75

通过上述三个表可以看出,本系统所用方法对海底地形三维建模分辨率最高,文献[3]的分辨率相比文献[2]有所提升,但仍低于本系统。

为了更直观地表现不同方法下的对海底地形三维建模分辨率的差别,使用柱状图来呈现对比图。分辨率对比图如图 6 所示。

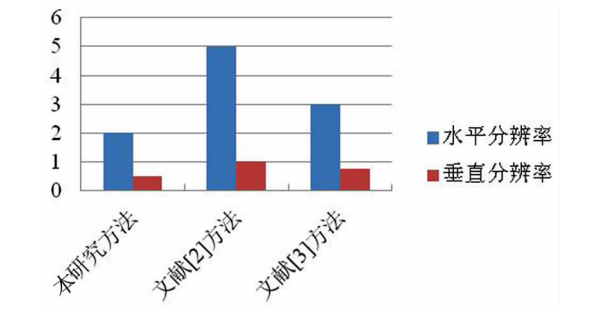


图 6 分辨率对比图

从图 6 中可以看出,在使用该研究算法建模方法时,对海底地形三维建模的分辨率最高,水平分辨率和垂直分辨率可达到 2 m 和 0.5 m,而文献[2]和文献[3]方法的水平分辨率和垂直分辨率均低于本系统,水平分辨率低至 5 m。根据以上分析得出,本研究方法具备对海底地形三维模型可视化的能力,且分辨率较高,具有一定的应用价值。

5 结 论

本文提出了一种先进的海底地形三维可视化建模技术。该技术结合了高精度的多波束测深声呐和测扫声呐数据,以及数字高程模型和 Delaunay 三角网合成算法。该方法不仅提高了海底地形数据的分辨率和精度,而且通过三维可视化技术,使得复杂的海底地形特征更加直观和易于理解。与此同时,在以后的研究中,将致力于提高模型的泛化能力,使其能够使用不同海洋环境和不同类型海底地形的建模需求。

参考文献

[1] 汤巧英,黄智才.深水多波束声呐的快速声线追踪方法[J].传感技术学报,2022,35(11):1530-1537.

[2] 张瑞辰,翟国君,杜正平.基于 HASM 模型的高分辨率珊瑚礁地形建模[J].海军工程大学学报,2022,34(3):50-55.

[3] 翟振和,孙中苗,管斌.利用扰动重力数据反演海底地形的高斯曲面函数估计方法[J].测绘学报,2024,53(2):231-238.