



多波束在水下桩体点云获取中的应用

夏显文¹, 戴光耀¹, 金程晔²

(1. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 随着装配式码头工程的增加, 水下桩体的安放状态正成为关注的焦点。然而, 由于受海水隔断, 高效、低成本、高精度的桩体状态监测方法相对较少。因此, 本文提出利用多波束获取水下桩体点云方法, 主要包括 GNSS RTK 多波束测深技术, 顾及桩体形态、分布和多波束测量原理的多波束测线布设方法, 基于 K -means++ 的桩体点云具备聚类方法以及桩体形状、回波强度阈值约束的桩体点云分割和滤波方法。实际应用结果表明: 基于该方法可以获取高精度桩体点云, 得到桩体的状态参数, 取得桩体中心坐标 x 和 y 方向偏差小于 5 cm、半径偏差小于 4.5 cm 的精度, 验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 多波束测深系统; 测线布设; K -means++; 点云分割

中图分类号: P229.1; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0212-06

Application of multi-beam in underwater pile point cloud acquisition

XIA Xianwen¹, DAI Guangyao¹, JIN Chengxi²

(1. CCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: With the increase of prefabricated docks projects, the placement state of underwater piles is becoming the focus of attention. However, due to the isolation by seawater, there are relatively few efficient, low-cost and high-precision methods for monitoring the condition of piles. This paper proposes a method to obtain underwater pile point cloud by using multi-beam bathymetric system (MBS), which includes the GNSS RTK multi-beam sounding technology, the survey line layout taking into account the shapes and distributions of underwater piles and MBS measurement principle, and the clustering point cloud of the monitored pile by K -means++ and the pile point cloud segmentation and filtering by considering the pile shape and MBS backscatter strength. The practical application results show that based on this method, the high-precision point cloud of the pile can be obtained, the state parameters of the pile are obtained, and the accuracy of the deviation in the x and y directions of the pile center is less than 5 cm, and the radius deviation is less than 4.5 cm, which verifies the correctness and effectiveness of this method.

Keywords: multibeam bathymetric system (MBS); surveying line layout; K -means++; point cloud segmentation

近年来装配式高桩码头的水运工程建设越来越多, 柱桩是这些工程的基础支撑结构^[1-2]。桩体打入水下的形态直接关系打桩工程的质量, 也决定着海上工程建设的安全性, 开展水下桩体点云信息的获取, 进而复原桩体形态, 对于呈现水下桩体状态、确保打桩质量和水上工程施工安全性

具有重要的作用^[3]。

通常水下桩体顶面距离水面还有一定深度, 桩体在水下的形态完全被海水隔断, 无法借助常规的光学测量方法对其状态进行监测。通过使用三维机械扫描声呐可以获取水下目标的点云信息。国内学者已将这种技术应用于防波堤护面块体的

收稿日期: 2022-12-22

作者简介: 夏显文 (1967—), 男, 教授级高级工程师, 从事工程测量研究。

安装中, 并取得显著成果^[4]。研究人员通过室内仿真场景进行三维声呐测量成果精度试验, 确认 10 cm 及以上目标可以有效识别^[5]; 有些采用三维声呐点云数据进行三维模型构建, 从而确认了三维声呐在识别物体轮廓方面的出色表现^[6]。国外研究人员利用装备机械扫描声呐的小型无人水下航行器进行水下障碍物的探测。然而, 由于航行器的定位精度有限, 声呐只能大致描绘水下目标的外形, 无法提供详细的描述。

综上, 须将声呐设备固定在海底获取水下目标点云, 否则难以得到高精度的测量成果。另外, 该系统无法达到高效和低成本的测量标准。多波束水下测深系统因其高密度、高精度的测量特点已成为行业的典型, 在一次扫描中可获取整个扇面的深度信息, 已应用于水下目标的测量, 然而受到水深、声速和测量模式的影响, 其测量精度仍无法满足水下桩体状态检测的需求^[7-8]。总体而言, 多波束测量仍然是一种高效且经济的方法, 可以获取水下桩体的点云数据^[9-10]。因此, 本文结合具体工程背景, 提出一种基于多波束测量系统的水下桩体点云获取策略, 主要包括针对水下桩体分布特点的多波束测量方法和基于桩体形态、回波强度信息约束的桩体点云滤波和分割方法。

1 水下桩体测量方法

1.1 GNSS RTK 多波束高精度测深方法

GNSS RTK 多波束测深是联合 GNSS RTK 三维解和多波束测深信息获取波束点三维坐标的一种测量方法。该方法需要对波束脚印坐标进行如下转换:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{LLS} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}_{GNSS} + \mathbf{R}(r, p, h) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{VFS} \quad (1)$$

式中: x 、 y 、 z 为波束脚印坐标, x_0 、 y_0 、 z_0 为原点坐标, LLS 为地理坐标, GNSS 为 GNSS 确定的船体坐标系, VFS 为船体坐标系, r 、 p 、 h 分别为横摇、纵摇和方位角, $\mathbf{R}(r, p, h)$ 为由 r 、 p 、 h 确定的旋转矩阵。

1.2 多波束水下桩体测量方法

水下精确测量过程中, 由于精度要求较高且要求尽量多的波束点能落在桩体上, 测线的布置可能不同于常规水下地形测量。因此, 根据桩体分布提出 2 种测线布置方案, 见图 1。

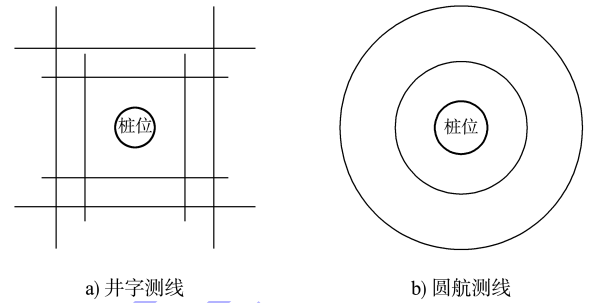


图 1 测线布置

井字形测线以桩为中心布置成井字形, 优点是测得的数据稳定, 缺点是数据量不够, 桩体侧面数据分布不均匀, 半侧数据缺失, 观测时间较长。

圆形测线以桩为中心布置成圆形, 优点是数据量大, 缺点是船只转弯半径较小, 船体姿态不稳定, 对测船驾驶要求高。通过 2 种测线布置方式对比, 选取最优方式进行测量。

根据设计桩体几何结构信息及区域水深信息, 研究 R2Sonic2024 多波束换能器设备的波束测量模式, 获得桩体点云的最优测量方法。设定桩体距离多波束的水平距离为 x , 桩体出露海底高 l , 桩体半径 r , 水深为 h , 最大波束入射角为 θ_0 , 等角测量有 K_θ 个波束、等距测量有 K_j 个波束, 分别根据波束扫描剖面模型计算多波束可扫描到桩体顶面及侧面的最大波束数, 多波束测量柱子时最大波束数剖面见图 2。

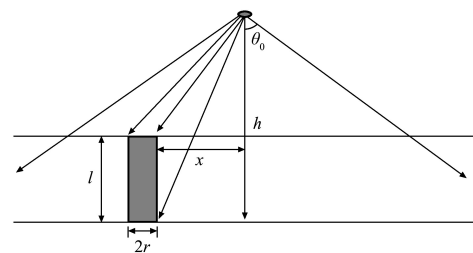


图 2 多波束测量柱子时最大波束数剖面

等角测量模式下:

$$K_d = \frac{K_\theta \left[\tan^{-1}\left(\frac{h-l}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h-l}{x+2r}\right) \right]}{2\theta_0} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{K_\theta \left[\tan^{-1}\left(\frac{h}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h-l}{x}\right) \right]}{2\theta_0} \quad (3)$$

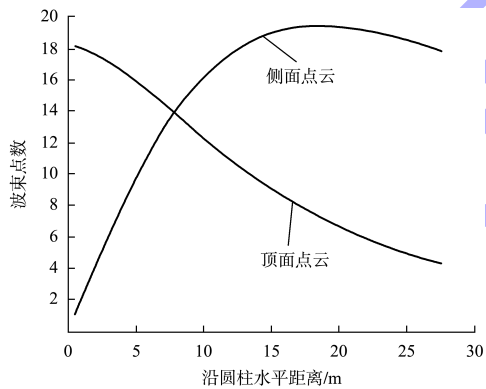
等距测量模式下:

$$K_d = \frac{K_j r}{(h-l) \tan\theta_0} \quad (4)$$

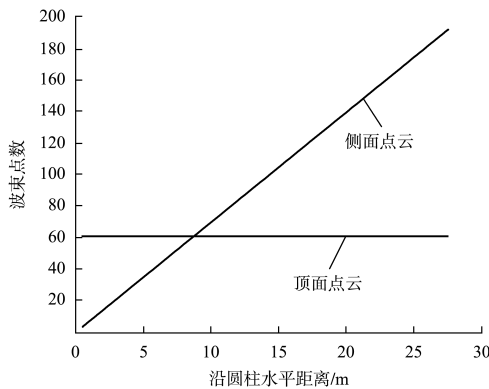
$$K_c = \frac{K_j l x}{2h(h-l) \tan\theta_0} \quad (5)$$

式中: K_c 为柱侧面接收波束数, K_d 为柱顶面接收波束数。

柱体接收最大波束数与圆航半径(井字形测线可考虑距桩体的水平距离)的关系见图3, 此时水深22 m, 桩体出露海底6 m, 桩体半径1.2 m, 波束最大入射角为60°, 等角测量有256个波束, 等距测量有1 024个波束。



a) 等角测量



b) 等距测量

图3 柱体接收波束数与圆航半径关系

由图3可知, 为确保柱体顶面及侧面都接收到较多的波束, 此时圆航半径建议为10~20 m。实际点云密度还和船速有关, 但均应确保船体姿态较为稳定, 为此建议: 1) 柱顶面高精度点云数据获取须尽量使测量船在柱子的正上方经过。2) 柱侧面高精度点云数据获取须尽量保持船体距柱子的水平距离在1/2~1倍水深内, 使得多波束用中央波束测量较多的侧面数据点云。

2 基于桩体形状和回波强度约束的桩体点云分割方法

首先, 对原始点云数据进行聚类裁剪和分割操作, 以剔除异常点。 K -means 均值聚类算法的准确性通常得不到保障, 因为随机选择的起始中心可能会产生坏的迭代结果。因此, 选择采用 K -means++ 聚类算法, 该方法是对 K -means 算法的一种改进, 使用具有特定概率的随机选择初始中心点来启动 K -means 聚类过程, 以降低初始中心点对聚类结果的影响。具体为 K -means++ 聚类算法随机选择第1个中心点, 但选择后续的中心点时, 不是简单地随机选择, 而是根据距离前几个中心点的远近来选择。距离前几个中心点越远的点被选为下一个中心点的概率越大。 K -means++ 的实施步骤为:

- 1) 从点集 X 中随机均匀地选择第1个初始中心 c_1 。
- 2) 计算 X 中每个点到已选择的聚类中心的最短距离为 $D(x)$, 则对于 $x' \in X$ 被选为下一个中心 c_i 的概率为:

$$\frac{D(x')^2}{\sum_{x' \in X} D(x)^2} \quad (6)$$

- 3) 重复步骤(2), 直到选择出了 k 个聚类中心。
- 4) 之后与 k 均值方法工作步骤相同。

将步骤(2)中所采用的中心点选择方法称为“ D^2 权重”的方法。 K -means++ 算法始终优于 k 均值算法, 不仅算法的误差较小(在某些情况下可以比 k 均值算法的精度高几个数量级), 而且算法的运行时间更短。初始中心点的 D^2 权重选择比随机选择更复杂、更耗时, 但整体上仍然会使

K -means++ 算法更快, 因为它可以帮助算法在较少的迭代后就收敛。借助 K -means++ 算法, 桩体点云聚类的过程见图 4。

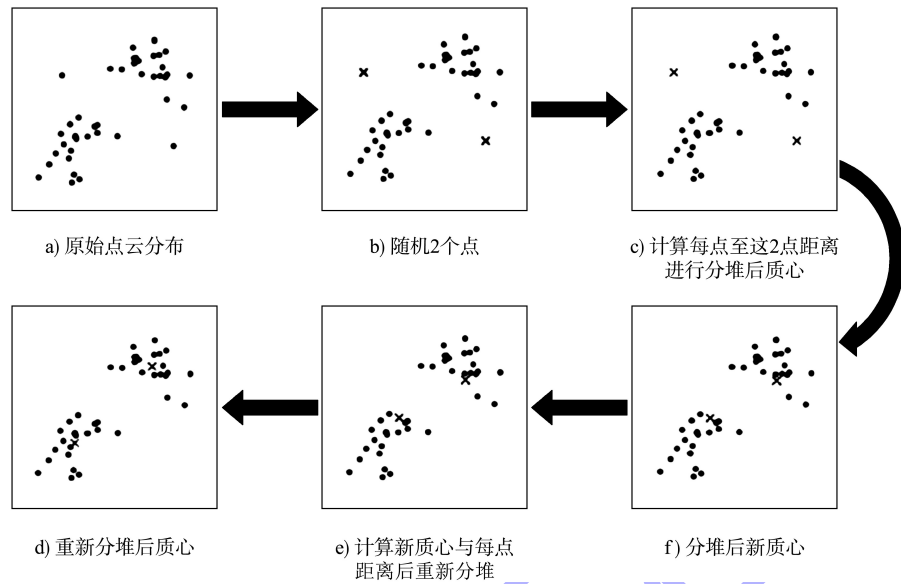


图 4 K -means++ 桩体点云聚类示意

将柱体单独裁剪出来后, 把柱体点云数据分割为柱顶面和柱侧面点云数据, 进而作为拟合建模方法的数据源进行处理。

为提高数据处理速度及分割精度, 采用一种基于桩体形状和回波强度约束的桩体点云分割方法。该方法通过利用桩体形状和回波强度约束, 可以快速、准确地识别和分割出桩体点云数据, 避免了传统方法中耗时的迭代和优化过程。不仅考虑了桩体的几何形状, 还结合回波强度信息, 有助于更准确地识别和分割出不同性质的桩体点云数据, 提高分割精度。该方法具体步骤为:

考虑到柱子基本垂直矗立于海底, 柱顶面点云的 z 坐标将集中分布在一个较小的区间内, 因此根据点云数据中 z 坐标的分布规律, 将柱面及柱顶的点云数据分割出来:

1) 选择一个合适的阈值区间 s (在实际应用中, 区间 s 通常取为 0.1 m), 并在 z 坐标上以 0.01 m 的步长逐步移动该区间。

2) 选择最大点云数量区间内的点云作为柱顶面点云, 进行桩体点云的分割。

理论上, 此方法可能导致柱顶面点云中混入一些柱侧面点云。然而, 通过与实际数据的对比,

发现对柱顶面拟合建模的影响并不大。

对比实测点云局部法向量法的分割效果, 该方法首先在点云的邻域范围内构建点云的局部法向量, 通过柱顶面与柱侧面点云法向量的垂直特性进行柱体点云的分割。该方法与点云的测量精度和点云邻域范围的大小有关, 可能出现柱侧面点云分割为柱顶面的错误结果, 见图 5, 实施较为复杂。因此在实测数据的处理上选用区间步进的方式进行柱体点云的分割。

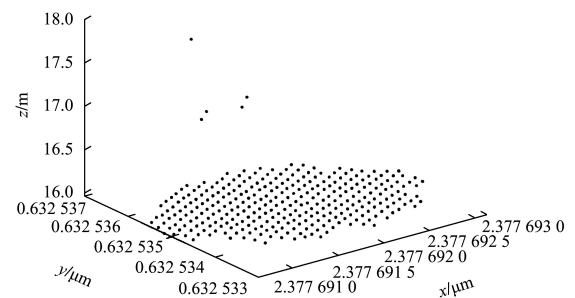


图 5 局部法向量分割桩顶面点云中混入少许柱侧面点云图

3 试验及分析

3.1 点云数据采集

为了验证上述水下桩体点云获取方法的准确性, 在泰州港靖江港区深国际物流中心码头项目

的实际工程中，使用 SONIC2024 多波束测深系统（采用垂直向下的发射模式，波束扫描角为 120° ）、光纤罗经、声速剖面仪、表面声速仪和 SPS855 GNSS 接收机进行多波束测量。该工程为装配式码头，在沉桩结束后安装预支横梁。打桩后的桩顶高程为 1.45 m，相邻桩间距为 8 m。采用井字形的测线布设方式，并增加经过桩体顶面的测线以获取更多的桩体顶面点云数据，见图 6。考虑到当地的潮汐变化，测线到桩体的距离一般为 3~7 m。

对原始观测数据解码，采用武汉大学研制的 GNSS RTK 多波束高精度测深数据处理方法和软件开展解算，最终获得的多波束点云图见图 7。

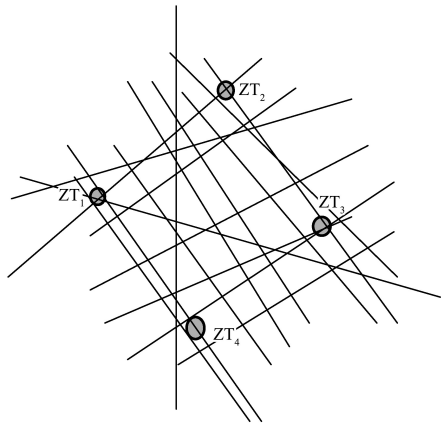


图 6 实测某组桩体测线

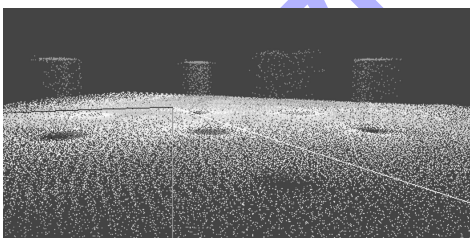
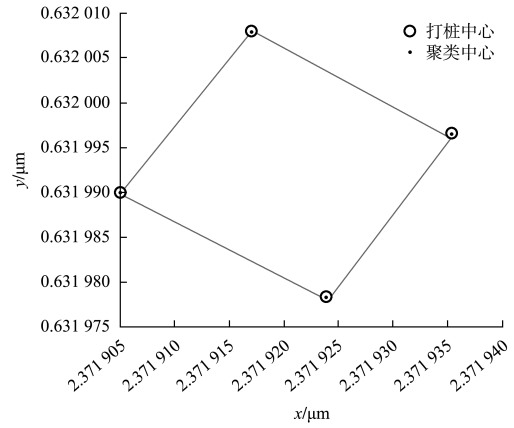


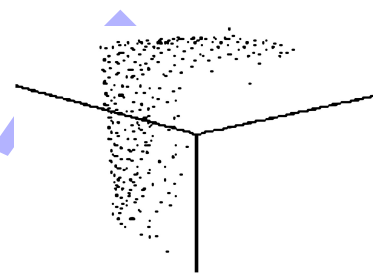
图 7 实测的 4 根组桩体多波束点云

3.2 数据处理

采用 *K-means++* 自聚类方法对点云数据按照高程变化进行自聚类，获得 4 个聚类中心的点云信息，见图 8。4 个聚类中心的位置如图 8a) 所示，可以看出聚类中心与打桩位置完全吻合，表明通过使用 *K-means++* 算法对点云的高程数据进行聚类，可以较为准确地确定桩体的位置。提取每个桩体中心的聚类数据，图 8b) 给出了 ZT_1 的点云分布。



a) 聚类中心的位置



b) ZT_1 的点云分布

图 8 *K-means++* 桩体点云聚类

结合点云的法向量、多波束回波强度信息和高程信息设定阈值，以消除桩体底部和桩面的异常点云。在此基础上，进一步对桩体和非桩体的点云进行分割。考虑到桩体的形状，顶面的法向量基本垂直水平面，设置法向量与垂直方向的夹角为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ ，高程为 1.25~1.65 m；桩体侧面的法向量与垂直方向的夹角 $85^\circ \sim 95^\circ$ ，高程变化 -1.75~1.25 m。统计桩体和海底的回波强度，桩体的回波强度远大于泥沙质海床的回波强度，设置阈值为 -26 db。综合阈值参数，分割出 Z_1 桩体的顶面和侧面点云见图 9。图 9a) 基本反映出圆形顶面的特点，而图 9b) 反映了桩体的基本形状。根据图 6 所示航线，可以看出测线主要分布经过 ZT_1 顶面和靠近桩体群一侧，因此，桩体顶面以及靠近桩体群中心一侧的侧面点云分布较密集。

借助桩体顶面点云、侧面点云，考虑桩体的圆柱形态，拟合顶面和圆柱，形成露出海床面上的桩体，见图 9c)。

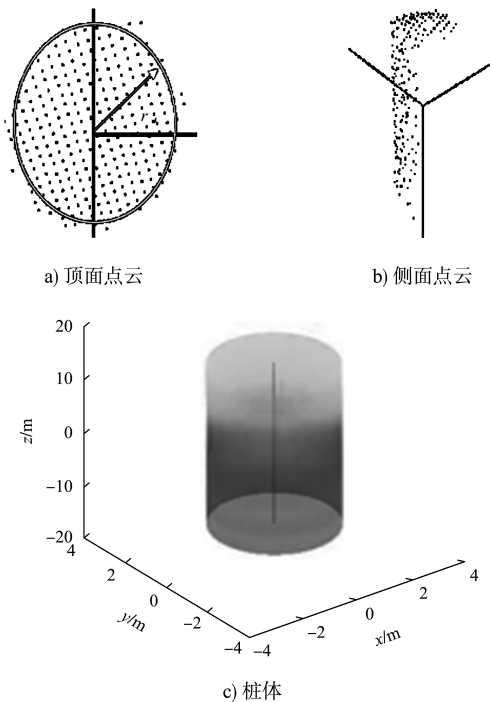


图 9 桩体点云分割及桩体形态拟合

3.3 精度分析

为了定量评估上述方法的正确性, 采用 GNSS RTK 获得桩体当面中心坐标和桩体的半径参数作为参考, 评估 4 个桩体利用分割出的点云拟合所得圆柱中心和半径的精度, 2 个参量的偏差见表 1。由表可知, ZT_3 的精度高于其他 3 个柱体, 分析表明, 测线基本从靠近其他 3 个桩体群的内侧经过, 即只能获得该桩体靠近桩体群中心一侧的侧面点云, 而外侧基本没有点云; 相对而言, ZT_3 的点云基本分布在桩体的四周, 因此拟合精度相对较高。

表 1 利用点云拟合所得桩体中心坐标及半径误差

桩号	中心偏差量(dx, dy)/cm	半径 r/cm
ZT_1	4.5, 3.7	4.2
ZT_2	4.2, 2.8	3.9
ZT_3	2.2, 1.9	2.3
ZT_4	3.2, 3.0	2.8

整体而言, 4 个桩体中心坐标的 x 和 y 方向偏差均小于 5 cm, 圆柱半径偏差小于 5 cm, 表明基于多波束测量方法和点云分割方法正确, 可以获得准确的桩体顶面和侧面点云。

4 结论

1) 基于多波束的码头水下桩体点云获取方法, 解决了桩体打入水下后状态的监测难题。应

用结果表明, 该方法为水下桩体形态监测提供了一种简单、高效、精确且成本低廉的方法。实际测量结果验证了该方法的正确性, 为后续装配式码头预制横梁的制作与安装提供了指导性数据。

2) 点云数量严重影响着水下桩体形态的反映及桩体状态参数的估计。由于测量海域海况较恶劣, 试验采用井字形测线, 为获得更多的高精度、密集点云, 建议根据海况和实际情况, 尽可能采用圆走航、低船速实现桩体测量。

参考文献:

- [1] 王毅. 石油勘探中水下高精度定位算法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [2] EREN F, PE'ERI S, RZHANOV Y. Airborne Lidar Bathymetry (ALB) waveform analysis for bottom return characteristics[C]//Ocean Sensing and Monitoring VIII, Washington: SPIE, 2016: 122-127.
- [3] WESTFELD P, RICHTER K, MAAS H G, et al. Analysis of the effect of wave patterns on refraction in airborne lidar bathymetry[C]//XXIII ISPRS Congress. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Prague: [s. n.]2016: 133-139.
- [4] 胡金龙, 邓居勇. 三维声呐成像系统在防波堤水下安装块石中的运用[J]. 水运工程, 2019(1): 213-217.
- [5] 吉同元, 李鹏飞, 胡文高, 等. 不同水下特征对三维成像声呐扫测影响的室内试验研究[J]. 水运工程, 2019(4): 159-163.
- [6] 刘天宝, 吴晓潭, 黄勇, 等. 三维成像声呐图像重建研究[J]. 声学技术, 2015, 34(4): 358-361.
- [7] SONG S, LEE H, JO S. Boundary-enhanced supervoxel segmentation for sparse outdoor LiDAR data [J]. Electronics letters, 2014, 50(25): 1917-1919.
- [8] GAO G, LAURI M, ZHANG J W, et al. Saliency-guided adaptive seeding for supervoxel segmentation [C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Vancouver: IEEE, 2017: 4938-4943.
- [9] 何林帮, 赵建虎, 张红梅, 等. 顾及姿态角的多波束声线精确跟踪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 46-50.
- [10] ZHAO J H, ZHAO X L, ZHANG H M, et al. Improved Model for Depth Bias Correction in Airborne LiDAR Bathymetry Systems[J]. Remote sensing, 2017, 9(7): 710.

(本文编辑 赵娟)