



# 基于多波束点云的水下柱桩及 桩间距高精度确定方法

夏显文<sup>1</sup>, 张小东<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032;

2. 武汉大学中国边界与海洋研究院, 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 受海水介质环境复杂、桩体倾斜以及测量误差大的影响, 水下圆柱桩位置的高精度、低成本、高效率确定一直是港口工程建设中的一个难点。为此, 提出了一种基于多波束点云的水下圆柱桩及桩间距高精度确定方法。该方法首先基于多波束测量实现桩体及海床点云数据低成本、高效获取。考虑桩体属性信息、点云法向量和高程等几何信息, 利用一种综合阈值分割方法实现了桩体点云的有效提取。还提出了顾及桩体形态、测量误差的桩体中心位置综合确定方法, 实现桩体相对位置和桩间距的高精度确定。该方法得到了实际工程验证, 取得了优于 5 cm 的桩体相对位置和桩间距确定精度。

**关键词:** 多波束点云; 联合阈值分割; 交点法; 桩体定位

中图分类号: U 656; U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0041-06

## Determination of underwater piles' locations and distances by multibeam point cloud

XIA Xian-wen<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>2</sup>

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

2. Wuhan University China Institute of Boundary and Ocean Studies, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Due to underwater complex environment, pile inclination and large measurement error, the determination of underwater cylindrical pile position with high accuracy, low cost and high efficiency has always been a difficulty in offshore engineering. Therefore, this paper proposes a high-precision determination method of underwater cylindrical piles and their spacing distances based on MBES (Multi-beam echo sounder) point clouds. Firstly, we have obtained positions of pile and seabed with low cost and high efficiency using this method. Then, considering the geometric information (normal vector and elevation) as well as pile attribute information, we realized the effective extraction of pile point clouds using a comprehensive threshold segmentation method. A comprehensive determination method of pile center position considering pile shape and measurement error has put forward to realize the high precision determination of pile position and pile spacing. The method in this paper has been verified by practical engineering, and the determination accuracy of pile position and pile spacing is better than 5 cm.

**Keywords:** MBES (multibeam echo sounder) point clouds; joint threshold segmentation; intersection point method; pile location

水下柱桩是港口工程的基础性支撑结构, 其在水下的状态和精确位置直接关系着上层构件的

安装及运行的安全性。受水下环境和测量条件限制, 水下柱桩位置的高精度、低成本、高效率确

收稿日期: 2021-02-22

作者简介: 夏显文 (1967—), 男, 教授级高工, 研究方向为工程测量。

定一直是海上工程施工的一个难题。

目前的水下定位通常借助超短基线 (USBL, ultra short baseline) 定位系统、短基线 (SBL, short baseline) 定位系统和长基线 (LBL, long baseline) 定位系统来实现<sup>[1-5]</sup>。USBL 和 SBL 虽然可以实现走航定位且易于实现, 但定位精度为米级, 难以满足高精度水下定位需要。LBL 定位精度高 (可以实现厘米级定位), 但需要水下声学阵列, 成本高且难以实现。水下桩体的形态目前可借助水下光学成像系统、2D/3D 水下扫描声呐来获取。但光学成像系统和 2D 声呐获取的数据是二维图像, 无法呈现水下桩体的三维形状。3D 声呐可通过获取的三维点云来表征水下桩体的立体形状, 因此具有较高的应用价值, 国内外学者也对此开展了相关研究。刘天云等<sup>[6]</sup>和胡金龙等<sup>[7]</sup>分别将三维扫描声呐应用于防波堤护面块体安装测量中, 取得了很好的监测效果; 吉同元等<sup>[8]</sup>在室内利用多种人造水下特征物研究 3D 声呐测量精度, 认为 3D 声呐可以识别 10 cm 及以上目标; 刘天宝等<sup>[9]</sup>利用 3D 声呐点云进行目标的三维重构, 验证了三维声呐在轮廓识别方面的优越性; Sohnlein 等<sup>[10]</sup>将 BV5000 3D 机械扫描声呐搭载在小型无人水下航行器 (AUV) 上进行海底沉船探测, 但由于 AUV 绝对定位精度不高, 搭载 AUV 的 3D 扫描声呐虽能获得水下目标形状, 但无法精确获取目标位置信息。综上可知, 借助 3D 声呐获取高精度水下目标点云需要将设备固定在海底或者稳定的平台上。总体而言, 3D 声呐系统无法实现高效、低成本作业。多波束已成为典型的水下测深系统, 一个扫描扇面内可获得几百个测深点, 具有高密度、高精度等测量优点。一些学者利用多波束测深系统对水下目标进行了测量, 但仅用于发现水下目标, 因其精度受声速和水深影响较大, 获得的点云精度还难以满足水下桩体状态检测的需求; 此外受测量模式影响, 多波束声呐获得的桩体点云仍显稀疏。尽管如此, 多波束测量为水下桩体点云获取提供了一种高精度、低成本、高效的途径, 开展基于多波束的桩体点云获取非常必要。为此,

本文提出了一种利用多波束点云获取水下桩体形状和位置的方法。

## 1 点云分割方法

### 1.1 桩体点云数据聚类

为了剔除异常测深点获取桩体点云, 并提高基于点云数据的桩体形态参数恢复精度, 须对原始多波束测深点云数据进行聚类裁剪和分割。

K 均值聚类算法 (K-means, K-means clustering algorithm) 是一种迭代求解的聚类分析算法, 可以使同一类别中点之间的平均平方距离最小, 因其简单快速而被广泛应用<sup>[11]</sup>。K 均值聚类算法的工作步骤如下:

1) 从点集  $\mathbf{X}$  中随机选择  $k$  个初始中心  $C = \{c_1, \dots, c_k\}$ , 初始中心的个数  $k$  一般是已知的, 即聚类个数。

2) 点集  $\mathbf{X}$  中每个点  $p$  到  $k$  个聚类中心的距离为  $\{p_1, \dots, p_k\}$ , 若  $p_i$  最小, 就将点  $p$  分为  $i$  类。

3) 对于每个分类类别  $i$  (包含  $m_i$  个点), 将  $c_i$  设置为第  $i$  类中所有点的质心, 即:

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_j \quad (1)$$

4) 重复 2) 和 3), 直到  $k$  个聚类中心  $C = \{c_1, \dots, c_k\}$  不再变换。

### 1.2 联合多源约束信息的柱体顶面和侧面点云分割

将柱体点云分割为柱顶面点云和侧面点云, 可为后续顶面形态、侧面形态复原及桩体相对位置确定提供基础数据。多波束实测点云信息包括桩体顶面点云、侧面点云和海底点云, 不同类别点云存在特性差异。其中桩体一般为水泥筑件, 因此顶面及侧面相对泥沙质海床具有较大声阻抗差异, 在回波强度上相对海床而言存在特性差异。桩体高程大于海床高程且桩体顶面法向基本垂直、侧面点云法向基本水平, 因此各类别点云在几何形体上存在特性差异。结合这些特性, 本文提出了顾及联合单元约束信息的点云分割方法。基本数据处理流程如下:

1) 根据桩侧面几何及回波强度特性并考虑打桩位置信息, 可基于高程和强度阈值法从多波束

点云中分割出桩侧面点云。

2) 选取一个合适的阈值区间  $s$ , 将该阈值区间以  $0.01\text{ m}$  的步长在  $z$  坐标步进, 通过比较区间内点云数量的变化, 选取点云数量最大化时区间内的点云作为柱顶面点云。该方法可能会使得柱顶面点云中混入少部分柱侧面点云, 但经实测数据验证, 该情况对柱顶面拟合建模影响不大。实测数据中, 区间  $s$  取为  $0.1\text{ m}$ 。

3) 利用点云的局部法向量信息对分割出的顶面和侧面点云进行滤波。在每个点的邻域范围内构建曲面并计算各点的局部法向量, 根据桩体顶面法向基本垂直、侧面点云法向基本水平的特点, 对分割出的顶面点云、侧面点云滤波, 剔除非顶面和非侧面的点云, 提高桩体点云数量的质量。

实际应用中, 3) 中基于点云法向量的分割也可联合 2) 一起进行。

## 2 基于桩体形态约束的桩体相对位置确定

### 2.1 中心法

在多波束实测过程中, 当测量船从柱体正上方以中央波束扫测柱体时, 获得的点云数据基本在柱顶面上。当桩体顶面具有足够多的点云时, 可采用下式确定圆心坐标:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\leq r^2 \quad (2)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为圆心坐标;  $r$  为圆柱体的半径, 对于水下桩体,  $r$  为已知值。式(2)给出了当圆柱桩体顶面水平时的桩体中心位置确定方法, 若打桩导致桩体倾斜, 利用式(2)得到的桩体顶面中心坐标将不准确。顾及顶面点云的密集特点, 可直接采用均值法计算桩体中心:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \\ z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $(x_0, y_0, z_0)$  为所求圆心坐标;  $(x_i, y_i, z_i)$  为顶面点坐标;  $n$  为顶面点数。

拟合定位须进一步对柱体顶面点云数据进行一定的范围选择, 如设定圆周半径范围、对粗差进行剔除等。对圆的半径进行限定, 可采用如下公式:

$$k < r + k_s \quad (4)$$

式中:  $k$  为点云  $(x_i, y_i, z_i)$  与  $(x_0, y_0, z_0)$  的距离;  $r$  为已知先验柱体半径;  $k_s$  为较小的常数, 与点云测量误差有关。

### 2.2 交点法

中心法是一种简单快捷的桩体相对位置确定方法, 当桩体顶面具备足够多、均匀分布的点云时可以精确确定桩体相对位置, 但当条件不能满足时, 中心法的精度则会受到严重影响。为此, 下面给出一种确定桩体中心的交点法。

交点法是根据桩体侧面点云拟合柱面, 桩体中心轴线与桩体顶面交点即为桩体的中心或桩体的待确定位置。考虑海底圆柱桩的形状特点, 若圆柱轴线  $L$  的方向向量为  $(l, m, n)$ , 轴线上一点  $(x_0, y_0, z_0)$ , 圆柱的半径为  $r$ , 则圆柱桩的方程为:

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2-r^2= [l(x-x_0)+m(y-y_0)+n(z-z_0)]^2 \quad (5)$$

圆柱顶面用平面方程的法线式表示:

$$ax+by+cz+d=0 \quad (6)$$

式中:  $(a, b, c)$  为平面法向量;  $d$  为原点至平面的距离。

圆柱上顶面中心点(圆心)即为圆柱轴线与上顶面的交点, 所求方法如下:

$$\begin{cases} x=x_0+tl \\ y=y_0+tm \\ z=z_0+tn \\ t=(-d-ax_0-by_0-cz_0)/(la+mb+nc) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $t$  为交点在轴线方程中的参数;  $(x, y, z)$  为所求交点坐标, 即待确定的桩体中心坐标或桩体相对位置。

### 2.3 基于 MSAC 的桩体参数的建模优化

交点法中拟合建模获得柱面参数所用的方法

为 M-估计样本一致性算法 (MSAC)<sup>[12]</sup>, 是在 RANSAC(random sample consensus,随机抽样一致) 算法的基础上发展而来。MSAC 算法的基本思想是: 1) 从输入的点云数据集中随机选择一些点计算给定的模型参数, 对数据集中的所有点设置距离阈值, 根据给定的阈值, 如果点到模型的距离在距离阈值范围内, 则将该点归为局内点, 否则为局外点, 逐步扩充内点集; 2) 用内点集中的局内点重新计算模型参数; 3) 进行迭代, 直到迭代次数达到限定值或内点不再变化; 4) 用最终内点数进行数据的拟合和参数求解。

建模中, 考虑到桩体先验几何参数桩体半径, 可在模型的参数中限定柱面半径参数的范围, 获得符合实际情况的桩体参数信息。在 MSAC 算法获得柱面半径参数上加入限制条件:

$$k=r_m-r_0$$

(8)

式中:  $k$  为判定条件参数;  $r_m$  为 MSAC 算法求取的柱面半径;  $r_0$  为已知柱体先验半径参数。

3 桩体相对位置确定的流程

基于多波束点云数据的桩体定位及桩间距确定流程见图 1。

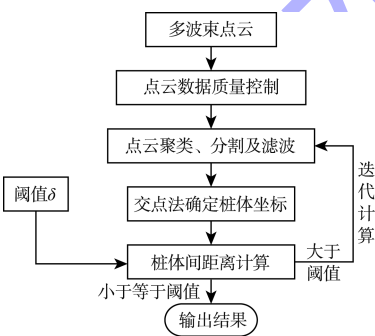


图 1 桩体定位及桩间距确定流程

1) 对多波束测深数据进行处理, 获得多波束测深点云, 并借助 CUBE 滤波, 对多波束点云数据进行质量控制。

2) 利用 K-means 对多波束点云进行聚类, 借助多波束点云的法向量、回波强度和高程信息, 联合实现对桩体的顶面、侧面点云分割, 获取各自的点云。

3) 以圆柱形桩体形状为约束, 借助交点法拟

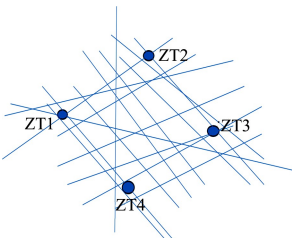
合桩体模型, 确定桩体顶面圆心三维坐标, 即桩体相对位置。

4) 利用 2) 和 3) 确定各个桩体的位置, 进而计算桩体间的 6 个距离(桩体群的 4 条边及 2 条对角线)。

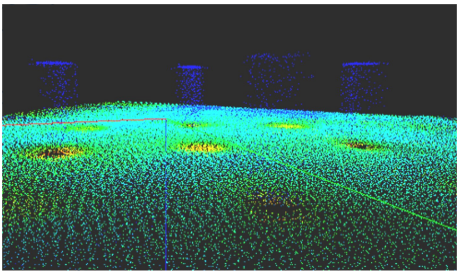
5) 以 3) 中计算的桩体模型为参考, 对 2) 中分割的结果进行点云滤波, 消除异常测深点; 重复 3) 和 4), 直到相邻 2 次计算的桩间距小于给定的阈值参数  $\delta$ (在本文中,  $\delta$  取值 0.01 m)。

4 试验及分析

为检验本文给出的水下桩体点位确定方法的正确性, 在某港口工程开展了多波束点云桩体测量。建设中的港口工程水桩通常为四桩导管架, 打桩后的桩顶高程 -16 m, 相邻桩间距 22 m。测量采用 SONIC2024 多波束系统、光纤罗经、声速剖面仪、表面声速仪和 SPS855 GNSS 接收机。Sonic2024 采用垂直向下的发射模式, 波束扫描角为 120°。考虑实际工况, 为提高测量效率并获取更多的点云, 测线布设为井字形, 同时为获得更多的桩体顶面点云数据还增加了经过桩体顶面的测线。整个四桩导管架的测线布设见图 2。考虑当地的潮汐变化, 测线到桩体的距离一般在 10~15 m。测量过程中采用 GNSS RTK 测量技术进行定位。



a) 多波束测量航迹线



b) 测量所得多波束点云

图 2 测量的四桩导管架及获得的多波束点云



首先采用前面所述的桩体聚类和分割方法对桩体点云分割, 得到每个桩体的点云。以 ZT2 桩体得到的点云为例开展桩体相对位置的确定。图 3 给出了桩体相对位置的确定过程。可以看出, 顶面点云相对较多。

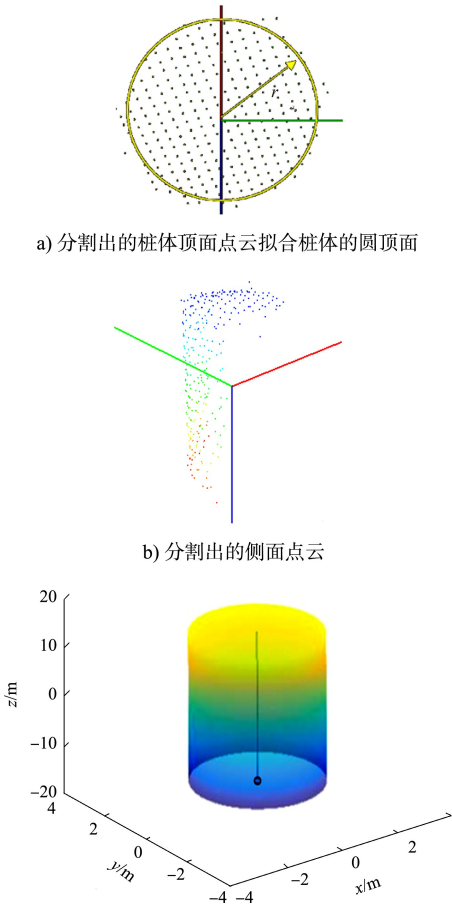


图 3 分割得到 ZT2 的顶面点云和侧面点云

首先根据分割出的桩体顶面点云拟合桩体的圆顶面, 见图 3a), 可以看出拟合得到的圆基本包括了分割出的大部分多波束点云, 只有少量的落在圆周的外侧。分析认为, 落在外侧的点云可能是由于测量误差所致。图 3b) 显示了分割出来的侧面点云, 可以看出约有一半的侧面有点云, 而另一半没有点云, 从图 2a) 可以看出, 能扫测到 ZT2 的测线主要位于该桩体的一侧和上方, 因此顶面点云和桩体的内侧点云相对密集, 而在外侧则无点云。利用桩体的柱状形状和半径为约束, 拟合桩体的中心轴线, 并与桩体的顶面相交, 解算交点坐标, 即得到了该桩体的位置。为了进一步提高解算精度, 采用了迭代计算方法, 即将第

一次拟合得到的圆柱体外侧的点和顶面圆周外侧的点剔除, 再次利用交点法计算得到圆柱中心轴向及中心轴与顶面交点, 见图 3c)。反复多次, 直到得到的桩体相对位置在前后两次迭代计算后得到的结果小于 0.01 m 限差。

对所有的桩体开展类似 ZT2 的计算, 得到 ZT1~ZT4 桩体的位置。

桩体定位的最终目的是为 4 组桩上层安装四边形套件的构件制作服务。为了量化评估桩体定位的精度, 利用各自桩体的定位结果求取桩体间的距离, 与预制构件尺寸比较, 分析桩体的定位精度, 结果见图 4。

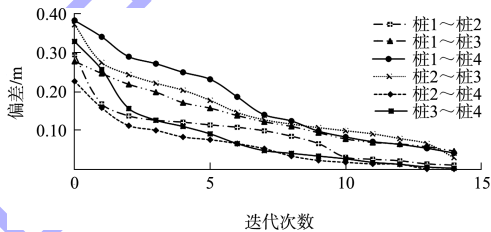


图 4 39 号桩群中桩 1~4 间距离偏差随迭代次数的变化

图 4 给出了迭代次数与桩体间距离精度关系, 可以看出, 在 39 号桩体相对位置的计算中, 随着迭代次数的增加, 桩体 (ZT1、ZT2、ZT3 和 ZT4) 的位置精度均得到提高, 桩体间的 6 条距离精度随之整体提高; 当迭代次数达到 9~10 次后, 桩体的点位精度和桩间距精度基本稳定, 偏差的绝对值均小于 5 cm, 满足了桩体间距离测量的精度要求。以上结果表明, 通过迭代计算可以有效地剔除非桩体顶面点和侧面点, 削弱多波束测点误差对桩体点位确定的影响。

对 38 和 39 号两个桩体组采用以上方法开展桩体定位和桩间距计算, 并与每个桩体群预制四桩体套件结构实际尺寸比较, 偏差见表 1。

表 1 38、39 号桩体组桩间距

桩体组	桩号	柱间距 /m	柱间距偏差 /m
38	桩 1~2	22.019	0.030
	桩 1~3	22.053	0.046
	桩 1~4	30.836	0.041
	桩 2~3	31.058	0.029
	桩 2~4	22.035	0.033
	桩 3~4	21.958	0.047

续表1

桩体组	桩号	柱间距 /m	柱间距偏差 /m
39	桩 1~2	22. 134	0. 050
	桩 1~3	22. 173	0. 046
	桩 1~4	30. 985	0. 040
	桩 2~3	31. 288	0. 048
	桩 2~4	22. 065	0. 048
	桩 3~4	21. 879	0. 049

从表 1 可以看出，两个桩体群的所有桩间距偏差均小于 5 cm，表明基于本文方法确定的桩体点位偏差均小于 5 cm，验证了基于多波束点云确定桩体相对位置的方法的正确性和有效性。

5 结 语

1) 为实现基于多波束点云的水下桩体及桩间距综合确定，首先开展了考虑桩体属性信息、点云法向量和高程等几何信息的桩体点云有效提取，提取结果表明本文方法具有较好的实用性。

2) 基于已提取的点云，本文方法考虑了桩体形态、测量误差，最终实现桩体中心位置确定，从而解决了水下柱桩体及桩体间距离的高精度确定难题，在应用中实现了优于 5 cm 的桩体相对位置和桩间距确定精度。

3) 鉴于试验结果，建议今后在水下桩体测量中采用高精度多波束测深技术，如基于 GNSS RTK 的三维多波束水深测量技术，以获取高质量桩柱点云数据；此外，落在桩体顶面和侧面点云的多少，直接影响着桩体定位的精度，建议在测量桩体时尽量采用围绕桩体的圆走航、低速测量模式，在测量桩体顶面时采用小半径圆走航，而在测量桩体外表面时采用略大的走航半径，以提高数据的有效性。

参考文献：

[1] 王毅.石油勘探中水下高精度定位算法研究[D].东营:

中国石油大学(华东), 2014.

[2] 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) : 710-726.

[3] 方长远, 吕卫清, 欧阳麟桦, 等.基于多系统的浅水区管节沉放对接精密定位方法[J].中国港湾建设, 2013( 2) : 10-14.

[4] ZHAO J H, CHEN X H, ZHANG H M, et al. Localization of an underwater control network based on Quasi-stable adjustment[J]. Sensors, 2018, 18( 4) , 950-968.

[5] 杨凯.中国测绘学科发展蓝皮书 2009 卷纪念中国测绘学会成立 50 周年专集[M].北京: 测绘出版社, 2009.

[6] 刘天云, 李社生.声呐三维成像技术在新型护面块体 ACCROPODETMII安装中的应用[J].水运工程, 2018( 9) : 198-204.

[7] 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.

[8] 吉同元, 李鹏飞, 徐亮.三维成像声呐在重力式码头工程中的应用[J].水运工程, 2018( 5) : 105-108.

[9] 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.

[10] SOHNLEIN G, RUSH S, THOMPSON L. Using manned submersibles to create 3D sonar scans of shipwrecks[C]// Proceedings of IEEE OCEANS. Waikoloa: Marine Technology Society, Oceanic Engineering Society of the Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2011: 1-10.

[11] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-MEANS + +: The advantages of carefull seeding [C]//Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposiumon Discrete algorithms, Society for Industrial and Applied Mathematics. New Orleans: SIAM Activity Group on Discrete Mathematics, SIGACT, the ACM Special Interest Group on Algorithms and Computation Theory, 2007: 1027-1035.

[12] TORR P, ZISSERMAN A. MLESAC: A new robust estimator with application toestimating image geometry[J].Computer vision and image understanding, 2000, 78( 1) : 138-156.

( 本文编辑 武亚庆)