

无人船测深与三维激光扫描的水陆综合地形 测量技术应用——以广西某港区为例

马海伟, 何志敏, 宋鹏, 陈良

(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:针对港区沿岸工程水陆地形特殊复杂,载人测量船无法进入施测,同时部分测区限制无人机作业的情况,本文提供了一种结合无人船测深与三维激光扫描的综合测量方法。该方法在广西港区沿岸工程的实际应用表明,采用测量数据融合控制和点云精拼技术,能安全高效获取全测区高密点云数据,成果精度验证符合作业规范要求,可为其他港区沿岸工程综合施测应用提供参考借鉴。

关键词:海洋测绘;水陆地形;无人船测深;三维激光扫描;精度验证

中图分类号:P229.5

文献标志码:B

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.021

A case study of the application of water and land comprehensive topographic survey technology based on unmanned ship sounding and 3D laser scanning in a port area in Guangxi

MA Haiwei, HE Zhimin, SONG Peng, CHEN Liang

(Guangzhou Hydrographic Center, Southern Navigation Service Center, MOT, Guangzhou 510320, China)

Abstract: The coastal engineering of the port area is special and complex due to the terrain of the water and land. The manned measurement ship was unable to enter the test area and some areas limit the UAV. This paper presents an integrated measurement method that combines unmanned ship sounding with 3D laser scanning. Its practical application in Guangxi Port Area coastal engineering shows that measurement data fusion control and point cloud integration technology can safely and efficiently obtain high-density point cloud data across the entire survey area. The accuracy of the results meets the operational specifications' requirements and can serve as a reference for comprehensive survey technology applications in coastal engineering.

Key words: hydrographic surveying and charting; water and land terrain; unmanned ship sounding; 3D laser scanning; accuracy verification

近年来,随着港口航运的不断发展,港区沿岸工程不断增多,港区沿岸具有水陆相交、部分水域相对封闭、陆上和水下地形复杂等特点,如何高效、精确获取水陆三维点云数据对港区的开发建设尤为重要。港区沿岸地形测量进行水上水下两部分地形的三维点云数据采集,通常水上工程区施测一般采用

实时动态定位技术(RTK)、全站仪和航拍摄影测量等技术手段。近年也有无人机搭载三维激光扫描仪进行施测,但在港区部分重点开发建设区域以及临近机场临空保护区和靠近高速路段区域存在禁飞无人机情况^[1];水下地形的施测,通常使用测量船进行水深数据采集,但在部分地形复杂和施测危险区

收稿日期:2023-11-20

通信作者:马海伟(1989—),男,工程师,研究方向为海洋测绘。E-mail:1158556563@qq.com

引用格式:马海伟,何志敏,宋鹏,等.无人船测深与三维激光扫描的水陆综合地形测量技术应用——以广西某港区为例[J].中国航海,2025,48(2):166-171.

MA H W, HE Z M, SONG P, et al. A case study of the application of water and land comprehensive topographic survey technology based on unmanned ship sounding and 3D laser scanning in a port area in Guangxi[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 166-171. (in Chinese)

存在数据采集困难、作业安全风险高和无法全范围施测等问题。本文讲述了一种无人船测深与三维激光扫描的水陆综合地形测量技术,对提高港区沿岸地形测量的作业效率、扩大覆盖范围、精准获取地形数据等具有借鉴参考意义。

本文基于广西某港区工程实例,介绍小型无人多波束测量平台和地面式三维激光扫描系统的施测优势和技术特点,通过两种技术手段的综合使用,能高效精准地获取地形三维点云数据,实现水陆综合测量和数据融合,并对数据成果质量进行控制,验证其在地形图测绘中的有效性可靠性。

1 小型无人多波束测量技术

随着控制、传感、雷达和无线通信等技术的不断发展进步^[2],无人测量平台应用迅速普及。小型无人艇具有功能丰富多样、机动性能好、操控便捷、使用成本低和作业风险小等特点,适合代替大型有人测量船在港口航道、水文探测和沿海浅滩等区域开展作业^[3],其搭载的多波束测深系统相较于单波束测深仪,可对水下地形进行全覆盖扫测,提供高密度的点云数据,为水下地形精确测量和吹填土方量计算提供可靠依据。

1.1 小型无人多波束测量平台

近年来我国民用无人船艇已广泛应用于水文测绘领域,目前国内主流小型无人多波束测量船艇平台有:珠海云洲 M40 无人船,船长 3.5 m,吃水 0.4 m,可搭载多波束测深仪,侧扫声呐等多种海洋测绘设备;广州南方测绘 SU17 智能测量船,船长 1.6 m,吃水 0.18 m,可搭载国产多波束测深仪进行水下大范围扫测;安徽科微智能 C570 无人测量平台,船长 5.7 m,吃水 0.5 m,常规搭载 SONIC2024 多波束测深仪,适用于沿海水深测量工作。根据广西某港区特性,本案例选用海测 HC06 无人测量船,该无人船尺寸、吃水、搭载设备性能上优势明显:海测 HC06 无人测量船船长 1.8 m,吃水 0.15 m,可在浅水作业区灵活穿梭,平台搭载的多波束测深系统集 NORBIT 小型多波束声呐基阵、APPLIANIX POS MV 高精度惯性导航姿态定位;基于曲面阵列声呐平台,采用了模拟和数字信号处理,曲面阵列声呐技术效果显著,覆盖扫宽可达 210°,有利于提高水下探测的覆盖范围和作业效率。

1.2 作业采集流程

测深作业开始前,根据《工程测量通用规范》(GB 55018-2021)^[4]要求,进行测前平面与高程的比测校验,将全球导航卫星系统(Global Navigation

Satellite System,GNSS)定位天线头置于控制点校准测试,取 60 组定位数据采用海测 DetectPoint 软件比较定位精度,见图 1,经分析其稳定性精度为 ± 0.03 m,离散性精度为 ± 0.02 m,符合规范精度要求。选择高潮时段,通过无人艇沿测区水域圈定可测区域,在测量区域布设 15 m 间隔的测深线;采用 RTK 三维水深测量技术,通过实时的 RTK 高程和水深数据换算求得海底高程;测量测区声速和测深设备入水深度;施测航行偏移控制在 1 m 以内,数据采集软件记录无人船位置及水深并生成航迹水深图。

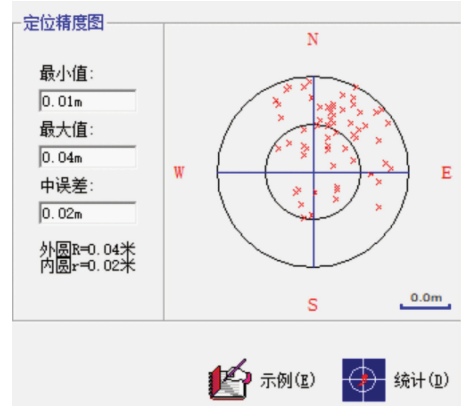


图 1 定位精度

Fig. 1 Positioning accuracy

1.3 测深数据内业处理概述

通过 CarisHIPS&SIPS 多波束软件对无人艇测量数据编辑处理。拟合潮位声速、姿态改正校准、条带断面分析数据并过滤噪点和异常点,导出编辑成果生成水深数据,将数据成果编绘成图^[5]。

2 三维激光扫描技术

陆地三维激光扫描仪采用地面固定站点架设,具有扫测稳定、精度高、目标物点云获取快速密集、全数字技术等特性,可高效高质获取空间三维信息,形成高密度点云数据。基于上述的技术特性,三维激光扫描仪在工程项目建设、地形施测和结构测量等领域应用越来越多,特别是对于工程地质条件比较恶劣、人员施测困难的地方以及要求精细化呈现复杂地物的施测项目,使用三维激光扫描仪可显著提高作业效率、施测安全性和数据处理自动化水平^[6]。

2.1 三维激光扫描系统

目前主流三维激光扫描系统品牌有 Z+F(德国),Riegl(奥地利),徕卡(瑞士)和天宝(美国)等,德国 Z+F 三维激光扫描仪具有防爆性能,用于爆炸威胁危险环境,如化工厂或煤矿场区,精度高,设备沉重,价格较高;奥地利 Riegl 公司有 40 年的脉冲

激光测距设备研发经验,系统适用于长距离扫测,光束密集,精度高,精细化呈现上效果较好;瑞士徕卡 LeicaHDS 三维激光扫描系统适用于中短距离扫测,设备仪器较大,物理性能好(能对抗恶劣天气,如严寒阴雨雾霾等);美国天宝 Trimble 三维激光扫描系统适用于中短距离扫测, GPS 相关功能强大,在导航、精确授时和无线网同步方面优势明显。结合港区地形特点和精细化成果要求,本例选用 Riegl 三维激光扫描系统结合 RTK-GPS 的方法进行测量。Riegl 三维激光扫描系统具备长距离目标物捕获轻松、激光束精准快速密集、操控作业便捷优势,其高达 2 500 m 超高速数据采集能力及广阔的扫描视场角,每秒可生成的激光束达 120 万束,激光发射角向分辨率可达 0.0005° ,可控性好并能分类识别多种目标物,恶劣环境下拥有卓越的扫描探测能力和高效的分析处理技术。该系统可高效便捷捕获全景范围目标并生成立体点云数据,在复杂地形地貌区域完成高难度的作业任务^[7]。

2.2 作业采集流程

结合测区现场地形地貌,按 120 m ~ 150 m 间距均匀布设测站点,站点选取视野开阔位置,系统对中整平并量取系统中心,根据扫描目标和地形环境进行站点和标靶点的安置,设定匹配相关采集参数,开启全景模式对水上地形进行扫描。

2.3 地形内业处理

通过 Riegl PRO 激光点云处理软件对三维激光扫描仪数据进行编辑处理。根据精确定位和系统中心归算对各站点数据初步拼接,通过三维激光扫描仪标靶点坐标 TPL 与定位设备所测坐标进行点与点匹配(粗拼)。而后再使用多站点精拼,锁定基础站点并设置拟合半径、误差递减和拼接参考范围等主要参数,根据误差计算值调整参数直至达到最优结果,检查点云数据,确保相关坡面和特征角无分层错位。根据拟合点计算转换参数,将扫描系统坐标系转换到工程项目坐标系,进行数据拼接。

3 工程应用实例

案例选择广西某港区经济开发区吹填工程,工程区域位于港区扩充区域南端,测区外围长度约 1.6 km,面积约 0.2 km²,当地高低潮差约 2 m。测区范围如图 2 划线边框所示,边框水下部分采用小型无人测量艇搭载多波束测深系统进行施测,水上部分采用地面三维激光扫描仪进行全景扫测。小型无人艇按 1:500 测图比例对该吹填区进行水深测量,三维激光扫描仪沿测区外围按 120 m ~ 150 m 间距均匀布设扫描站点,共架设 11 个测站点(图 2 测

区边框圆点)进行施测,在站点之间明显标识物处安置 10 个标靶点(图 2 测区边框三角点),最后生成高程点数据并计算吹填土方量。图 3 和图 4 是三维激光扫描仪站点拼接前和拼接后的效果图。



图 2 测区

Fig. 2 Survey area

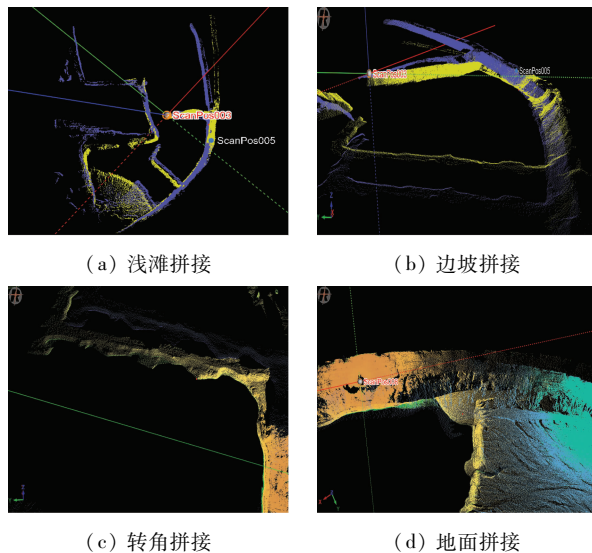


图 3 拼接前效果

Fig. 3 Before splicing effect

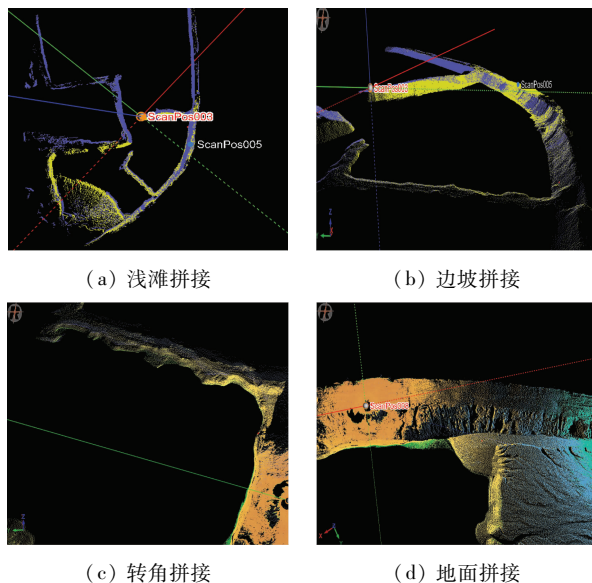


图 4 拼接后效果

Fig. 4 After splicing effect

4 精度验证

对本次采集的数据成果精度进行检查分析,使

用查图软件 PrilnsPoints 对无人艇和三维激光扫描仪测量数据进行内符合、外符合比较,通过对重合点高程差值及所占比例的比较分析,验证数据精度和不同技术成果数据重合度。

4.1 内符合精度验证

4.1.1 主测线检查线比对

在测区布设纵横交错的主测线和检查线,检查线里程按主测线的 5% 布设均匀,纳入比较的主检点位 263 个,经分析误差在 ± 0.3 m 之间的共 251 个,占 95.44%; 误差 $\geq \pm 0.4$ m 有 12 个,占 4.56%,主检比对结果呈正态分布,数据满足《工程测量通用规范》(GB 55018-2021)要求,如图 5 所示。

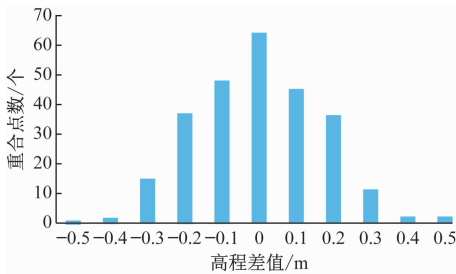


图 5 误差分布

Fig. 5 Distribution of errors

4.1.2 三维激光扫描系统多站数据比较

对不同站点公共区域数据进行比较分析,共选取 4 组相邻站点的重叠数据进行比较,经比较分析不同站点重叠部分数据高程差值在 $-0.2 \sim 0.2$ m 之间的高程点占比在 95% 以上,呈正态分布,结果表明三维激光测站拼接吻合度高,具有较好的一致性,如图 6 所示。

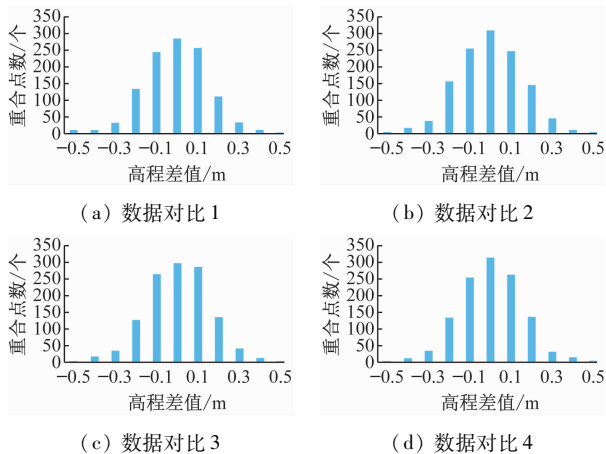


图 6 不同测站数据比对

Fig. 6 Data comparison of different measurement stations

4.2 外符合精度验证

4.2.1 无人艇和三维激光数据比较

测区潮差约 2 m,分别在高潮时进行无人艇测

量,低潮时采用三维激光测量,最大程度保证两种技术手段的测量重叠覆盖区域,然后比较两种技术手段在水陆交接处的重叠数据。以三维激光扫描为主数据,无人艇测量为对比数据,按 0.2 m 进行抽稀比较。本次检查点数合计 534 个,重合点高程差值平均值为 0.12 m,中误差为 0.26 m,其中误差在 ± 0.3 m 之间的共 508 个,占比 95.13%; 误差 $\geq \pm 0.4$ m 有 26 个,占比 4.87%,数据精度符合《工程测量通用规范》(GB 55018-2021)要求,如图 7 所示。

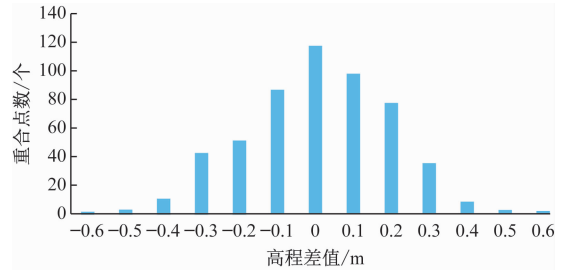


图 7 数据比对

Fig. 7 Data comparison

4.2.2 三维激光扫描仪数据校核

在测区内特征标识位置布设了 10 个检核点并设立标靶,如图 8 测区边框五角星点位所示,检核点的精确坐标通过南方 NTS-A12R10 全站仪获取,与三维激光扫描仪所扫描检核点的三维坐标数据比较,验证激光点云数据的可靠性。表 1 显示两者比较的结果。从表 1 可见,三维激光扫描仪和全站仪所测检核点在平面位置上的位置偏差在 0.004 m ~ 0.024 m 之间,中误差为 0.013 m,检核点的高程差值的绝对值最小在 0.006 m ~ 0.028 m 之间,中误差为 0.018 m。结果表明,三维激光扫描仪的点云数据精度满足《地面三维激光扫描作业技术规程》(CH/Z 3017—2015)三等测量特征点间距中误差 ≤ 50 mm 要求^[8]。

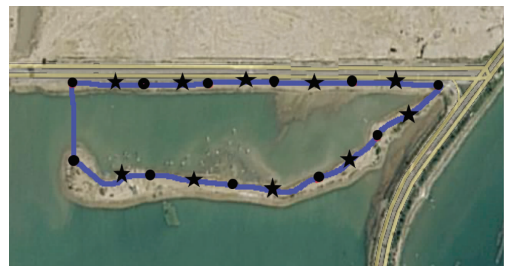


图 8 检核点

Fig. 8 Check point

5 水陆综合测量技术分析

1) 三维激光扫描系统的技术优势。三维激光

表1 数据校验表
Tab.1 Data calibration table

检核点	全站仪读数/m	Riegl 读数/m	差值/m	
1	X	**** 593.386	**** 593.371	0.015
	Y	**** 74.809	**** 74.792	0.017
	Z	13.268	13.245	0.023
2	X	**** 466.183	**** 466.164	0.019
	Y	**** 25.043	**** 25.019	0.024
	Z	12.355	12.326	0.029
3	X	**** 395.657	**** 395.642	0.015
	Y	**** 67.891	**** 67.886	0.005
	Z	16.461	16.453	0.008
4	X	**** 348.626	**** 348.633	-0.007
	Y	**** 18.603	**** 18.594	0.009
	Z	14.902	14.896	0.006
5	X	**** 343.187	**** 343.182	0.005
	Y	**** 87.293	**** 87.286	0.007
	Z	15.384	15.367	0.017
6	X	**** 379.056	**** 379.051	0.004
	Y	**** 13.124	**** 13.114	0.010
	Z	14.906	14.879	0.027
7	X	**** 538.084	**** 538.063	0.021
	Y	**** 15.909	**** 15.885	0.024
	Z	13.905	13.876	0.028
8	X	**** 554.668	**** 554.653	0.015
	Y	**** 77.700	**** 77.685	0.015
	Z	13.962	13.954	0.008
9	X	**** 672.198	**** 672.182	0.016
	Y	**** 43.508	**** 43.487	0.021
	Z	16.389	16.376	0.013
10	X	**** 659.761	**** 659.743	0.018
	Y	**** 35.647	**** 35.635	0.012
	Z	15.869	15.847	0.022

注:数据校验表中坐标读数带“*”部分为隐含数字

扫描技术在三维点云获取上精准高效、数据量密集,可实景重现地物结构,相比其他传统测量手段可减少复杂地形的作业风险。相较于船载激光技术,地面站三维激光扫描仪在测量吹填工程沿海地形上的遮挡较少,通过不同角度架设站点使扫测范围更全面,同时可减少姿态校正和中心归算累积的误差影

响^[9];较无人机航拍摄影,不存在畸变误差,对地形和构筑物成像更细致,同时不存在禁飞区等条件限制。三维激光扫描系统施测应在系统中心量取、设备对中、目标物和环境参数设置、站点拟合拼接计算上把控,减少成果误差源^[10-11]。

2) 小型无人测量平台技术。根据不同作业需求,可开展不同作业,灵活机动易控,减少涉水风险。本例选用便携、吃水浅,能灵活穿梭于吹填浅滩地形复杂水域的船型。无人艇应用受微小碍航物识别,精准避障、远程智能遥控制约,其系统稳定性、精细化雷达识别、自主及时避碰等方面还存在不足,作业场景有限,需优化系统硬件性能和远程控制系统,以提高无人艇自动化智能化水平^[12-13]。

3) 水陆综合测量数据融合。三维激光扫描仪和无人测量艇采用共同定位系统,有效确保数据融合。在本次吹填工程水陆综合测量中,无人艇采用RTK技术,理论可达厘米级精准定位,三维激光扫描仪根据同一套RTK设备进行扫描设备的对中对点及标靶点测量,减少因定位设备和坐标系统不一致导致的误差源。

4) 激光点云精细校准。三维激光扫描仪数据点云通过与测站间的10个标靶点进行粗拼和精拼两次校正,达到三维坐标分米级精度。在点云粗拼和多站数据拟合拼接后,通过全站仪测量标靶点坐标并放入三维激光点云数据,以标靶点为基坐标,对不同测站数据进行校正,达到三维坐标厘米级精度。

5) 数据比较分析及精度控制。港区沿岸工程水陆综合测量通过分析软件并生成数据图表对不同技术内符合、外符合的数据成果精度进行验证,采用不同测量技术在高低潮时段进行测量,以便比较分析数据重叠区域^[14]。

6 结束语

工程实例试验和精度验证成果证明,采用地面三维激光扫描仪结合小型无人艇搭载多波束测深系统综合测量技术在港区沿岸工程上应用,在高效率作业要求同时无人机作业受限场景下,作业安全保障和点云密度优于传统测量技术手段,该综合测量技术优势和方法可有效覆盖测区范围形成三维点云数据,为港航吹填工程建设、后续三维建模、土方量计算提供准确依据。

无人机技术在无禁飞限制区域中的应用高效,无人测量船平台技术也在优化。结合海港工程不同作业场景需求,选用设备搭载平台,形成多场景、多平台的综合探测技术方案是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 廖小罕,黄耀欢,徐晨晨. 面向无人机应用的低空空域资源研究探讨[J]. 地理学报, 2021(11): 2607-2620.
LIAO X H, HUANG Y H, XU C C. Views on the study of low-altitude airspace resources for UAV applications [J]. Acta Geographica Sinica, 2021(11): 2607-2620. (in Chinese)
- [2] 雷添杰,张鹏鹏,胡连兴,等. 无人船遥感系统及其应用[J]. 测绘通报, 2021(2): 82-86.
LEI T J, ZHANG P P, HU L X, et al. Unmanned ship remote sensing system and its application [J]. Surveying and Mapping Notification, 2021(2): 82-86. (in Chinese)
- [3] 狄伟. 无人智能测量艇系统设计与关键技术研究[J]. 中国海事, 2019(7): 52-57.
DI W. Design of unmanned intelligent measuring boat system [J]. China Maritime, 2019(7): 52-57. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB 55018-2021. 工程测量通用规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 7-16.
The State Standards of the People's Republic of China. General code for engineering survey (GB 55018-2021) [J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 7-16. (in Chinese)
- [5] 中国海事局. 沿海港口航道测量技术要求: JT/T 954—2024[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
China Maritime Safety Administration. Technical Requirements for coastal port and waterway survey: JT/T 954—2024 [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2025. (in Chinese)
- [6] 郑贤泽,朱艳军,陶旭. 三维激光扫描技术在地形测量中的应用分析[J]. 城市勘测, 2021(1): 106-109.
ZHENG X Z, ZHU Y J, TAO X. Analysis of the application of 3D laser scanning technology in topographic survey [J]. City Survey, 2021(1): 106-109. (in Chinese)
- [7] 张亚,山锋,王涛. 三维激光扫描技术点云数据采集与配准研究[J]. 地理空间信息, 2021(3): 24-27.
ZHANG Y, SHAN F, WANG T. Study on point cloud data acquisition and registration of 3D laser scanning technology [J]. Geospatial Information, 2021(3): 24-27. (in Chinese)
- [8] 国家测绘地理信息局. 地面三维激光扫描作业技术规范: CH/Z 3017—2015 [S]. 北京: 测绘出版社, 2015: 3-4.
The National Administration of Surveying, Mapping and Geographic Information. Technical specifications for terrestrial three-dimensional laser scanning: CH/Z 3017—2015 [S]. Beijing: Surveying and mapping press, 2015: 3-4. (in Chinese)
- [9] 边志刚,王冬. 船载水上水下一体化综合测量系统技术与应用[J]. 港工技术, 2017(1): 109-112.
BIAN Z G, WANG D. Technology and application of underwater and underwater integrated measurement system [J]. Port Technology, 2017(1): 109-112. (in Chinese)
- [10] 陈俊任,周晓华. 无人船测量系统在水下地形测量中的应用[J]. 测绘技术装备, 2020(4): 65-68.
CHEN J R, ZHOU X H. Application of unmanned ship survey system in underwater topographic survey [J]. Surveying and Mapping Technology Equipment, 2020(4): 65-68. (in Chinese)
- [11] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1509-1516.
YANG B S, LIANG F X, HUAN R G. Research progress, challenges and trends of 3D laser scanning point cloud data processing [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2017, 46(10): 1509-1516. (in Chinese)
- [12] 阚亚雄,卢道华,仲伟波,等. 小型无人艇集成控制系统设计与实验研究[J]. 舰船科学技术, 2016(10): 67-71.
KAN Y X, LU D H, ZHONG W B, et al. Design and experimental study of integrated control system for small unmanned boat [J]. Ship Science and Technology, 2016(10): 67-71. (in Chinese)
- [13] 肖长诗,周杰,陶威,等. 小型无人艇无模型自适应路径跟踪控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021(1): 12-16.
XIAO C S, ZHOU J, TAO W, et al. Small unmanned boat has no model adaptive path tracking control [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2021(1): 12-16. (in Chinese)
- [14] 徐辛超,徐爱功,于丹. 地面三维激光扫描点云拼接影响因素分析[J]. 测绘通报, 2017(2): 14-18.
XU X C, XU A G, YU D. Analysis of factors influencing ground 3D laser scanning point cloud splicing [J]. Surveying and Mapping Notification, 2017(2): 14-18. (in Chinese)