



沿海浅水区地形快速测量方法*

刘亮^{1,2,3}

(1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456;
3. 天津水运工程研究院有限公司, 天津市水运工程测绘技术企业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 在沿海浅水区地形测量中, 传统船载声学水深测量方式存在搁浅触礁风险高、作业效率低以及安全性差等问题, 同时水深遥感反演和双介质摄影测量方式实施过程繁琐且精度不足。采用无人机低空摄影测量技术, 并创新性地融合在航潮位校正模型, 提出一种新的沿海浅水区地形测量方法, 并在实际工程中成功应用。结果表明, 该方法有效避免传统测量方法的风险和限制, 显著提高作业效率和安全性。该方法的在航潮位校正模型较好消除了潮位误差的影响, 提升浅水区水底地形测量的精度。研究成果不仅为沿海浅水区地形测量提供一种新的、高效且精确的方法, 同时也为相关领域的实践应用提供新的技术思路 and 方向。

关键词: 地形测量; 无人机; 双介质摄影测量; 水深反演; 在航潮位校正模型

中图分类号: U612.2; U652.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0227-05

Rapid topographic surveying method in shallow water areas along coastlines

LIU Liang^{1,2,3}

(1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Water Transport Engineering,
Tianjin Water Transport Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: For the topographic surveying in shallow coastal waters, there are some problems of high risk of running aground, low efficiency and poor safety of traditional shipborne acoustic depth measurement methods, and the cumbersome implementation process and insufficient accuracy of remote sensing retrieval of water depth and dual-medium photogrammetry methods. The low-altitude photogrammetry technology of unmanned aerial vehicle (UAV) is adopt to innovatively integrate into the navigation tide level correction model. A new topographic surveying method for shallow coastal waters on the basis of the low-altitude UAV is proposed and successfully applied in practical engineering. The results show that the method avoids the risks and limitations of traditional measurement methods effectively, and improves the working efficiency and safety significantly. The tidal level correction model during navigation in this method can eliminate the influence of tidal level error, and improve the accuracy of bottom topography surveying in shallow water area. The results not only provide a new, efficient and accurate method for the topographic survey of coastal shallow water area, but also provide a new technical idea and direction for the practical application in related fields.

Keywords: topographic surveying; UAV; dual-media photogrammetry; water depth inversion; tidal level correction model during navigation

收稿日期: 2024-10-09

*基金项目: 天津市科技计划项目(23YDPYCG00010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(TKS20210304, TKS20230202); 天津市交通运输科技项目(2024-B07)

作者简介: 刘亮(1989—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事海洋测绘与水运工程测量。

水底地形测量^[1-3]作为对海洋、江河、湖泊等水域环境进行详细了解和精确绘制的关键手段,对于人类开发和利用这些自然资源具有重要意义。特别是在沿海浅水区,水下地形测量不仅是海上工程规划与建设的基础,也是保障海上交通安全和生态环境维护的重要环节。因此,本文旨在探索一种更为高效、安全和精确的沿海浅水区地形测量方法,以解决传统测量方法存在的风险高、效率低和精度不足等问题。

当前,车载声学测量^[4-5]是水底地形测量的主要手段,其中单波束测深仪和多波束测深仪被广泛应用。然而,这些方法在沿海浅水区作业时面临着搁浅触礁等风险,且作业效率低下、安全性难以保障。此外,水深遥感反演^[6-7]和双介质摄影测量^[8-10]也为浅水区地形测量提供新的解决方案,但其操作过程较为繁琐且精度有限,在实际工程中推广应用存在一定的难度。机载 LiDAR 测深技术^[11-12]虽然具有较高的效率和精度,但设备成本高昂且对水的深度和清澈度有一定要求,同样面临着推广难题。

无人机技术具有灵活、快速、低成本等优势,而低空摄影测量技术则可以提供高精度的地形数据。周高伟等^[13]利用低空无人机进行双介质水下礁盘深度测量试验与分析,结果表明无人机航空双介质摄影测量方法可行。本文在其研究的基础上,融合在航潮位校正模型,提出一种新的基于无人机低空摄影测量的沿海浅水区地形测量方法,能够进一步提高测量的精度。

1 基于低空无人机的沿海浅水区地形测量方法

1.1 无人机低空摄影测量

作为一种新型的地形测量方法,无人机低空摄影测量^[14]具有几何精度高、影像分辨率高、操作灵活、成本低等特点,其操作方式灵活多变,受气候和场地影响较小,可快速地获得高分辨率、高精度的“4D”测绘产品^[15]。低空无人机在海岛

礁、水下礁盘以及海岸带地形测量方面已有不少应用^[16-17]。

1.2 折射校正比例常数

双介质摄影测量是一种特殊的摄影测量技术,涉及在不同介质(如空气和水)之间进行摄影测量。它通过在空气和水两种不同折射率的介质中进行摄影,可以获取水底地形的立体像对,进而通过摄影测量学原理进行地形信息的提取。折光问题是双介质摄影测量的关键挑战之一。由于空气和水的折射率不同,光线在两种介质交界处会发生折射,导致图像变形和失真。为了解决这个问题,通常需要采用特定的折射模型和校正方法对图像进行校正,以消除折光引起的误差。

本文引入折射校正比例常数快速消除双介质摄影测量中折光引起的误差,即通过求取若干分布较为均匀的真实水深值与对应位置折光后的水深值之间拟合常数关系,校正深度信息。同时,还需要对测量结果进行必要的验证和校准,以确保测量结果的准确性和可靠性。

1.3 方法步骤

基于低空无人机的沿海浅水区地形测量方法技术路线见图 1。

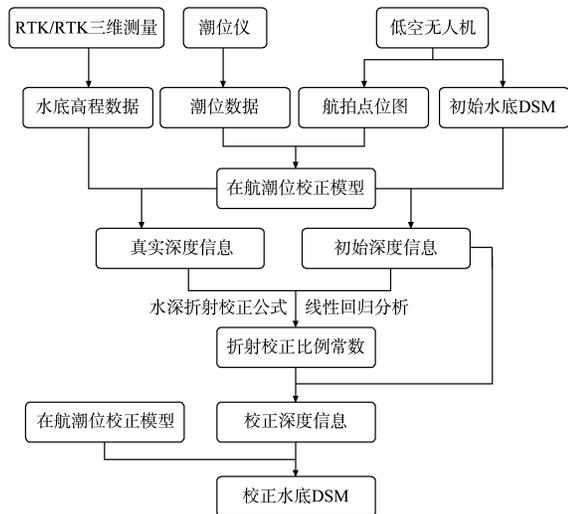


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology route

该方法实施的具体步骤为: 1) 根据测区分布和潮汐特点, 选择与外海自由畅通、水流平稳、设备不易受风浪影响、急流冲击和船只碰撞的位

置布设潮位仪, 在无人机作业前后各 1 h 内连续测量潮位; 2) 利用全球导航卫星系统实时动态载波相位差分技术 (global navigation satellite system real-time kinematic, GNSS RTK) 和 GNSS RTK 三维水深测量方式, 测得少量分散较为均匀的高精度水底地形高程; 3) 设置航线、航高、影像重叠度, 无人机航飞得到影像和定位定向系统 (position and orientation system, POS) 数据, 经航测软件空三解算等, 得到初始的水底数字地表模型 (digital surface model, DSM) 以及航拍点位图; 4) 基于同一时间关系, 将每一个无人机航拍点赋值对应时刻的潮位值, 再通过插值, 得到整个测区的在航潮位模型; 5) 基于同一平面位置关系, 将在航潮位模型中对应位置的潮位值, 减去初始水底 DSM 的高程值, 得到该位置的初始水深值; 6) 基于同一平面位置关系, 将在航潮位模型中对应位置的潮位值, 减去 GNSS RTK 和 GNSS RTK 三维水深测量所测的水底高程, 得到无人机航测时该位置的真实水深值; 7) 真实水深值 $h_{\text{真实}}$ 等于初始水深值 $h_{\text{初始}}$ 与折射校正比例常数 k 之积, 代入若干组对应的 $h_{\text{初始}}$ 和 $h_{\text{真实}}$, 通过线性回归分析, 拟合得到 k ; 8) 利用折射校正比例常数对初始水深值进行校正, 得到校正水深值; 9) 基于同一平面位置关系, 将在航潮位模型中对应位置的潮位值, 减去校正水深值, 经处理生成校正水底 DSM。

2 方法实践与精度分析

2.1 方法实践

利用基于低空无人机的沿海浅水区地形测量方法在海南省昌江某沿海浅水区地形测量项目中进行了实践, 测区位置见图 2, 长约 4 km, 宽约 1.5 km, 测区珊瑚礁石分布较多, 水质较清澈, 水深较浅, 绝大部分区域水深值不超过 3 m, 为典型沿岸浅水区和潮间带区域。采用大疆航测型小型无人机, 根据测量要求, 布设航线, 设置飞行航高、旁向重叠度和航向重叠度, 在测区内布设若干像控点。



图 2 测区位置

Fig. 2 Location of surveying area

无人机航飞前, 选择在高潮时采用 GNSS RTK 三维水深测量、低潮时采用 GNSS RTK 测量, 采集高精度的水底地形高程。根据需要, 将测得的水底地形高程点分为校正点和检查点, 用以校正和统计无人机航测精度。

选择在低潮平潮期对测区进行航拍。同时, 在满足潮位分区控制的要求下, 布设若干潮位仪, 在航测期间进行同步的潮位观测。无人机航测数据采集完后, 利用大疆智图软件快速生成初始水底 DSM。

基于同一时间关系, 将每一个无人机航拍点赋值对应时刻的潮位值, 基于潮位值构建不规则三角网, 再将离散的航拍点潮位插值生成面状的在航潮位模型, 在航潮位模型见图 3。可以看出, 在航潮位模型呈现两端高、中间低的趋势, 与航拍期间的潮位变化规律相符合。在航潮位模型减去初始水底 DSM, 即可得到测区的初始水深值。

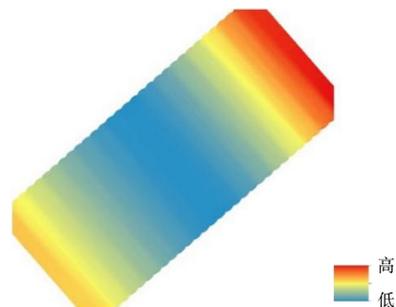


图 3 在航潮位模型

Fig. 3 Tidal level model during navigation

由双介质摄影测量原理可知折射校正前后的水深呈正相关关系。比例系数主要受水体折射率及同名光线入射角等因素影响。本测区范围较小,

水体折射率可视为常数；采用的无人机飞行基高比小，重叠度大，同名光线入射角偏小，整体平差后，各处入射角的影响较为均衡，也可视为常数。可把折射校正公式简化为 $h_{\text{真实}} = kh_{\text{初始}}$ 。拟合得到该测区的折射校正比例常数 k 为 1.371，测区初始水深值乘以折射校正比例常数 k ，得到测区校正水深值，将在航潮位模型减去校正水深值，得到校正水底 DSM。

2.2 精度统计

利用 GNSS RTK 三维水深测量和 GNSS RTK 测量方式，共采集了 724 个检查点，对校正前后水下 DSM 的高程精度进行统计。初始水底 DSM 高程中误差为 ± 0.28 m，其高程误差分布见图 4a)；校正水底 DSM 高程精度中误差为 ± 0.12 m，其高程误差分布见图 4b)。该方法校正后的水底高程精度有显著提升，单从试验结果来看，其明显好于文献[13]的试验结果。

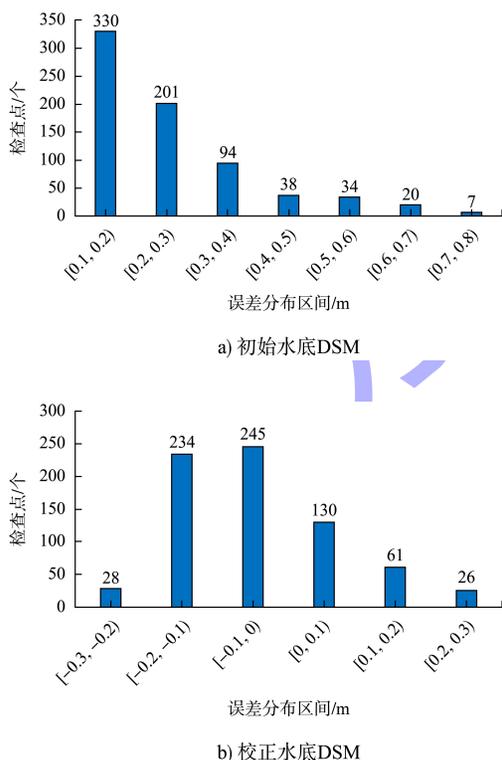


图 4 高程误差分布

Fig. 4 Elevation error distribution

3 结论

1) 本文方法简化水深折射校正公式，使数据处理简单、可行，具有较强的实际工程价值，

为沿海浅水区高精度快速测量提供了一种新的方法。

2) 本文提出的在航潮位校正模型一定程度上消除潮位对于浅水区双介质摄影测量的影响，提高了沿海浅水区地形测量的精度。

3) 本文测区较小，该方法也存在一定局限性，对水的深度和清澈度均有一定要求，浅水区须满足清澈见底，且测区波浪不宜过大。未来，随着低空无人机摄影测量装备和双介质摄影测量算法的改进，可以进一步提高沿海浅水区地形测量的精度和可靠性。

参考文献:

[1] 申家双, 翟国君, 黄辰虎, 等. 海洋测绘学科体系研究(一): 总论[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 1-7.
SHEN J S, ZHAI G J, HUANG C H, et al. Research on discipline system of marine surveying and mapping, part I: general introduction [J]. Hydrographic surveying and charting, 2021, 41(1): 1-7.

[2] 申家双, 翟国君, 陆秀平, 等. 海洋测绘学科体系研究(二): 海洋测量学[J]. 海洋测绘, 2021, 41(2): 1-11.
SHEN J S, ZHAI G J, LU X P, et al. Research on discipline system of marine surveying and mapping, part II: discipline of marine surveying [J]. Hydrographic surveying and charting, 2021, 41(2): 1-11.

[3] 申家双, 葛忠孝, 陈长林. 我国海洋测绘研究进展[J]. 海洋测绘, 2018, 38(4): 1-10, 21.
SHEN J S, GE Z X, CHEN C L. Research progress of China's hydrographic surveying and charting[J]. Hydrographic surveying and charting, 2018, 38(4): 1-10, 21.

[4] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.
ZHAO J H, OUYANG Y Z, WANG AX. Status and development tendency for seafloor terrain measurement technology [J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2017, 46(10): 1786-1794.

[5] 普东东, 欧阳永忠, 马晓宇. 无人船监测与测量技术进展[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 8-12, 16.
PU D D, OUYANG Y Z, MA X Y. Progress in monitoring and measurement technology of unmanned surface vehicles [J]. Hydrographic surveying and charting, 2021, 41(1): 8-12, 16.

- [6] 曹斌, 邱振戈, 曹彬才. 四种遥感浅海水深反演算法的比较[J]. 测绘科学技术学报, 2016, 33(4): 388-393.
CAO B, QIU Z G, CAO B C. Comparison among four inverse algorithms of water depth[J]. Journal of geomatics science and technology, 2016, 33(4): 388-393.
- [7] 徐笑, 陈艳楠, 马振玲. 基于重叠正射影像的浅海水深测量方法[J]. 海洋测绘, 2019, 39(4): 18-21.
XU X, CHEN Y N, MA Z L. A bathymetric extraction approach through refraction and inversion from overlapped orthoimages [J]. Hydrographic surveying and charting, 2019, 39(4): 18-21.
- [8] 曹彬才, 邱振戈, 朱述龙, 等. 双介质摄影测量的折射改正方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(11): 1479-1484.
CAO B C, QIU Z G, ZHU S L, et al. Refraction correction procedure of two-medium photogrammetry [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(11): 1479-1484.
- [9] 杜娟, 曹彬才, 陈世媛. 基于卫星立体双介质的浅海水深测量方法[J]. 现代电子技术, 2019, 42(11): 158-160, 164.
DU J, CAO B C, CHEN S Y. Shallow water bathymetry based on satellite-borne two-media photogrammetry [J]. Modern electronics technique, 2019, 42(11): 158-160, 164.
- [10] 曹斌, 朱述龙, 邱振戈, 等. WorldView-2 影像双介质摄影测量的浅海地形测绘试验[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 745-757.
CAO B, ZHU S L, QIU Z G, et al. Experiments in shallow seafloor surveying using WorldView-2 images and two-media stereophotogrammetry[J]. National remote sensing bulletin, 2018, 22(5): 745-757.
- [11] 秦海明, 王成, 刁晓环, 等. 机载激光雷达测深技术与应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 617-624.
QIN H M, WANG C, XI X H, et al. Development of airborne laser bathymetric technology and applications [J]. Remote sensing technology and application, 2016, 31(4): 617-624.
- [12] 刘智敏, 杨安秀, 阳凡林, 等. 机载 LiDAR 测深在海洋测绘中应用的可行性分析[J]. 海洋测绘, 2018, 38(4): 43-47.
LIU Z M, YANG A X, YANG F L, et al. The feasibility analysis for the airborne LiDAR bathymetry application in marine surveying and charting [J]. Hydrographic surveying and charting, 2018, 38(4): 43-47.
- [13] 周高伟, 李英成, 任延旭, 等. 低空无人机双介质水下礁盘深度测量试验与分析[J]. 测绘学报, 2015(5): 548-554, 562.
ZHOU G W, LI Y C, REN Y X, et al. Research of two-media underwater reefs depth measurement experiment based on low-altitude UAV [J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2015(5): 548-554, 562.
- [14] 王家杰. 无人机低空摄影测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
WANG J J. Research on low-altitude aerial photographic systems based on unmanned aerial vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] 李德仁. 论可量测实景影像的概念与应用: 从 4D 产品到 5D 产品[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 5-7.
LI D R. On concept and application of digital measurable images-from 4D production to 5D production [J]. Science of surveying and mapping, 2007, 32(4): 5-7.
- [16] 郭忠磊, 翟京生, 张靓, 等. 无人机航测系统的海岛礁测绘应用研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 55-57, 61.
GUO Z L, ZHAI J S, ZHANG L, et al. Research on UAV photogrammetric systems in areas of islands and reefs [J]. Hydrographic surveying and charting, 2014, 34(4): 55-57, 61.
- [17] 郭忠磊, 赵俊生, 刘雁春, 等. 无人机的海岸地形航测技术探讨[J]. 海洋测绘, 2010, 30(6): 30-32.
GUO Z L, ZHAO J S, LIU Y C, et al. Research on coast topographic surveying by UAV air photogrammetry [J]. Hydrographic surveying and charting, 2010, 30(6): 30-32.

(本文编辑 王璁)