

基于机载激光技术的浅海水深测绘应用分析

王林振¹, 曹彬才¹, 栾奎峰^{1,2}, 张翔¹, 沈蔚^{1,2}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海市海洋局河口海洋测绘工程中心, 上海 201306)

摘要: 受船载仪器、海况等要素限制, 传统水深测量中浅水区域无法对浅海水深进行测量。为克服此困难, 利用近年来新兴的机载激光测深系统(light detection and ranging system, 简称 LiDAR)进行浅海水深测量。用 LiDAR 获取的点云数据进行处理后得到的水下地形等深线与海图图载水深进行直观对比, 同一坐标点下的点云水深与截图水深进行定量分析。结果表明, LiDAR 获取的水深精度高, 水深点密集, 可更快获得浅海区域详细的高精度的水下地形。这些优点使其在近岸浅海海岸防护、围海造田、港口建设等海洋工程项目中应用前景广阔。此外目前国内 LiDAR 技术主要用于陆地, 应用于浅海水深测绘还很少, 本研究对机载 LiDAR 进行水深测量的研究进行了补充。

关键词: 机载激光测深; 浅海水深测绘; 点云数据处理

中图分类号: TP 701

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)04-0082-06

DOI: 10.11759/hyxx20160906001

目前海道测量及其他海洋工程探测通常是基于船载声呐设备开展的。船载模式使得海洋测量受到了仪器安装方式以及海况和船只速度等因素的制约, 难以进行灵活、快速的大面积测量^[1]。利用光学遥感影像进行水深反演一直以来都是传统水深测图的有效替代手段^[2]。常规的海洋遥感水深反演技术、单波束和多波束测深技术对浅水、岛礁、暗礁和非安全水域的水深测量都存在一些不可克服的缺陷, 因而发展高精度测量浅海、岛礁、暗礁及船只无法安全到达水域的水深测量技术, 对海洋工程建设具有重要的应用价值^[3]。近几年, 机载激光雷达技术的兴起为浅海、岛礁、暗礁等传统手段难以开展的水深测量提供了新的解决方案。机载激光测深系统(light detection and ranging system, 简称 LiDAR)的最初目的主要是获取困难地区的数字高程模型数据。国内外对 LiDAR 在陆地上地形地貌的应用研究很多, Youn 等^[4]利用 LiDAR 点云数据结合高分辨率正射影像提取道路、桥梁等地物; 尹辉增等^[5]利用 LiDAR 点云建立电力线三维模型, 用来检查线路, 建立线路数据库等。Edson 等^[6]、刘丽娟等^[7]利用 LiDAR 对测算树高、树冠、木材含量, 评估森林健康状况以及识别树种等进行了研究。国外利用 LiDAR 对水深测量的研究要比国内多且时间较早。Hartman 等^[8] 10 年间用 LiDAR 获取的大范围、封闭区域的水深, 结果显示区域内均方根误差为 20~30 cm; Kumpumäki 等^[9]用 LiDAR 获得的波形文件进行分析获取海底覆盖物

类型; Mandlbürger 等^[10]采用机载地形和测深雷达获取了 2013 年 4 月—2014 年 10 月包含两次洪水事件的数据, 用于监测地形地貌和河流生境变化; Yamamoto 等^[11]使用 LiDAR 定量分析了地形和水深对海龟在佛罗里达海滩筑巢的影响; Chust 等^[12]在 Basque 海湾测试了测深雷达鹰眼(hawk eye)用于浅水区测水深成图的能力, 虽然在 0.55~1.77 m 范围内精度较差, 但整体可满足成图的需要; Wedding 等^[13]采用测深雷达评估了近岸海底生物栖息地复杂度, 用于监控管理夏威夷礁石区的鱼群。

对滩涂、海岛礁、浅海水深等测绘技术的研究一直是行业内难点和热点, 国内虽然有一些学者研究了基于 LiDAR 的海洋测绘解决方案^[14], 但对 LiDAR 进行浅海水深测量亟需进行研究。本文对 LiDAR 获取的水下点云数据进行了初步的分析和处理, 制作了水下等深线, 并通过海图图载等深线进行直观对比以及精确点位水深的对比, 以此论证

收稿日期: 2016-09-06; 修回日期: 2017-01-03

基金项目: 上海市科委基于国产高分辨率卫星的海洋测绘关键技术研究(14590502200)

[Foundation: Research on Key Technology of Surveying and Mapping based on High Resolution Ocean Satellite of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality, No.14590502200]

作者简介: 王林振(1991-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为机载激光技术在海洋测绘及海洋工程方面的应用, 电话: 021-6190054, E-mail: w746359781@hotmail.com; 沈蔚(1977-), 通信作者, 男, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 研究方向: 海洋测绘与遥感, E-mail: wshen@shou.edu.cn

LiDAR 的应用前景。

1 LiDAR 系统原理简述

LiDAR 进行海洋探测原理如图 1 所示, LiDAR 是在全球差分定位技术、惯性导航技术支持下, 利用机载蓝绿激光发射设备, 发射大功率、窄脉冲激光^[15], 并通过接收设备接收反射回的激光。激光通过激光扫描器和距离传感器, 经微计算机对测量资料进行内部处理, 及后期相应软件处理后, 即可获取被测目标的表面形态和三维坐标数据。在此基础上, 可以进行各种量算或建立立体模型^[1]。它具有探测精度高、效率高、机动性强、测点密度高、测量周期短、覆盖面广、运行成本低、易管理等特点^[16]。

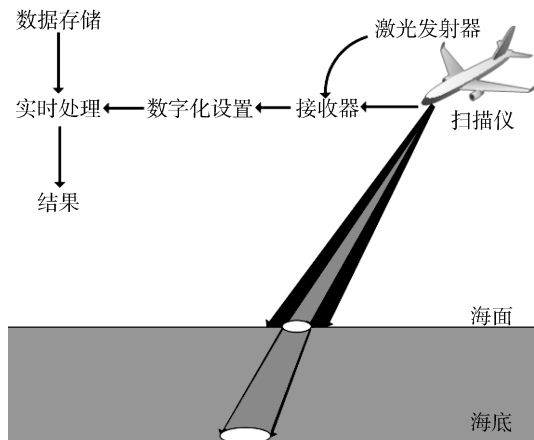


图 1 LiDAR 原理示意图

Fig. 1 Schematic of airborne LiDAR bathymetry system

2 数据获取及处理

本文利用南海某海岛的激光点云数据作为研究对象, 该区域点云平均密度为 $2.7 \text{ 个}/\text{m}^2$, 总激光脚点数量大于 2 000 万个, 其中水下地形脚点 84 万个以上。对点云进行预处理拼接、奇异点剔除、水深点过滤、TIN 的生产、等深线的生成, 其流程图见图 2。

2.1 点云数据的预处理

点云数据的预处理主要是点云拼接、奇异点的删除等工作。LiDAR 系统是一套复杂的系统, 其数据包含系统误差和偶然误差。点云预处理之前需要进行航带系统误差校验, 航带系统误差校验主要表现在不同航带同名点的三维坐标不一致。航带系统误差的检查方法较多, 较为简便有效的方法是依靠 LiDAR 的回波强度信息, 找到岛屿有效特征点, 检查

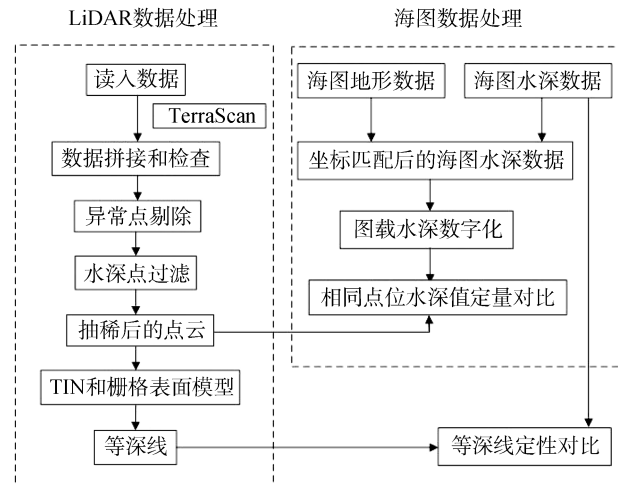


图 2 点云数据处理流程图

Fig. 2 Processing flow of LiDAR data

坐标数据。这项工作可以采用商业软件 TerraSolid 中的 TerraScan 和 TerraMatch 模块完成。TerraMatch 用于调整激光点数据的系统定向误差, 测激光面间或者激光面和已知点间的差别并改正激光点数据。点云处理后对其定向误差进行评估, 航带匹配误差为 0.086 46, 满足航带匹配的精度要求, 航带匹配后的结果如图 3a 所示。

LiDAR 点云数据奇异点产生的原因较多, 很多学者采用滤波等方法去除奇异点。本文采用 TerraScan 中的分类模块(classify low points)进行奇异点剔除, 其机制即在已加载的点云中, 以一定小范围内的高程突变值及其周围点个数进行分类, 参数可以根据实际需要进行设置, 由此循环迭代, 最终滤除所有噪声点, 其结果如图 3 b 所示。

本次实验区域较小, 宽约为 2 km, 长约为 3.5 km, 由于激光测量时没有进行该海域的水位观测, 缺少对应的潮汐数据, 故将距该岛屿 100 m 以外的激光点的平均高程作为测量时刻海面高程。实验区为南海岛礁, 每日潮差约 0.5 m, 对水深测量误差贡献很小。查询历史潮位信息, 取 0.98 m 作为测量时刻海面高程。以此为阈值, 将水下地形点单独分类出来, 结果如图 3c 所示。

将获取的水下水深点云另存为 Excel 文件, 并用获取的潮汐数据对激光点高程值进行改正, 以加载到 ARCGIS 中与海图数据进行对比。

2.2 提取水下地形等深线与水深数据对比

提取水下地形等深线通常首先由高程点生成不规则三角形格网 TIN, 在 TIN 基础上生成等深线, 这

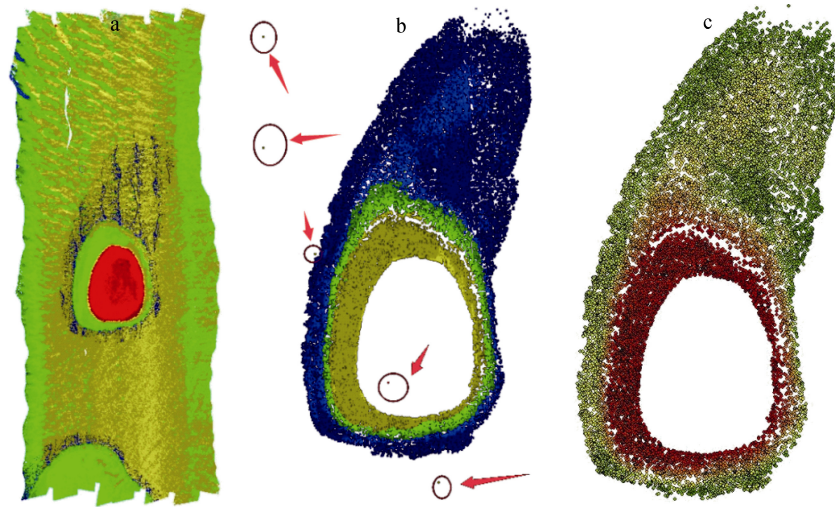


图3 LiDAR数据预处理结果

Fig. 3 Pictures of pre-processing results

a. 实验区 11 条航带点云叠加图; b. LiDAR 点云处理后的异常点(圆圈内); c. 分类水下地形点操作后的结果

a. point cloud result with 11 zone routes; b. unusual point (red circle) after pre-processing LiDAR point cloud; c. result after classifying underwater topography points

种方法生成的等深线的光滑程度很差,锯齿多,存在破碎的线段和独立的多边形^[17]。本文先采用 LiDAR 点云创建 TIN 栅格表面,由栅格表面生成等深线,结果如图 4 a 所示。本文用来比对的水深数据提取自 Navionics 公司的栅格化电子海图,该海图的水深皆为声呐(单波束、多波束)测量获得,满足国际海道测量组织对水深测量的各项规范要求。由于实验区水深均在 30 m 以内,海图等深线间隔为 0.5 m,对海图数据进行地理坐标配准及数字化后,结果如图 4 c 所示。

对比图 4 a 和图 4 c 可以发现,基于点云生成的等深线和 Navionics 海图基本一致。海图图载水深及精确点位水深数据精度,是基于官方海图提取的,海图作为海上航行的安全保障,其水深精度是可靠的。为保证对比的客观性,考虑地形起伏等因素影响,在海图等深线上均匀地提取 188 个水深点,其点位置如图 4 b 所示,将这提取的 188 个水深点与 LiDAR 测得的水深进行比较分析,改正水深与海图水深差值如表 1 所示,相应的误差分布如图 5 所示。

由表 1 和图 5 可以看到,大部分采样点的误差在 $[0, 0.5]$ m,整体的误差趋势较平稳,误差大小不随海图水深的增大而增大,水深在 $[0, 1.7]$ m 误差较大的原因是由于水深较浅,红绿激光入水反射时间较短,造成误差较大。究查水深在 5.5、11.5、13.5 和 14.5 m 差值较大的原因,在查看该区域 Worldview-2 遥感影像后,发现这些区域地形比较复杂,起伏较

大,且海图数据是栅格数据,由于在一些小范围内地形起伏过大,在其上拾取采样点时也存在一定的误差,导致一些误差较大的点出现。

均方根误差(root mean square error, RMSE)用来衡量观测值同真值之间的偏差,采用均方根误差其精度进行定量评估,结果为 0.193 4。由均方根误差结果可知, LiDAR 获取的水深点与海图水深值误差较小, LiDAR 获取的水深激光点精度较高。

3 结论

水深测量方法在浅海潮间带、礁石区等受到潮水、礁石等自然条件的限制,往往测量难以进行。LiDAR 测量水深是陆海测绘的一种先进技术,解决了浅海的潮间带、礁石区的水深测量困难。本文使用 LiDAR 获取的水下点云生成等深线与相应区域的海图和遥感图像进行直观对比,对部分等深线重叠区进行绝对水深对比,结果表明,具有蓝绿波段的 LiDAR 可进行浅海水深测量,能够应用在浅海、岛礁、暗礁及船只无法安全到达水域的水深测量,此外 LiDAR 水深测量点更加密集且精度较高,可获得浅海区域更详细的地形信息,为海岸防护、围海造田、港口建设等提供更加精确的基础数据支撑,其应用前景广阔。

文章的不足之处在于测量时没有进行水位观测,潮位数据采用的是距离岛屿的 100 m 以外的点的平均高程作为测量时刻平均海面,虽实验区潮差较小

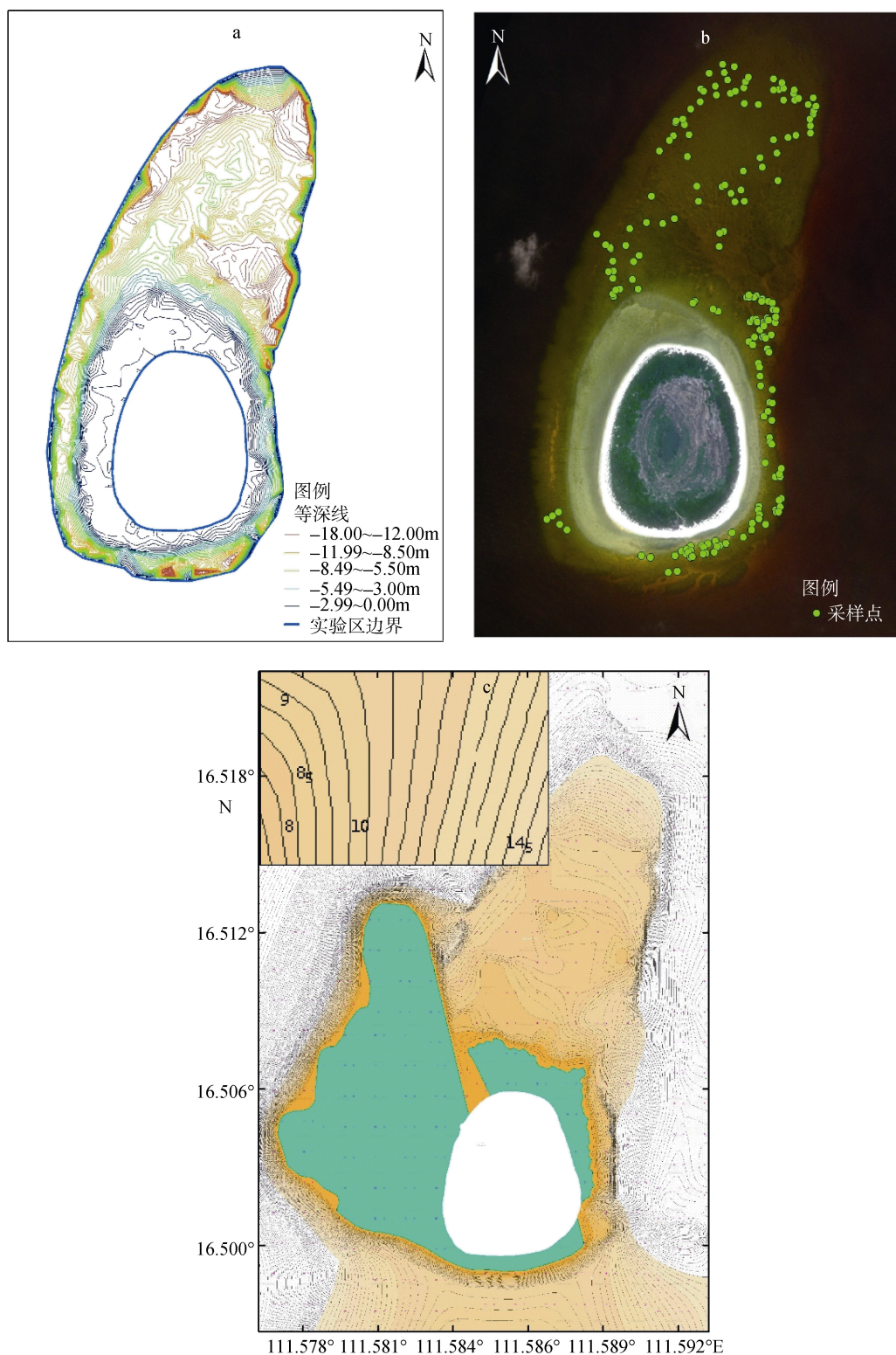


图 4 水下地形等深线提取结果、精度验证所需的采样点位置及实验区海图

Fig. 4 Picture of underwater terrain contours extraction results, sampling point for verifying accuracy, and chart of testing zone

a. 为基于 LiDAR 点云生成的间隔为 0.5 m 的水下地形等深线; b. 实验区域遥感图像及选取的采样点位置; c. 为所选实验区 Navionics 提供的声呐(等深线)海图数据

a. underwater terrain contours with 0.5 m intervals generated by LiDAR point cloud; b. remote sensing image of testing zone with sampling point; c. zone contours of mapping data provided by Navionics

表 1 部分海图采样点坐标值及相应点位点云测深值

Tab. 1 Some sample mapping point values and corresponding point values in LiDAR point cloud

序号	$X(m)$	$Y(m)$	$Z(m)$	$H_{改}(m)$	$H_{图}(m)$	ΔH
0	562080.46	1824616.04	-5.57	-4.59	-4.5	0.09
1	562053.8	1824638.65	-7.31	-6.33	-6	0.33
2	562050.43	1824684.94	-7.69	-6.71	-6	0.71
3	562026.51	1824670.35	-9.05	-8.07	-7.5	0.57
4	562004.45	1824656.93	-7.68	-6.7	-7	0.3
5	562636.91	1824530.85	-4.6	-3.62	-4	0.38
6	562640.38	1824531.47	-4.54	-3.56	-4	0.44
7	562651.13	1824553.6	-2.93	-1.95	-2	0.05
8	562661.7	1824557.65	-2.79	-1.81	-1.5	0.31
9	562684.4	1824566.16	-2.36	-1.38	-1.5	0.12
10	562643.91	1824575.23	-1.11	-0.13	-1	0.87
11	562653.79	1825446.16	-3.02	-2.04	-1.5	0.54
12	562717.28	1825863.03	-9.51	-8.53	-8	0.53
13	562702.43	1825895.46	-10.34	-9.36	-9	0.36
14	562668.18	1825919.2	-9.95	-8.97	-9	0.03
15	562741.25	1825907.86	-9.49	-8.51	-8	0.51
.....						

注: X, Y, Z 分别表示采样点 X 方向、 Y 方向和 Z 方向的坐标值, $H_{改}$ 表示改正水深, $H_{图}$ 表示海图水深, ΔH 表示改正水深与海图水深差值的绝对值

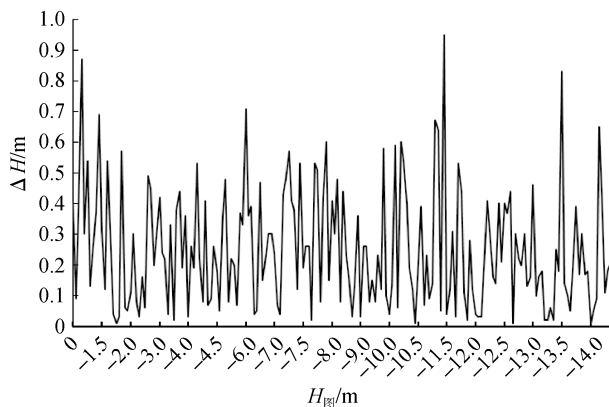


图 5 采样点水深值误差统计图

Fig. 5 Statistical graph of sampling depth value errors

(1 m 左右), 潮汐数据对结果影响较小但仍是一个关键误差因素。海图数据是栅格数据, 在一些小范围内地形起伏过大, 在其上拾取采样点时也存在一定的误差, 导致一些误差较大的点出现。下一步将利用机载 LiDAR 数据与现场实测的水深数据进行对比, 进一步验证机载 LiDAR 测深的精度。

参考文献:

- [1] 叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
Ye Xiusong. Research on principle and data processing

methods of airborne laser bathymetric technique[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010.

- [2] 梁建, 张杰, 马毅. 控制点与检查点数量和比例对水深遥感反演精度的影响分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 15-19.
Liang Jian, Zhang Jie, Ma Yi. Analysis of the influence of the amount and proportion of control points and check points on the accuracy of bathymetry remote sensing inversion[J]. Marine Sciences, 2015, 39(2): 15-19.
- [3] Gens R. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(7): 1819-1836.
- [4] Youn J, Bethel J S, Mikhail E M, et al. Extracting urban road networks from high-resolution true orthoimage and Lidar[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(2): 227-237.
- [5] 尹辉增, 孙轩, 聂振钢. 基于机载激光点云数据的电力线自动提取算法[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 31-34.
Yi Huizeng, Sun Xuan, Nie Zhengang. An automated extraction algorithm of power lines based on airborne laser scanning data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(2): 31-34.
- [6] Edson C, Wing M G. Airborne Light Detection and Ranging (LiDAR) for individual tree stem location, height, and biomass measurements[J]. Remote Sensing, 2011, 3(11): 2494-2528.
- [7] 刘丽娟, 庞勇, 范文义, 等. 机载 LiDAR 和高光谱融合实现温带天然林树种识别[J]. 遥感学报, 2013,

- 17(3): 679-695.
- Liu Lijuan, Pang Yong, Fan Wenyi, et al. Fused airborne LiDAR and hyperspectral data for tree species identification in a natural temperate forest[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 679-695.
- [8] Hartman M, Kennedy A B. Depth of closure over large regions using airborne bathymetric LiDAR[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 52-63.
- [9] Kumpumäki T, Ruusuvaori P, Kangasniemi V, et al. Data-Driven approach to benthic cover type classification using bathymetric LiDAR waveform analysis[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13390-13409.
- [10] Mandlbürger G, Hauer C, Wieser M, et al. Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river Morphodynamics and In-stream Habitats—A case study at the Pielach River[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 6160-6195.
- [11] Yamamoto K H, Powell R L, Anderson S, et al. Using LiDAR to quantify topographic and bathymetric details for sea turtle nesting beaches in Florida[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125(4): 125-133.
- [12] Chust G, Grande M, Galparsoro I, et al. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2010, 89(3): 200-213.
- [13] Wedding L M, Friedlander A M, Mcgranaghan M, et al. Using bathymetric LiDAR to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4159-4165.
- [14] 杜国庆, 史照良, 龚越新, 等. LIDAR 技术在江苏沿海滩涂测绘中的应用研究[J]. *城市勘测*, 2007, 5: 23-26.
- Du Guoqing, Shi Zhaoliang, Gong Yuexin, et al. Research on application of LIDAR in mapping of Jiangsu tidal zone[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007, 5: 23-26.
- [15] 隋立春, 张宝印. Lidar 遥感基本原理及其发展[J]. *测绘科学技术学报*, 2006, 23(2): 127-129.
- Sui Lichun, Zhang Baoyin. Principle and tend of airborne laser scanning remote sensing[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(2): 127-129.
- [16] 陈坚, 金翔龙. 机载激光测深技术进展及应用[J]. *海洋通报*, 2002, 21(6): 75-82.
- Chen Jian, Jin Xianglong. Progress in the research of iron limitation to marine phytoplankton[J]. *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(6): 75-82.
- [17] 于彩霞, 许军, 许坚, 等. 一种从 LiDAR 点云中提取海岸线的新方法[J]. *测绘通报*, 2015, 5: 66-68.
- Yu Caixia, Xu Jun, Xu Jian, et al. A new method of extracting coastlines from LiDAR point clouds[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015, 5: 66-68.

Analysis of shallow-sea bathymetric mapping based on airborne LiDAR

WANG Lin-zhen¹, CAO Bin-cai¹, LUAN Kui-feng^{1, 2}, ZHANG Xiang¹, SHEN Wei^{1, 2}

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Estuarine and Oceanographic Mapping Engineering Research Center of Shanghai Municipal Ocean Bureau, Shanghai 201306, China)

Received: Sept. 6, 2016

Key words: airborne LiDAR bathymetry; shallow-sea bathymetric mapping; point clouds data processing

Abstract: Current bathymetry techniques are mainly dominated by onboard multibeam and single-beam technologies. But for shallow bathymetry, these methods cannot operate normally due to instrument and sea condition limitations. Today, modern light detection and ranging (LiDAR) remote sensing can overcome these limitations to facilitate quicker and more precise sea data collection. The big advantage of LiDAR in surveying and mapping is its blue and green bands of permeability for measuring depth. In China, LiDAR is primarily used on land and less so for sea bathymetry and topographic maps. In this paper, we demonstrate the applicability of LiDAR for bathymetry measurement. We introduce the principle of airborne laser bathymetry and extract contours using LiDAR. By comparing the relative and absolute accuracies of sea charts and cloud point contours, we confirm that the precision of LiDAR is high and that it has broad application prospects.

(本文编辑: 刘珊珊)