

机载激光测深系统与船载移动测量系统数据配准方法研究

田茂义^{1**}, 王延存¹, 俞家勇^{1*}, 贺岩², 曹岳飞^{1,3}, 吕德亮⁴, 胡善江²,
杨忠⁵, 朱霞⁵, 石先高⁵

¹ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

² 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

³ 青岛秀山移动测量有限公司, 山东 青岛 266590; ⁴ 杭州中科天维科技有限公司, 浙江 杭州 310016;

⁵ 中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310

摘要 机载激光测深系统能够快速、高效地测量浅海、岛礁、暗礁及船只无法安全到达的水域, 能够提供近岸全覆盖 50 m 水深测量; 船载移动测量系统可以获得近岸浅海水底地形数据及近岸岛礁精细三维激光点云, 二者数据在测量区域以及测量范围上具有一定的互补性。文中采用一种基于曲率特征点的改进迭代最近点(ICP)算法, 将国产机载测深系统和船载移动测量系统获取的机载激光测深数据、多波束数据、三维激光扫描数据进行配准融合。结果表明, 通过将二者数据进行配准融合, 可以实现陆地、浅海区域海陆地形的全面精准描述、海陆基准统一, 有助于海岛礁地形地貌认识、水下目标物探测及发现等。

关键词 数据配准; 曲率特征点; ICP 算法; 机载激光测深系统; 船载移动测量系统

中图分类号 P229.1; TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082802

Study on the Data Registration Method of Airborne Bathymetric LiDAR System and Ship-Based Mobile Measurement System

Tian Maoyi^{1**}, Wang Yancun¹, Yu Jiayong^{1*}, He Yan², Cao Yuefei^{1,3}, Lü Deliang⁴,
Hu Shanjiang², Yang Zhong⁵, Zhu Xia⁵, Shi Xiangao⁵

¹ College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

² Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Qingdao Xiushan Mobile Measurement Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266590, China;

⁴ Hangzhou Tianwei Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310016, China;

⁵ South China Sea Airborne Detachment of China Marine Surveillance, Guangzhou, Guangdong 510310, China

Abstract Efficiently and quickly measuring shallow waters, islands, reefs, ledges and unreachable waters for ships, an airborne bathymetric LiDAR system is able to measure deep to 50 meters, covering the entire inshore region, while the ship-based mobile measurement system is capable of obtaining topographic data of the ocean floor in inshore shallow sea and fine 3D laser point cloud of islands and reefs. These systems have some complementarity in the area and range of measurement. In this paper, an improved iterative closest point (ICP) algorithm based on feature points of curvature is applied to conduct registration and fusion of airborne bathymetric data, multi-beam data and 3D laser scanning data obtained from the domestic airborne bathymetric LiDAR system and the ship-based mobile measurement system, as well as comprehensively and accurately describe the terrain of both coastal waters and inshore areas for a unified criterion. The results show that the registration data from the airborne bathymetric LiDAR system and the ship-based mobile measurement system can be of great significance in comprehending the

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)

* E-mail: yujiayongskd@163.com; ** E-mail: tianmaoyi_zhy@126.com

topography of islands and reefs, as well as detecting and discovering underwater targets.

Key words data registration; curvature feature point; ICP algorithm; airborne bathymetric LiDAR system; ship-based mobile measurement system

OCIS codes 100.2000; 150.1135; 280.1355

1 引言

随着声呐技术、激光技术和微波遥感技术的发展,海底地形数据的获取手段更加多样化。现代海底地形测量方式呈现出多元化发展的趋势,目前主要包括:船载移动测量、机载激光测深、基于潜航器或深拖系统测深、基于星基遥感图像海底地形反演^[1]。其中机载激光测深技术^[2-8]和船载移动测量技术^[9-11]发展较为成熟,应用较广泛。

机载激光测深系统包括激光扫描仪、POS系统、相机等传感器,通过蓝绿激光进行近岸、海底地形测量,在潮间带等浅水区域应用广泛,可以快速提供全覆盖海底地形数据。但是机载激光测深系统的测量结果受水质影响较大,激光脚点密度较小,不能最大程度还原真实海底地形,且数据获取成本较高。船载移动测量系统集成了三维激光扫描仪、多波束测深仪、POS系统等传感器,可以快速获取高精度、高密度的水下地形数据和近岸三维激光点云,在浑浊的海水条件下依然可以通过多波束测深仪获得高精度海底地形数据,使用成本相对较低,但受载体船只吃水以及暗礁等船只到达困难的环境限制,在潮间带等复杂海况区域较难获得海底地形数据。机载激光测深系统和船载移动测量系统各有优势,在测量范围和测量区域上具有一定的互补性,将二者数据融合可以实现优势互补,有效填补国内某些传统测量无法到达区域的数据空白。

对于机载激光测深系统和船载移动测量系统数据配准融合的研究,在国外已有一定的历史。Costa等^[12]利用机载激光雷达数据和船载多波束声呐数据通过 ArcGIS9.2, JMP 和 S-Plus 等软件分析了浅海珊瑚礁系统中的生态问题和地质成分; Gall 等^[13]利用高分辨率雷达数据和测深仪数据对法国西部布列塔尼地区岛屿进行分析,确定了华力西期走滑构造在该地区地貌形成过程中的重要作用; Kennedy 等^[14]利用海陆两用激光雷达系统和多波束系统通过 ArcGIS10.1 对海岸进行空间分析,获取海水对于海岸花岗岩的侵蚀作用情况; Schmauder 等^[15]利用多波束声呐数据、机载激光测深数据和高分辨率地震啁啾影像对美国塔霍湖的地震断层进行了分析,并建立模型以预测未来地震震级和地震的伴生灾

害。国外的已有文献为机载激光测深数据和船载移动测量数据配准融合的应用提供了一定的参考,本文采用基于曲率特征点的改进迭代最近点(ICP)算法^[16-24],将国产机载测深系统和船载移动测量系统获取的机载激光测深数据、多波束数据、三维激光扫描数据进行配准融合,实现海岛礁周边、海岸带、航道及滨海等复杂地区地理信息全面、定量的描述。

2 数据来源

2.1 机载激光测深数据

本文机载测深数据由中国科学院上海光学精密机械研究所自主研发的机载双频激光雷达系统获取,系统分为6个功能子系统:陆地测绘激光雷达系统、海洋测绘激光雷达系统、位置和姿态获取系统、飞行管理系统、航空摄影系统和数据后处理系统。采用单点扫描和脉冲时间飞行测距技术,实现对陆地和海洋的三维量测。从功能上可分为陆地模式、海洋模式和海陆联测模式,充分考虑了实际应用中的各种使用条件。海洋模块单独使用时,采用532 nm 波长激光、卵型扫描方式进行近岸水下地形测量,联合全球定位系统(GPS)和惯性测量单元(IMU)进行定姿定位,最终获取完整的海底地形数据。机载双频激光雷达系统海洋模块性能指标如表1所示。

表1 机载双频激光雷达系统海洋模块性能指标

Table 1 Performance index of ocean module for airborne dual frequency LiDAR system

Index	Parameter
Flight speed / (km·h ⁻¹)	150-220
Flight altitude / m	300-1100
Coverage angle / (°)	±15
Laser wavelength / nm	532
Scanning mode	Ovoid scan
Density of point cloud / (point·m ⁻²)	0.03-0.48
Plane positioning accuracy / m	0.105-3.129
Elevation positioning accuracy / m	0.049-5.684

2.2 船载移动测量数据

本文使用的近岸地形以及水下地形数据由青岛秀山移动测量有限公司自主研发的 VSurs-W 型船载多传感器水上水下一体化测量系统获取, VSurs-W 系统主要包括三维激光扫描仪、多波束测深仪、POS、工业相机等传感器及数据检查、解析系统、数

据预处理系统、点云处理系统、地形图成图系统等软件系统,该系统具有激光扫描仪、惯导平台和多波束

测深仪坐标系统统一、水岸线上下点云无缝拼接的特点。系统部分传感器参数指标如表 2 所示。

表 2 VSurs-W 传感器参数指标

Table 2 Parameter index of sensor of VSurs-W

Sensor	Parameter	Value
3-D laser scanner (Riegl VZ1000)	Distance /m	$\geq 2.5, \leq 700$ (reflectivity>20%)
	Range /($^{\circ}$)	100
	Precision /m	≤ 0.005 (<150 m)
	Angular resolution /($^{\circ}$)	0.0005
	Sounding resolution /m	0.0125
Multibeam echosounder (R2Sonic 2024)	Beam angle /[($^{\circ}$) \times ($^{\circ}$)]	$0.5\times 1@400$ kHz, $1\times 2@200$ kHz
	Width /($^{\circ}$)	10-160
	Wave number	256
	Maximum sounding /m	500
	Emission frequency /Hz	60
POS	Plane positioning accuracy /m	0.008
	Elevation positioning accuracy /m	0.015

3 基于曲率特征点的改进 ICP 算法

经典 ICP 算法的核心是点集 A 中任一点 P_i ($i=1,2,\dots,n$),在目标点集 B 中寻找找到 P_i 点的距离最近点 Q_j ($j=1,2,\dots,m$),根据对应点对计算刚体变换参数,并重复迭代这一过程,直至所有点都满足精度要求。ICP 算法本质上是基于最小二乘的最优配准方法,该配准方法广泛应用于点云拼接、影像匹配中。但由于本文使用的船载移动测量数据和机载激光测深数据的数据密度不同,二者很难有同名点,针对这一情况,本文采用基于曲率特征点的改进 ICP 算法进行数据配准。

3.1 选取曲率特征点集

在三维空间中,可以使用法向量和曲率来描述物体的表面几何特征。如果曲率比较大,表明该区域地形起伏较大;如果曲率较小,表明该区域地形较平坦。因此,可以选择曲率较大的区域作为配准的特征点。在海底地形中,任一局部区域都可以近似看作一个二次曲面。但由于定位结果受水质、杂物等环境因素影响,数据会出现一些噪点。本文在进行二次曲面拟合局部海底地形时,加入随机抽样一致(RANSAC)算子,以消除噪点的影响。最后利用曲率极值法来提取曲率特征点,选取曲率特征点集流程如图 1 所示。

① 任选一点作为种子点,取该种子点的 K 邻域($K=25$),并统计邻域内数据点个数,根据(1)式计算迭代次数 k_{RAN} 。

$$k_{\text{RAN}} = \frac{\lg(1-P)}{\lg[1-(1-\epsilon)^m]}, \quad (1)$$

式中: ϵ 为数据错误率,表示局外点与总数据量之比; P 为在一定的置信概率下,其基本子集最小抽样数 M 与至少取得一个良性取样子集的概率; m 为拟合二次曲面所需最少点数,在本文中 $m=6$ 。其中 ϵ 和 P 都是在实际应用中根据具体情况计算出的, P 满足 $P=1-[1-(1-\epsilon)^m]^M$ 。

② 任意一点的坐标都可以表示为 $Z=Z(X,Y)$ 形式,则二次曲面可以表示为

$$f(Z) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2, \quad (2)$$

在所选取的邻域内,随机抽取 m 个点,计算 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 的初始参数。

③ 根据初始参数,将邻域内所有点代入(2)式中,计算各点到拟合曲面的距离 d_i ,并根据 $\sigma_{d_i} =$

$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n d_i^2}$ 计算各点到拟合曲面的距离均方差,用 $2\sigma_{d_i}$ 作为判定各点是否为噪点的阈值,若 d_i 大于阈值,则认为该点是噪点;若 d_i 小于阈值,则认为该点为局内点,并保留。

④ 重复步骤②和步骤③ k_{RAN} 次,寻找最大局内点,并根据最大局内点计算二次曲面的最优参数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 。

⑤ 根据计算出来的最优参数,计算一阶方向矢量 f_x, f_y ,和二阶方向矢量 f_{xx}, f_{yy}, f_{xy} ,并根据(3)~(5)式计算二次曲面的法向量 n 、第一基本量 E, F, G 和第二基本量 L, M, N 。

$$n = \frac{f_x \times f_y}{|f_x \times f_y|}, \quad (3)$$

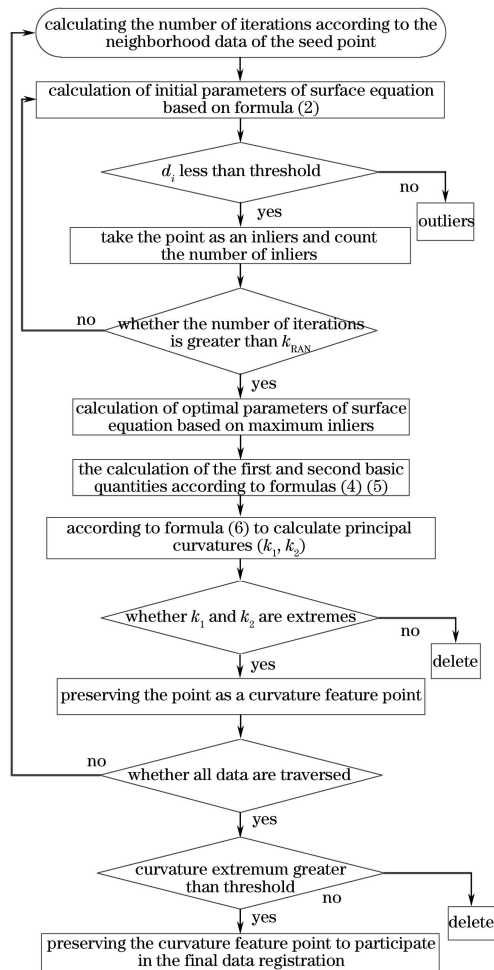


图1 选取曲率特征点集

Fig. 1 Select the set of curvature feature points

$$\begin{cases} E = f_x \cdot f_x \\ F = f_x \cdot f_y, \\ G = f_y \cdot f_y \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L = f_{xx} \cdot n \\ M = f_{xy} \cdot n \\ N = f_{yy} \cdot n \end{cases} \quad (5)$$

⑥ 利用得到的第一基本量和第二基本量计算该种子点在两个主方向上的主曲率 k_1, k_2 。

$$\left\{ \begin{aligned} k_1 &= \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} - \sqrt{\frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} - \frac{LN - M^2}{EG - F^2}} \\ &= \frac{A - \sqrt{A - B}}{A + \sqrt{A - B}} \\ k_2 &= \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} + \sqrt{\frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)} - \frac{LN - M^2}{EG - F^2}} \\ &= \frac{A + \sqrt{A - B}}{A - \sqrt{A - B}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\text{式中 } A = \frac{EN - 2FM + GL}{2(EG - F^2)}, B = \frac{LN - M^2}{EG - F^2}。$$

⑦ 判断 k_1, k_2 是否为对应主方向上的极值,如果是,则该点作为曲率特征点保留,再进行下一个种子点的判断。重复步骤①~⑦,直到遍历完所有的数据。

⑧ 得到的曲率极值越大,说明此区域地形起伏越大,作为特征点效果越明显。因此,计算完所有特征点后,设定一个阈值 ε_k ,若曲率极值大于该阈值,则保留作为最终进行配准的曲率特征点;若小于该阈值,则删除该曲率特征点。

3.2 基于曲率特征点的改进 ICP 算法

机载激光测深系统数据点密度远小于船载多波束测深数据,船载移动测量数据细节描述更完整,因此,以船载移动测量数据为基准,利用 3.1 节计算出的曲率特征点,计算船载移动测量数据和机载激光测深数据的配准参数。由于二者数据坐标系统一,所用控制点等级相同,直接可以进行精配准,完整计算流程如图 2 所示。

(1) 取船载移动测量数据任一点,利用结合 RANSAC 算子的二次曲面法对其 K 邻域进行曲面拟合。

(2) 根据(6)式计算该点主曲率 k_1, k_2 ,并判断是否为曲率极值点,遍历所有船载移动测量数据,并删除小于阈值 ε_k 的曲率特征点,得到基准点集 O 。

(3) 根据步骤①和步骤②计算机载激光测深数据的曲率特征点,得到待配准点集 O' 。

(4) 根据距离最近原则,从 O 中寻找 O' 对应点对。

(5) 根据对应点对计算 O 和 O' 的配准参数和配准均方差 σ ,并更新步骤④中的对应点对。其中配准参数包括 1 个缩放参数,3 个旋转参数和 3 个平移参数。根据经过配准后的点集 O' 和 O ,计算对应点对之间的距离 Δd_i ,利用公式 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \Delta d_i^2}$ 获得配准均方误差。如果均方差小于设定的阈值,则停止迭代,否则返回步骤①继续计算配准参数,并用旋转平移后的机载激光测深数据取代原始数据,直至均方差小于阈值。

(6) 对配准后的数据进行精度评定。

4 实验及结果分析

本文采用的数据为南海某岛屿近岸船载移动测量数据和机载激光测深数据。机载激光测深数据利用国产机载激光雷达系统的海洋测绘模块采集,采

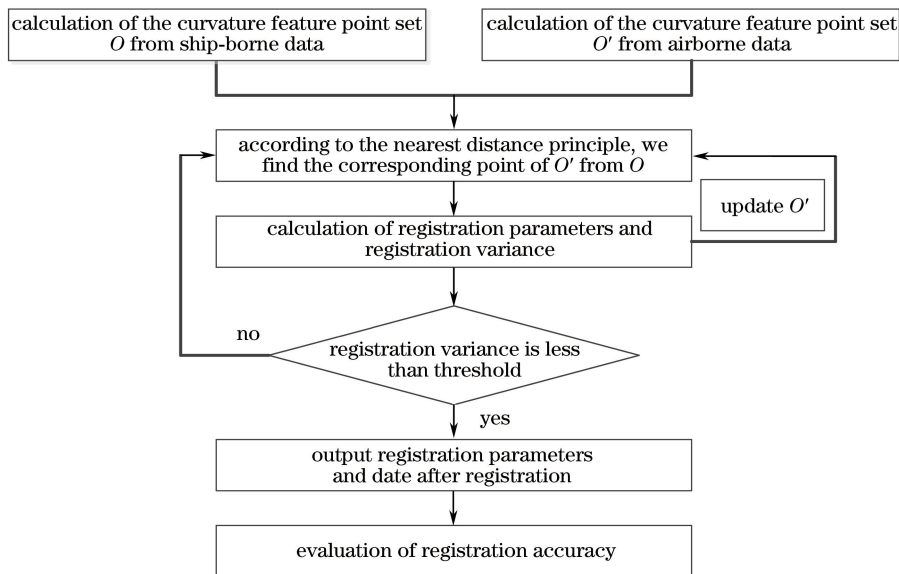


图2 基于曲率特征点的 ICP 算法流程

Fig. 2 ICP algorithm flow based on curvature feature point

集过程中,飞机航高为 400 m,航速为 300 km/h,点密度为 0.35 point/m^2 ,在水深为 50 m 时水平精度优于 0.328 m,垂直精度优于 0.57 m;船载移动测量数据包括近岸三维激光扫描点云数据和多波束测深数据,该系统在水深为 50 m 时水平精度优于

20 cm,高程精度优于 30 cm。其中船载移动测量水下数据深度范围是 5~48 m,机载激光测深数据深度范围是 0.3~49 m,测区范围约为 4.16 km^2 ,海底地形变化比较平缓。实验区域如图 3 所示,图 3(a)为船载移动测量数据,图 3(b)为机载激光测深数据。

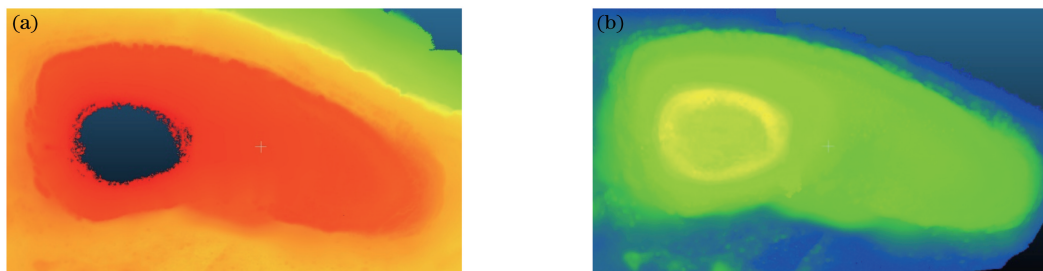


图3 实验区域。(a)船载移动测量数据;(b)机载激光测深数据

Fig. 3 Experimental area. (a) Ship-based mobile measurement data; (b) airborne bathymetric LiDAR data

在实验中,以船载移动测量数据为基准,利用基于曲率特征点的改进 ICP 算法进行数据自动配准融合。配准完成后,为验证数据配准的准确性,从二者数据的水下和近岸地区中选取特征较明显区域,配准后效果如图 4 所示。

船载移动测量系统和机载激光测深系统的数据都属于 WGS84 坐标系,但受定位方式及环境因素影响,二者数据并不能完全重合,有较小的差异。经过配准之后,二者数据基本重合,如图 4 所示。

机载激光测深数据和船载移动测量数据的差异主要体现在高程中,平面位置相差不大。参考利用高程内插进行数字高程模型(DEM)精度评价方法,本文采用经过配准后的二者数据的高程残差进行定量描述配准效果。从配准后的数据中,沿航线方向

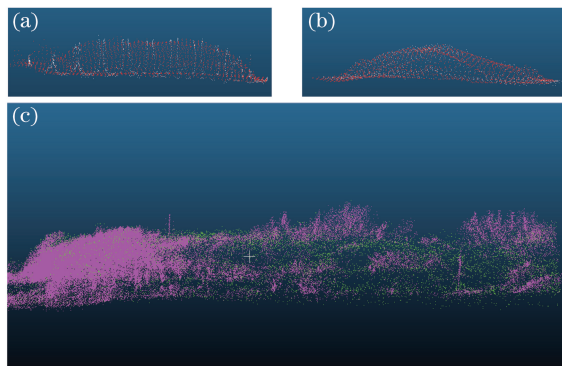


图4 完成数据配准。(a),(b)水下较明显特征区域;(c)近岸局部区域

Fig. 4 Complete data registration. (a), (b) Obvious feature region under water; (c) near shore local area

截取宽约 10 m、长约 900 m 的重叠区域数据,截取数据范围如图 5 所示。将截取的数据沿垂直于航线方向做投影,取 5 m 为间隔对数据做分段处理。对

每段船载移动测量数据进行二次多项式拟合,分别计算该段机载激光测深数据到拟合曲线的距离,制作高程残差直方图,如图 6 所示。

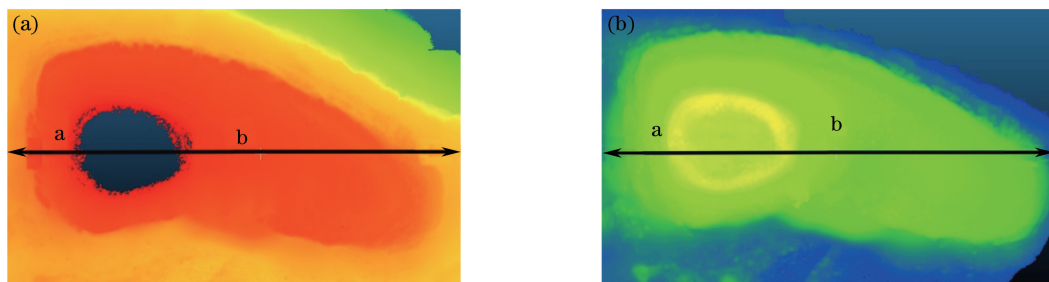


图 5 截取数据范围。(a) 船载移动测量数据;(b) 机载激光测深数据

Fig. 5 Truncated data range schematics. (a) Ship-based mobile measurement data; (b) airborne bathymetric LiDAR data

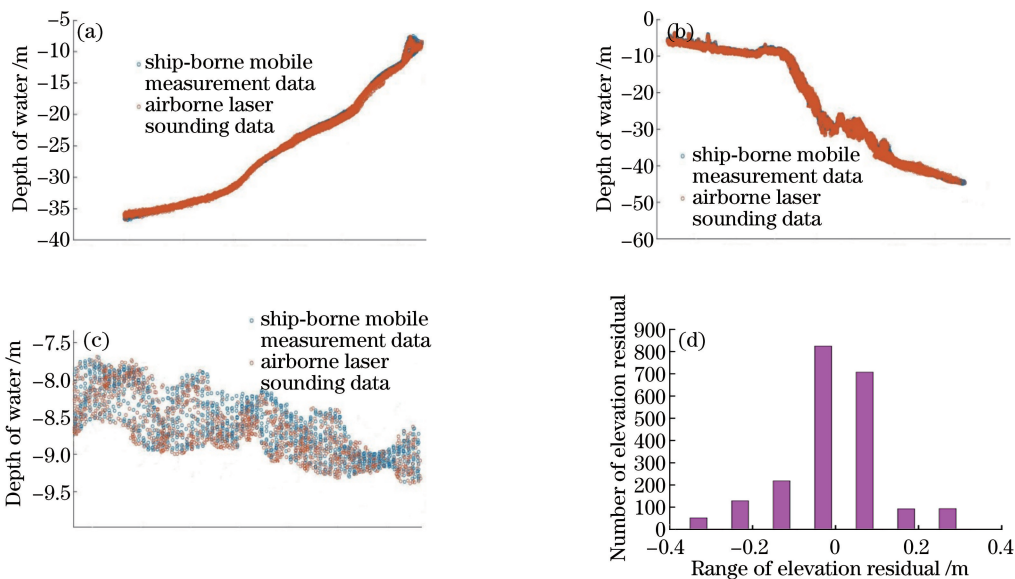


图 6 数据投影示意及高程残差分布直方图。

(a) a 区域截取数据投影示意图;(b) b 区域截取数据投影示意图;(c) b 区域部分细节投影示意图;(d) 高程残差分布直方图

Fig. 6 Data projection diagram and histogram of elevation residual distribution.

(a) Region a intercepting data projection diagram; (b) region b intercepting data projection diagram;

(c) region b projection part schematic details; (d) histogram of elevation residual distribution

图 6 由数据向垂直于航线方向投影得到,其中图 6(a)为 a 区域示意图,图 6(b)为 b 区域示意图,图 6(c)为 b 区域部分细节示意。从图 6 中可以看出,二者数据经过配准后,数据走向保持高度一致性,未出现倾斜、扭曲等现象,在局部细节示意图中可以直观看出二者数据基本融合。图 6(d)为高程残差分布直方图,经过配准后,二者数据高程残差符合正态分布,且高程残差大部分都集中分布在 $-0.3 \sim 0.3$ m 范围内。

测量数据的特点,然后选择基于曲率特征点的 ICP 算法,对机载激光测深系统和船载移动测量系统的数据进行配准融合。配准结果显示,该方法可以精确地将二者数据融合,实现两种测量系统的优势互补,有效地补充传统海底地形测量成果,实现陆地、浅海区域海陆地形全面精准描述、海陆基准统一,对海岛礁地形地貌认识、水下目标物探测、海洋运输航线规划等具有一定意义,并具有工程实用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao J H, Ouyang Y Z, Wang A X. Status and development tendency for seafloor terrain measurement technology [J]. Acta Geodaetica et

5 结 论

本文首先分析了机载激光测深数据和船载移动

- Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1786-1794.
- 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.
- [2] Steinvall O K, Koppari K R, Karlsson U C M. Airborne laser depth sounding: system aspects and performance[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2558: 392-412.
- [3] Gaba S P. Underwater ranging[J]. Defence Science Journal, 2014, 34(1): 71-78.
- [4] He Y, Tian M Y, Lü D L, *et al.* Parameter design and performance analysis of airborne dual frequency laser radar system[C]//Infrared and Remote Sensing Technology and Applications and Interdisciplinary Forum, Nanjing, Jiangsu, 2015: 183-192.
贺岩, 田茂义, 吕德亮, 等. 机载双频激光雷达系统参数设计和性能分析[C]//红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 江苏, 南京, 2015: 183-192.
- [5] Hu Y H, Min H, Zhao N X. Airborne and spaceborne laser sounding technology and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7382: 73820A.
- [6] Huang M T, Zhai G J, Xie X J, *et al.* The influence of carrier's attitude and the position reduction in multibeam echosounding and airborne laser depth sounding [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 2(3): 77-88.
- [7] Hu S J, He Y, Zang H G, *et al.* A new airborne laser bathymetry system and survey result [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(9): 1163-1167.
胡善江, 贺岩, 臧华国, 等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1163-1167.
- [8] Ren L P, Zhao J S, Zhai G J, *et al.* Scanning-track computation and analysis for airborne laser depth sounding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 138-142.
任来平, 赵俊生, 翟国君, 等. 机载激光测深海面扫描轨迹计算与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 138-142.
- [9] Fan M, Sun Y, Xing Z, *et al.* Bathymetry fusion techniques for high-resolution digital bathymetric modeling[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(1): 130-137.
樊妙, 孙毅, 邢喆, 等. 基于多源水深数据融合的海底高精度地形重建[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 130-137.
- [10] Yang F L, Wu Z Y, Du Z X, *et al.* Co-registering and fusion of digital information of multi-beam sonar and side-scan sonar [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(8): 740-743.
阳凡林, 吴自银, 独知行, 等. 多波束声纳和侧扫声纳数字信息的配准及融合[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(8): 740-743.
- [11] Liu J N, Zhao J H. The present status and developing trend of the multibeam system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002, 22(5): 3-6.
刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.
- [12] Costa B M, Battista T A, Pittman S J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 1082-1100.
- [13] Gall B L, Authemayou C, Ehrhold A, *et al.* LiDAR offshore structural mapping and U/Pb zircon/monazite dating of Variscan strain in the Leon metamorphic domain, NW Brittany [J]. Tectonophysics, 2014, 630: 236-250.
- [14] Kennedy D M, Ierodiaconou D, Schimel A. Granitic coastal geomorphology: applying integrated terrestrial and bathymetric LiDAR with multibeam sonar to examine coastal landscape evolution [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(12): 1663-1674.
- [15] Schmauder G C, Kent G, Smith K D, *et al.* Reexamination of faulting in the Tahoe Basin using airborne LiDAR data and seismic CHIRP imagery[C]//Fall Meeting of American Geophysical Union, 2011: S12A-05.
- [16] Kaneko S, Kondo T, Miyamoto A. Robust matching of 3D contours using iterative closest point algorithm improved by M-estimation [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(9): 2041-2047.
- [17] Minguez J, Montesano L, Lamiraux F. Metric-based iterative closest point scan matching for sensor displacement estimation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(5): 1047-1054.
- [18] Zhu J, Du S, Yuan Z, *et al.* Robust affine iterative closest point algorithm with bidirectional distance [J]. IET Computer Vision, 2012, 6(3): 252-261.
- [19] Zeng F X, Li L, Diao X P. Iterative closest point algorithm registration based on curvature features [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011003.
曾繁轩, 李亮, 刁鑫鹏. 基于曲率特征的迭代最近点

- 算法配准研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011003.
- [20] Zhu J H, Zheng N N, Yuan Z J, *et al.* Robust scaling iterative closest point algorithm with bidirectional distance measurement [J]. Electronics Letters, 2010, 46(24): 1604-1605.
- [21] Du S Y, Zhu J H, Zheng N N, *et al.* Robust iterative closest point algorithm for registration of point sets with outliers [J]. Optical Engineering, 2011, 50(8): 087001.
- [22] Zhang Z, Xu H L, Yin H. A fast point cloud registration algorithm based on key point selection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121002.
- 张哲, 许宏丽, 尹辉. 一种基于关键点选择的快速点云配准算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121002.
- [23] Li R Z, Yang M, Tian Y, *et al.* Point cloud registration algorithm based on the ISS feature points combined with improved ICP algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111503.
- 李仁忠, 杨曼, 田瑜, 等. 基于 ISS 特征点结合改进 ICP 的点云配准算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111503.
- [24] Peng K, Chen X, Zhou D, *et al.* 3-D reconstruction using image sequences based on projective depth and simplified iterative closest point [J]. Optical Engineering, 2012, 51(2): 021110.