

# 基于三角面元的海岸带机载/船载 LiDAR 点云配准方法研究

程玉璐<sup>1,2</sup>, 于孝林<sup>1,2</sup>, 王贤昆<sup>3</sup>, 孔锁财<sup>4</sup>, 宿殿鹏<sup>1,2</sup>, 阳凡林<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部 海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 自然资源部 北海调查中心, 山东 青岛 266061;

4. 山东瑞智飞控科技有限公司, 山东 青岛 266590)

**摘要:**机载 LiDAR 系统与船载 LiDAR 系统是获取海岸带点云数据的常用方式。两种测量系统所测数据具有空间差异性和互补性,对这两类非同源点云数据进行配准具有重要意义。本研究提出一种基于三角面元的 LiDAR 点云配准算法,根据空间分布将目标点云分割成若干不规则的三角面元作为配准基元,利用点-面变换模型,最小化源点云中的测量点与其平面位置处的三角面元间的距离,最终实现海岸带区域点云配准。实验结果表明,配准前后的样本点距离平均误差和点-面距离均方根误差分别从 3.30 和 1.51 m 降低到 0.76 和 0.17 m,本研究基于三角面元的点云配准方法可以有效消除海岸带非同源点云数据测量空隙、角度偏差等现象。

**关键词:**点云配准;海岸带;机载激光雷达;船载激光雷达;Delaunay 不规则三角网

中图分类号:P229

文献标志码:A

## Research on coastal zone airborne/shipborne LiDAR point cloud registration method based on triangular facet

CHENG Yulu<sup>1,2</sup>, YU Xiaolin<sup>1,2</sup>, WANG Xiankun<sup>3</sup>, KONG Suocai<sup>4</sup>, SU Dianpeng<sup>1,2</sup>, YANG Fanlin<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Ocean Geomatics, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao 266590, China;

3. North Sea Survey Center, Ministry of Natural Resources of China, Qingdao 266061, China;

4. Shandong Ruizhi Flight Control Technology Co. Ltd, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Airborne LiDAR and shipborne LiDAR measurement systems are commonly used methods to obtain point cloud data in coastal zones. The data measured by the two measurement systems have spatial differences and complementarity, which is of great significance for the registration of two types of non-homologous point clouds. In this paper, a point cloud registration method based on triangular facet was proposed. The target point cloud was divided into several irregular triangular facets according to the spatial distribution. Then, the point-area transformation model was used to minimize the distance between the measurement point in the source point cloud and the triangular facet at its plane location. Finally, the registration of coastal point clouds was achieved. The experimental results

收稿日期:2023-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41930535,52001189);青岛市关键技术攻关及产业化示范类项目(23-1-3-hygg-1-hy);中国博士后科学基金项目(2021M700155);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2019TDJH103);山东省高等学校青创科技支持计划项目(2023KJ088)

作者简介:程玉璐(1999—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要从事海岸带点云数据处理融合方面的研究。

阳凡林(1974—),男,湖北荆州人,教授,博士,主要从事海底地形测量和海洋定位导航方面的研究,本文通信作者。

E-mail:yang723@163.com

demonstrated that the mean error of sample point distance and the root mean square error of point-to-surface distance were reduced from 3.30 and 1.51 m to 0.76 and 0.17 m respectively. The registration algorithm based on triangular facets can effectively eliminate phenomena such as measurement gaps and angle deviations in non-homologous point clouds in coastal areas.

**Key words:** point cloud registration; coastal zone; airborne LiDAR; shipborne LiDAR; Delaunay triangle network

海岸带是海洋和陆地相互作用的过渡区域<sup>[1]</sup>,建设有大量人文景观及海洋工程,为实现海岸带可持续发展,迫切需要构建高质量、全覆盖、现势性强的海岸带地理信息模型。单一的测量技术无法满足海岸带复杂地形测量的需要,因此,如何高效准确地将不同搭载平台、传感器获取的海岸带点云数据进行配准融合,实现海空天数据一体化,具有重要的研究意义。

机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)系统搭载三维激光扫描仪,通过向地面发射激光脉冲获取陆地和浅海区域点云数据的三维信息<sup>[2]</sup>,具有测量精度高、覆盖面广、点云密度大等优点<sup>[3]</sup>。但由于飞机姿态、扫描视角、地物阻挡等原因,不易采集物体侧面、深海等信息数据<sup>[4]</sup>。船载 LiDAR 系统易受到系统安装精度、平台航向、船体吃水、水陆障碍物等因素的影响。在地形起伏较大的区域,船体行驶受限严重,使得船载 LiDAR 扫描仪在浅海难以获得连续的高精度点云数据<sup>[5]</sup>。为了发挥不同传感器的优势,需要提取机载 LiDAR 与船载 LiDAR 点云数据的重叠区信息,将二者进行空间坐标匹配。根据实时动态监测(real time kinematic, RTK)点云坐标验证,机载点云数据精度较高,可作为配准目标点云<sup>[6-7]</sup>。

目前,最经典的基于点基元配准方法是由 Besl 等<sup>[8]</sup>提出的最邻近点迭代(iterative closest point, ICP)方法,该方法利用欧氏距离最小原理,从源点云和目标点云中选择最邻近点对,迭代解算变换参数,直至满足预设的收敛条件。李仁忠等<sup>[9]</sup>提出一种基于内部形态描述子特征点结合改进迭代最近点的点云配准算法,但某些参数的阈值设置仍无法达到自适应的效果。荆路等<sup>[10]</sup>提出一种基于尺度不变特征变换的改进 ICP 点云配准算法。基于点特征点云配准算法虽然应用广泛,能有效提取点云特征,但需要合适的初始变换参数,否则容易陷入局部最优,且由于点迭代计算效率不高,无法高效完成海岸带大规模点云数据配准工作。

面基元比点基元包含更多的语义信息,且受噪声和点云密度的影响较小,对于特征不丰富地区,可构建不同的配准面基元。Li 等<sup>[11]</sup>提出一种基于体素的平面特征提取方法,将具有相同平面特征的体素合并得到平面特征,实现快速框架级全局定位。张海啸等<sup>[12]</sup>利用随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法提取地面点的面特征,并利用区域生长分割算法提取路牌表面特征,然后通过匹配同名面基元实现了车载激光雷达系统的外参数标定。Low<sup>[13]</sup>提出一种改进的 ICP 方法,利用同名面-面特征,降低点云密度、噪声对 ICP 方法的影响。Baek 等<sup>[14]</sup>计算全局和局部点云的快速点特征直方图,提取点特征,并使用 RANSAC 和 ICP 配准方法来搜索和对齐全局点云和局部点云之间的匹配区域。

因此,需要根据待配准点云区域特征选择不同的配准基元,而海岸带区域既有特征不丰富的自然景观地带,又有大量的人工建筑标识,仅通过提取单一点基元或面基元的配准方法无法高效完成海岸带复杂地带的配准问题。因此,提出一种基于三角面元的点云配准方法。

## 1 基于三角面元的点云配准方法

对于地形特征稀少的海岸带点云数据,利用 Delaunay 三角剖分<sup>[15-16]</sup>对目标点云构建不规则三角网(triangulated irregular network, TIN),通过设置边长阈值剔除三角面元中的缝隙三角网,将三角网中的每个三角面元视作配准面基元,根据源点云与其对应的三角面元构建点-面基元模型进行匹配,使两者之间的距离最小化,实现海岸带点云数据的配准。

### 1.1 顾及缝隙的 TIN 构建

由于环境及传感器自身的限制,点云数据中常常存在数据缝隙,导致所构建的不规则三角网在缝隙区域较为平坦,缺乏地形细节。如果缝隙区域的实际地形起伏较大,则该区域三角面元与其相应的源点云中的测

量点间距离偏大,影响点云配准效果。因此,配准前需对缝隙区域的三角面元和无匹配面源点云进行剔除。

### 1) 缝隙三角面元剔除

基于目标点云(方格点)建立三角格网,如图 1(a)所示,计算所有三角面元的三条边的边长,如果至少有一条边的长度大于某一阈值  $S$ ,则将该三角面元标记为缝隙三角面元,并从 TIN 中剔除,如图 1(b)所示。

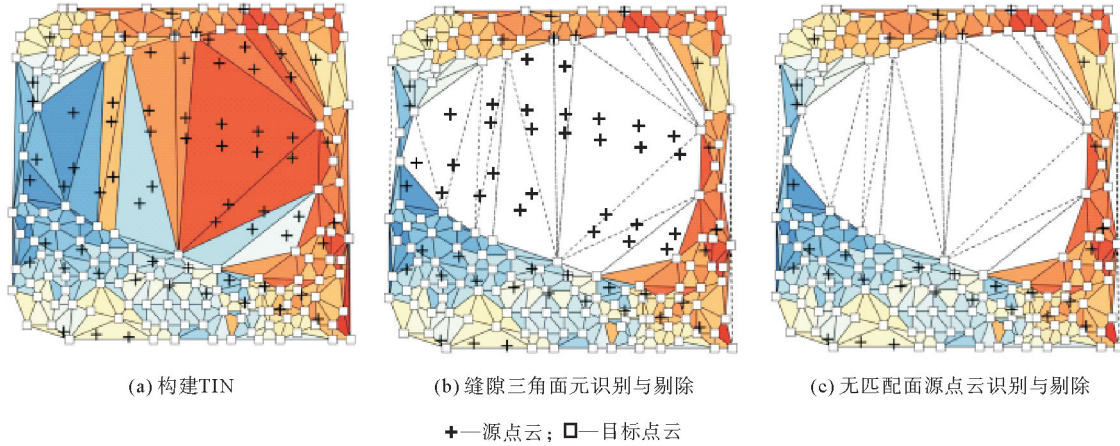


图 1 缝隙三角面元、无匹配面源点云识别与剔除

Fig. 1 Identification and elimination of data gap's triangular facet and unmatched source point cloud

### 2) 无匹配面源点云剔除

建立各个三角面元与其内源数据(十字点)的一一对应关系,用于后续变化参数的解算,如果源数据点在剔除的三角面元的平面位置上,或源数据点的平面位置无对应的三角面元,则将这些点剔除掉,不对这些点进行处理,如图 1(c)。阈值  $S$  通过三角面元边长的平均值和标准差求得,如式(1)所示,  $\bar{S}$  表示所有三角面元边长的平均值,  $S_i$  为第  $i$  条边的长度,  $N$  为所有三角面元边的数量。

$$S = \bar{S} + 2 \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \quad (1)$$

## 1.2 基元三角面元优化的配准

在不规则三角网构建完成后,计算所有三角面元的法向量。对于源坐标系下的一点  $i$  以及目标坐标系下的一个平面  $j$  之间的距离表示为:

$$[\mathbf{n}_j^T - d_j^t] \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_i^s = v_{ij} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$  表示平面的单位法向量,  $d$  表示坐标系原点到平面的距离,  $\mathbf{0} = (0, 0, 0)$ ,  $\mathbf{P} = (x, y, z, 1)^T$  为点的齐次表示,  $v_{ij}$  表示坐标转换后的点与平面之间的距离残差。则

$$\mathbf{n}_j^T (\mathbf{R} \mathbf{P}_i^s + \mathbf{t}) = d_j^t + v_{ij} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$  为空间平移参数,  $\mathbf{R}$  表示由三个空间旋转参数组成的三维旋转矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)中等号左侧部分为由 6 个未知变换参数  $(\omega, \varphi, \kappa, t_x, t_y, t_z)$  组成的非线性函数,利用泰勒公式将其线性化并取一次项得:

$$n_j^{t\top}(\mathbf{RP}_i^s + \mathbf{t}) = f(\mathbf{u}) \approx f(\mathbf{u}^o) + \sum_{k=1}^6 \frac{\partial f}{\partial u_k} \bigg|_{u_k = u_k^o} (u_k - u_k^o) \quad (5)$$

式中： $f(\mathbf{u}^o)$ 通过将 6 个未知变换参数  $u_k$  的初始值代入式(3)等号左侧部分得到； $(u_k - u_k^o)$ 表示 6 个未知变换参数的改正数。利用至少 6 对同名点-面特征可以构建误差方程组：

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{A}$  为由未知变换参数改正数的系数构成的矩阵， $\mathbf{L}$  为所有同名点-面特征  $d'_j - f(\mathbf{u}^o)$ 项组成的常数向量， $\mathbf{X}$  为由未知参数改正数组成的向量， $\mathbf{V}$  表示由坐标转换后点与平面间距离残差组成的向量。根据最小二乘间接平差原理，未知变换参数改正数的向量解为：

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{W} \mathbf{L} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{W}$  为权重矩阵，可以为同名点-面特征分配权重。

基于三角面元的点云配准方法如图 2 所示，通过逐步趋近法，计算未知变换参数的改正数并迭代地改正 6 个未知变换参数的初始值，再判断是否满足设定的终止迭代条件(迭代次数大于预设值或配准后点-面距离的平均值小于预设值)。若未满足终止条件，则将所得到的变换参数应用至源点云数据，再次进行缝隙三角面元剔除、无匹配面源点云剔除，并进行点-面匹配求解变换参数，直至满足阈值条件，求得最终平移、旋转点云配准变换矩阵。

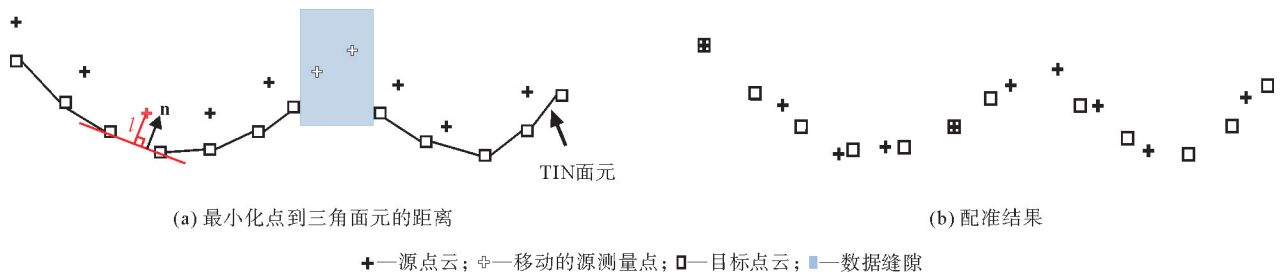


图 2 三角面元的点云配准方法示意图

Fig. 2 Diagram of the triangular facet point cloud registration method

### 1.3 方法流程

- 1) 输入目标点云,使用 Delaunay 三角剖分对目标点云构建不规则三角网。
- 2) 计算所有三角面元的边长,取其平均值作为边长阈值,剔除边长大于阈值的裂隙三角面元,保留边长小于阈值的三角面元。
- 3) 建立各个三角面元与其内源数据的一一对应关系,如果源点云数据无匹配的三角面元,则将这些点剔除。
- 4) 利用点-面变换模型、最小二乘间接平差原理与逐步趋近法解算 6 个未知变换参数。
- 5) 若迭代次数大于预设值或配准后点云数据点-面距离平均值小于预设值,则终止配准程序,否则将变换矩阵应用至源点云数据并重复步骤 4)~5)。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验数据

为验证本研究方法(简称本方法)的有效性,采用 RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带点云数据测量。机载 LiDAR 点云数据为 2021 年 8 月采集的山东省青岛市薛家岛海岸带地形实测数据,研究区域位置如图 3 所示。RIEGL VQ-840-G 无人机载 LiDAR 测深系统重量为 12 kg,数据采集脉冲重复频率 50 kHz,航高 50 m,航速 5 m/s,激光发散角 1 mrad,扫描天底角 20°。使用 RIEGL VZ-2000 三维激光船载扫描仪,每秒可发射 40 万个激光,激光波长 770~3 000 nm,距离分辨率 0.05 mm/m,角度分辨率 1.8''。

船载 LiDAR 点云数据量为 1 962 487 个, 点云密度 144 pts/m<sup>2</sup>, 如图 4 所示。图 4 中深蓝色部分是位于海岸线之上的砾石分布区域, 平均陆地高程为 10~15 m; 浅蓝至深红色部分是树林及公路, 平均陆地高程在 15 m 以上, 由于本区域树林较多, 公路地势较低, 部分树木挡住了传感器发射的激光, 导致点云数据中出现较多空白缝隙; 中间区域是一条木质海岸走廊, 具有明显地物特征。

机载 LiDAR 点云数据量为 40 302 713 个, 点云密度 392 pts/m<sup>2</sup>, 如图 5 所示。图 5 中自上而下依次是海洋、海滩、走廊、树林、公路等。该区域中间部分为木制走廊和公路, 具有明显地物特征。由于船载 LiDAR 点云数据中公路部分存在空白区, 不作为点云配准效果的评估区域。为更好地展示细节特征, 从实验点云中截取子区域并命名为区域 1 和区域 2, 图 5 中, 右侧红框是区域 1 的位置, 左侧红框是区域 2 的位置。

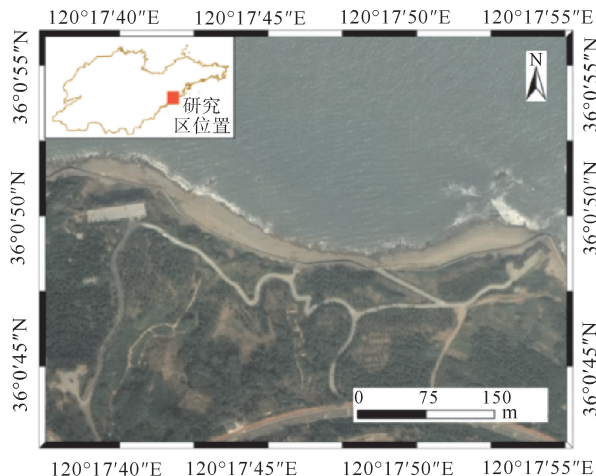


图 3 研究区位置

Fig. 3 Location of the research area

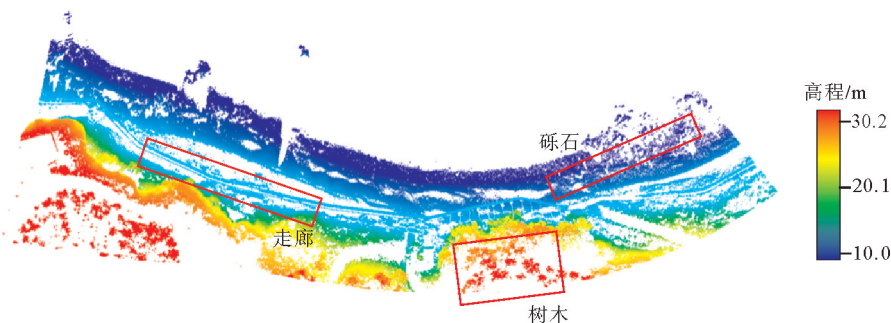
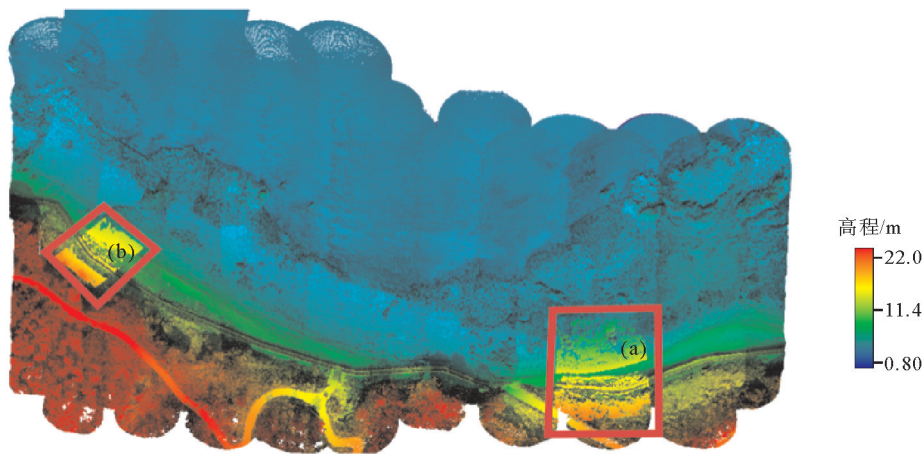


图 4 船载 LiDAR 点云数据

Fig. 4 Shipborne LiDAR point cloud data



(a)区域 1;(b)区域 2

图 5 机载点云数据区域

Fig. 5 Position of airborne LiDAR area

## 2.2 配准结果与分析

### 2.2.1 定性分析配准效果

对于图 5 选中的两个区域(区域 1、区域 2),以机载 LiDAR 点云作为目标点云数据,船载 LiDAR 点云作为源点云数据,配准前后的船载 LiDAR 点云和机载 LiDAR 点云如图 6 所示。可以看出,配准前的点云数据在垂直方向上存在较大的偏差(船载数据位于机载数据的上方),而配准之后垂直方向的距离偏差显著减小,且从整体上看,走廊这一典型地物配准后重合度较好。

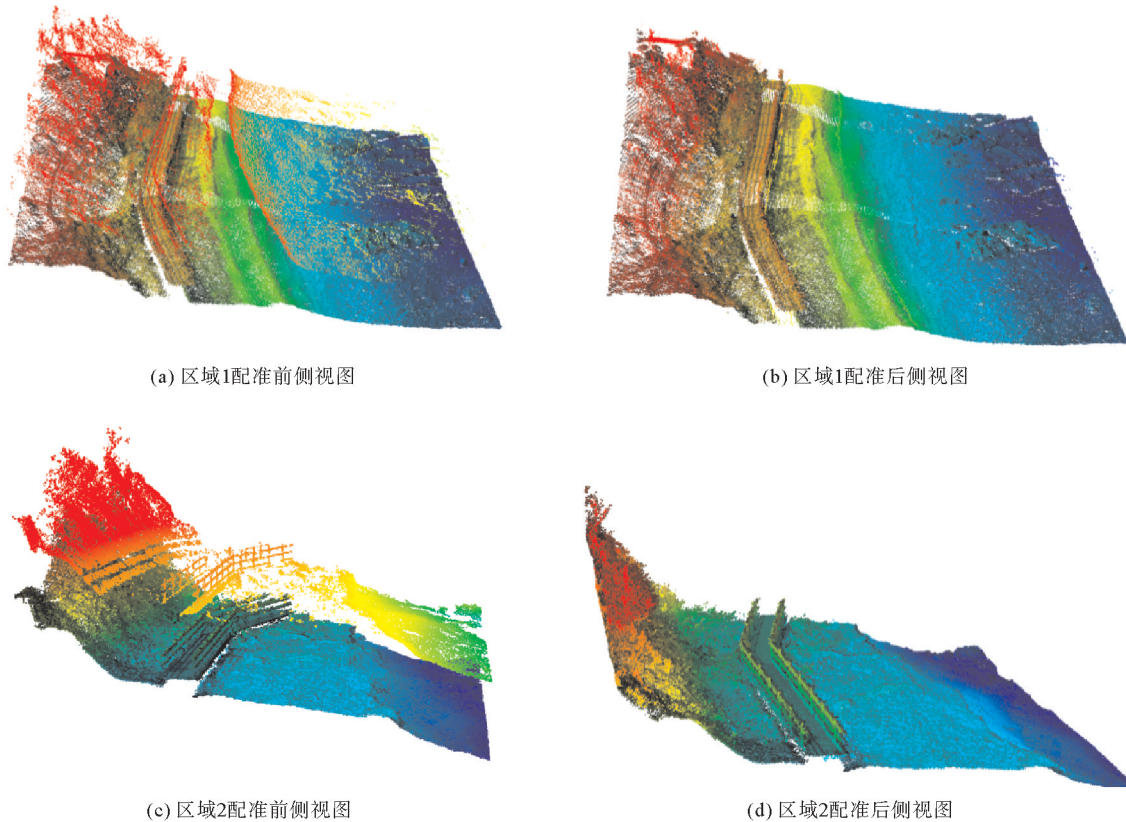


图 6 船载 LiDAR 点云和机载 LiDAR 点云配准前后对比图

Fig. 6 Comparison between shipborne LiDAR point cloud and airborne LiDAR point cloud before and after registration

为进一步定性评估配准方法的有效性,在区域 1 和区域 2 中分别选取有典型起伏地物的区域,将配准前的船载 LiDAR 点云(蓝色)、配准后的船载 LiDAR 点云(红色)以及机载 LiDAR 点云(黑色)分别沿 Y 轴截取 2 m 剖面图,结果如图 7 所示。可以看出,两个区域的点云数据均得到有效配准,且配准后的整体地形变化趋势较为一致。

为验证配准后的细节效果,将本方法与经典 ICP 方法<sup>[8]</sup>、ICP-Plane 方法<sup>[13]</sup>进行对比,结果如图 8 所示。共截取走廊、走廊平面、砾石区三部分,由图 8 可以看出,本方法的配准效果明显优于其他两种方法。其中经典 ICP 方法的效果较差,配准后走廊部分在水平和垂直方向上仍存在明显偏差;ICP-Plane 方法通过提取面特征,走廊平面部分配准效果较好,但其他部分仍存在垂直方向偏差;本方法配准后不仅消除了源点云与目标点云的原始垂直距离偏差,在走廊、暗礁平面区域的效果均较好。

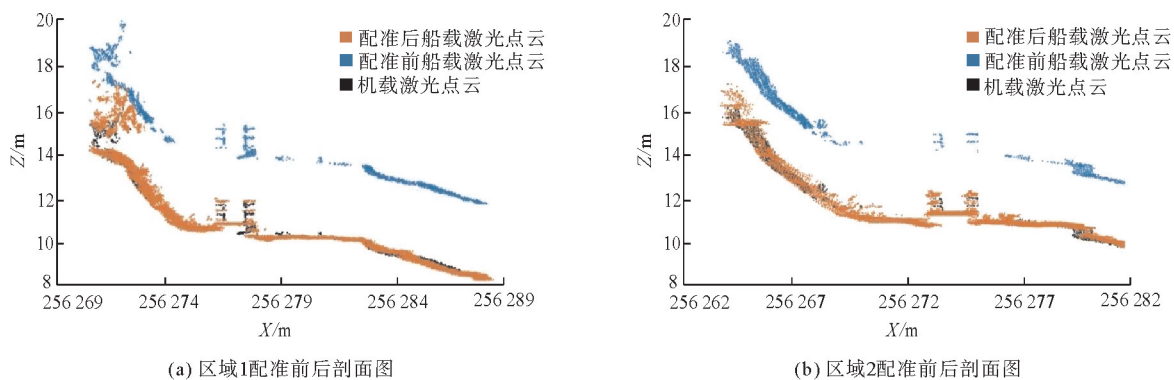


图 7 点云配准前后剖面图

Fig. 7 Point cloud profile before and after registration

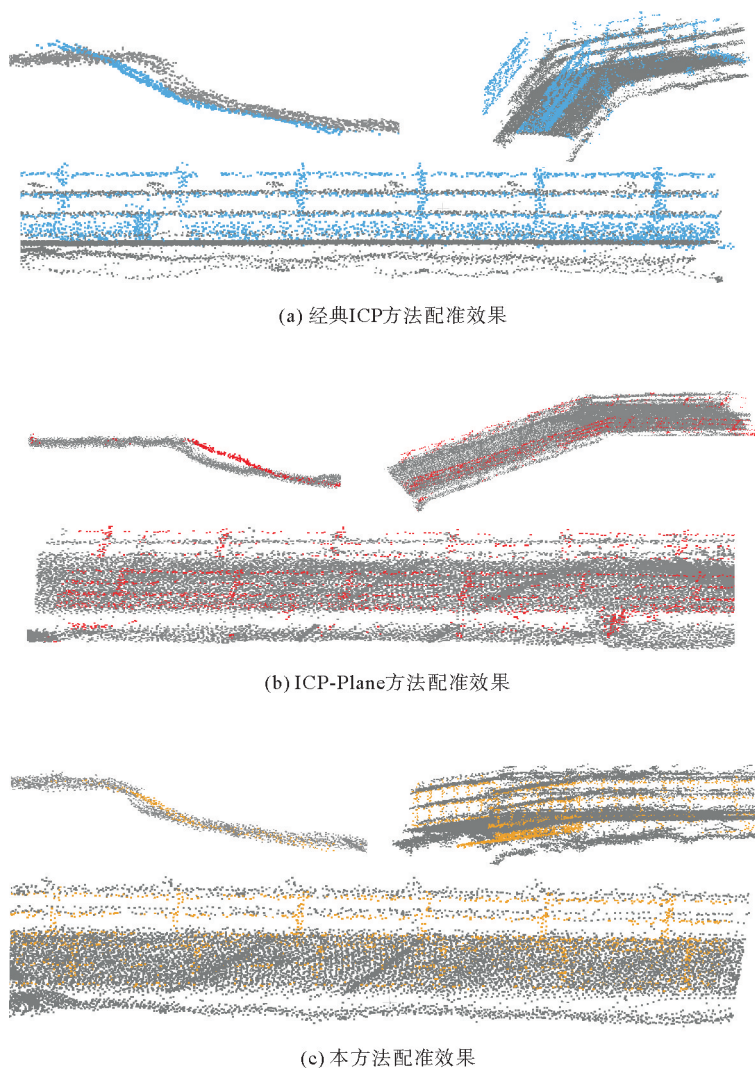


图 8 经典 ICP 方法、ICP-Plane 方法及本方法配准细节图

Fig. 8 Classic ICP, ICP-Plane method and the proposed method registration details

### 2.2.2 定量分析配准精度

#### 1) 本方法有效性分析

由于实验区域源点云与目标点云在配准前具有较大角度与位置偏差,需要对配准前后最近邻点距离的最大值、平均值和标准偏差进行计算,结果如表 1 所示。配准前的最大距离从 3.46 m 减至配准后的 0.63 m,平均距离由 2.08 m 减至 0.03 m,标准偏差由 0.92 m 减至 0.09 m。

为了更直观地展示本方法配准前后误差分布情况,以区域 1 为例,对船载 LiDAR 点云数据构建 K-D 树,分别搜索配准前与配准后船载 LiDAR 点云数据与机载 LiDAR 点云数据的最近邻点,利用 CloudCompare 软件计算最近邻点集的 C2C(cloud-to-cloud),即同名点(理论)之间的绝对距离,如图 9 所示,并统计误差分布如图 10 所示。可见同名点之间的绝对距离显著减小,峰值由 3 m 减至 0.1 m。

表 1 本方法配准前后同名点欧氏距离

Table 1 Euclidean distance of corresponding points before and after the proposed method registration

距离类型	配准前	配准后
最大距离	3.46	0.63
平均距离	2.08	0.03
标准偏差	0.92	0.09

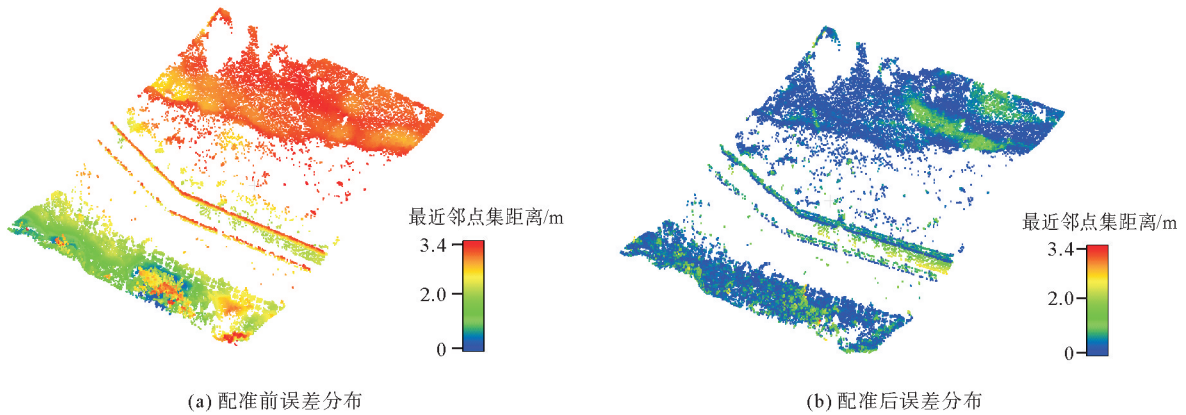


图 9 配准误差分布

Fig. 9 Registration error distribution

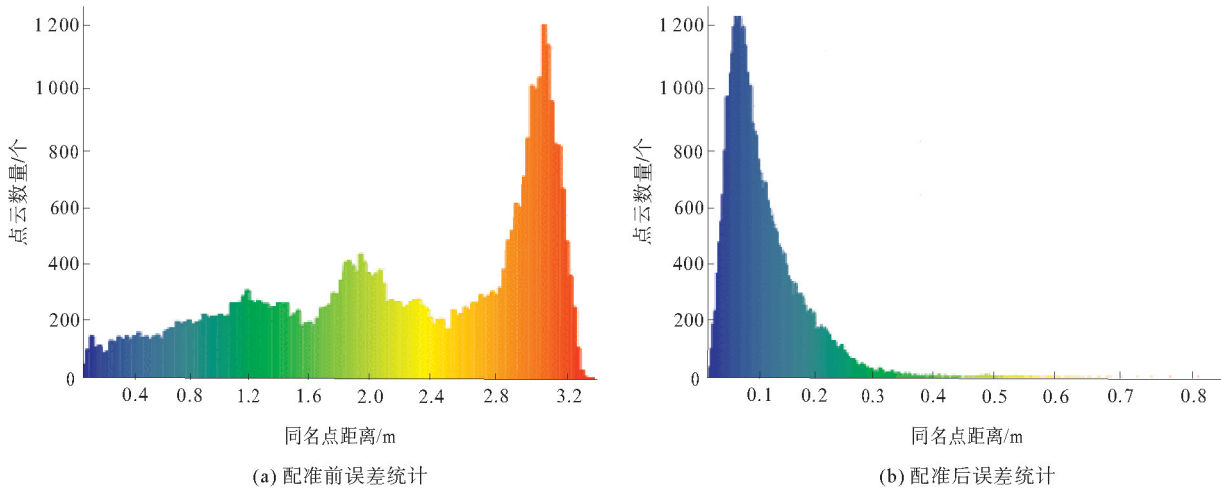


图 10 配准误差统计

Fig. 10 Registration error statistics



## 2) 方法有效性对比分析

为进一步验证本方法与经典 ICP 方法、ICP-Plane 方法的有效性,对配准性能进行定量评估,在区域 1、区域 2 中共选择 50 个同名点,分别计算配准前后机载 LiDAR 点云数据与船载 LiDAR 点云数据同名点欧式距离的最小误差、最大误差、平均误差,结果如表 2 所示。经典 ICP 方法配准前后的欧式距离平均误差从 3.30 m 降至 1.05 m,ICP-Plane 方法配准前后的欧式距离平均误差从 3.30 m 降至 0.79 m,而本方法配准前后的欧式距离平均误差从 3.30 m 降至 0.76 m,分别比经典 ICP 方法、ICP-Plane 方法配准后的欧式距离误差减小 0.29 和 0.03 m,说明本方法能更好地修正海岸带机载 LiDAR 点云与船载 LiDAR 点云数据的角度和位置偏差,实现点云有效配准。

由于机载 LiDAR 与船载 LiDAR 点云数据的密度差距过大,同名点匹配不确定性较大,因此,本研究在原有误差评价模型的基础上,采用 C2T (cloud-to-TIN) 配准误差评价模型对配准效果进行定量评估。对于配准前后的源点云数据,计算其与对应三角面元的点-面距离  $d$ ,  $Q$  为同名点-面数量,所有点-面距离的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为:

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_i^Q d_i^2} \quad (8)$$

分别计算本方法、经典 ICP 方法、ICP-Plane 方法配准前后区域 1、区域 2 点-面距离的 RMSE 及 RMSE 的区域平均值,如表 3 所示。本方法在两个实验区域均取得最优的配准效果,比其他两种方法性能更加稳定、准确。对于区域 1,本方法的 RMSE 远小于其他两种,原因在于样本 1 的点云数量大于区域 2 点云数量,且研究区域内的空隙面积大于区域 2,从而导致经典 ICP 方法结果为局部最优。与经典 ICP 方法对比,本方法和 ICP-Plane 方法鲁棒性更佳,原因是两者利用了点-面特征作为配准基元。

## 3 结论

针对海岸带缺少明显地物特征导致的多视角点云数据配准困难的问题,提出一种基于三角面元的点云配准方法,有效构建点云区域面特征、点-面变换模型,实现海岸带区域点云配准。实验结果表明,配准前后的点云同名点平均误差和 RMSE 分别从 3.30 和 1.51 m 降低到 0.76 和 0.17 m,说明本方法可以满足缺少明显地物特征且地形比较复杂的海岸带区域的非同源点云配准。

## 参考文献:

- [1] 宿殿鹏,阳凡林,陈亮,等. 无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(5):11-20.  
SU Dianpeng, YANG Fanlin, CHEN Liang, et al. Feasibility analysis of UAV-airborne LiDAR bathymetry system for coastal zone mapping[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2022,41(5):11-20.
- [2] 宿殿鹏,闫豆豆,陈亮,等. 机载 LiDAR 测深点云 SVB 联合滤波算法[J]. 测绘学报,2023,52(4):614-623.  
SU Dianpeng, YAN Doudou, CHEN Liang, et al. Surface-volume-bottom joint-filtering algorithm for Airborne LiDAR

表 2 机载 LiDAR 和船载 LiDAR 点云数据配准结果评估

Table 2 Evaluation of registration results for airborne LiDAR and shipborne LiDAR point cloud data m

方法类型	最小误差	最大误差	平均误差
配准前	2.96	3.65	3.30
经典 ICP 方法 <sup>[8]</sup> 配准后	0.81	1.35	1.05
ICP-Plane 方法 <sup>[13]</sup> 配准后	0.45	1.18	0.79
本方法配准后	0.35	1.04	0.76

表 3 机载 LiDAR 和船载 LiDAR 点云数据配准前后 RMSE

Table 3 RMSE before and after registration of airborne LiDAR and shipborne point cloud data

方法类型	区域 1	区域 2	区域平均值
配准前	1.51	2.41	1.96
经典 ICP 方法 <sup>[8]</sup> 配准后	0.49	0.30	0.42
ICP-Plane 方法 <sup>[13]</sup> 配准后	0.33	0.25	0.26
本方法配准后	0.12	0.22	0.17

- bathymetric point cloud[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(4): 614-623.
- [3] 李玉美, 郭庆华, 万波, 等. 基于激光雷达的自然资源三维动态监测现状与展望[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 381-402.  
LI Yumei, GUO Qinghua, WAN Bo, et al. Current status and prospect of three-dimensional dynamic monitoring of natural resources based on LiDAR[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 381-402.
- [4] 宋艳朋, 梁佳. 机载激光测深数据处理研究综述[J]. *测绘与空间地理信息*, 2023, 46(7): 45-47.  
SONG Yanpeng, LIANG Jia. Overview of research on data processing of airborne laser bathymetry[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46(7): 45-47.
- [5] 刘强, 翟国君, 卢秀山. 船载多传感器一体化测量技术与应用[J]. *测绘通报*, 2019(10): 127-132.  
LIU Qiang, ZHAI Guojun, LU Xiushan. Application of ship-borne integrated measurement system in water and above[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(10): 127-132.
- [6] 亓超, 宿殿鹏, 王贤昆, 等. 基于分层异构模型的机载激光测深波形拟合算法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 114-121.  
QI Chao, SU Dianpeng, WANG Xiankun, et al. Fitting algorithm for airborne laser bathymetric waveforms based on layered heterogeneous model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 114-121.
- [7] 陈传法, 王梦樱, 杨帅, 等. 适用于林区机载 LiDAR 点云的多分辨率层次插值滤波方法[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2): 12-20.  
CHEN Chuanfa, WANG Mengying, YANG Shuai, et al. A multi-resolution hierarchical interpolation-based filtering method for airborne LiDAR point clouds in forest areas[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2021, 40(2): 12-20.
- [8] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [9] 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): 312-319.  
LI Renzhong, YANG Man, TIAN Yu, et al. Point cloud registration algorithm based on the ISS feature points combined with improved ICP algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 312-319.
- [10] 荆路, 武斌, 方锡禄. 基于 SIFT 特征点结合 ICP 的点云配准方法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(7): 944-950.  
JING Lu, WU Bin, FANG Xilu. Point cloud registration method based on the SIFT feature points combined with ICP algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(7): 944-950.
- [11] LI J W, ZHAN J W, ZHOU T. Point cloud registration and localization based on voxel plane features[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 188: 363-379.
- [12] 张海啸, 钟若飞, 孙海丽. 顾及平面特征的车载激光扫描系统外参数标定法[J]. *测绘学报*, 2018, 47(12): 1640-1649.  
ZHANG Haixiao, ZHONG Ruofei, SUN Haili. External parameter calibration method of vehicle laser scanning system based on planar features[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(12): 1640-1649.
- [13] LOW K L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration[M]. Chapel Hill: University of North Carolina, 2004, 4(10): 1-3.
- [14] BAEK J, PARK J, CHO S. 3D global localization in the underground mine environment using mobile LiDAR mapping and point cloud registration[J/OL]. *Sensors*, 2022, 22. DOI: 10.3390/s22082873.
- [15] JIANG S, JIANG W S. Reliable image matching via photometric and geometric constraints structured by Delaunay triangulation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 153: 1-20.
- [16] YOON S J, KIM T. Fast UAV image mosaicking by a triangulated irregular network of bucketed tiepoints[J/OL]. *Remote Sensing*, 2023, 15. DOI: 10.3390/rs15245782.

(责任编辑:高丽华)