



融合激光雷达和惯性导航的船舶靠离泊高精度定位方法

贺治卜 闫文洲 柳晨光 初秀民 刘新宇

High-precision berthing and unberthing ship positioning method by fusing LiDAR and inertial navigation system

HE Zhibo, YAN Wenzhou, LIU Chenguang, CHU Xiumin, LIU Xinyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03858>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能船舶靠泊技术研究热点与趋势

Research hotspots and tendency of intelligent ship berthing technology

中国舰船研究. 2024, 19(1): 3-14 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03199>

基于零空间的船舶自主靠泊自抗扰控制分配

Null-space-based active disturbance rejection control allocation for ship autonomous berthing

中国舰船研究. 2024, 19(1): 128-136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03488>

基于混合A*搜索和贝塞尔曲线的船舶进港和靠泊路径规划算法

Path planning for auto docking of underactuated ships based on Bezier curve and hybrid A* search algorithm

中国舰船研究. 2024, 19(1): 220-229 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03232>

基于改进反步滑模控制算法的拖轮自主靠泊控制

Autonomous berthing control of tugboat based on improved backstepping sliding mode control algorithm

中国舰船研究. 2024, 19(1): 119-127 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03227>

船舶螺旋桨推力的在线高精度辨识方法

Online high-precision identification method for ship propeller thrust

中国舰船研究. 2024, 19(3): 310-318 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03112>

基于多源观测的无人艇回收系统设计

Design of unmanned surface vehicle docking system based on multi-source observation

中国舰船研究. 2024, 19(5): 214-222 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03407>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03858>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 贺治卜, 闫文洲, 柳晨光, 等. 融合激光雷达和惯性导航的船舶靠离泊高精度定位方法[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(X): 1-9.

HE Z B, YAN W Z, LIU C G, et al. High-precision berthing and unberthing ship positioning method by fusing LiDAR and inertial navigation system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(X): 1-9 (in Chinese).

融合激光雷达和惯性导航的船舶 靠离泊高精度定位方法



扫码阅读全文

贺治卜^{1,2}, 闫文洲^{1,2}, 柳晨光^{*1,3}, 初秀民^{1,3,4}, 刘新宇^{1,3}

1 水路交通控制全国重点实验室(武汉理工大学), 湖北 武汉 430063

2 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063

3 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063

4 闽江学院 物理与电子信息工程学院, 福建 福州 350121

摘要: [目的] 为了满足船舶靠离泊过程中近距离高精度感知的需求, 提出一种融合激光雷达和惯性导航系统的高精度定位方法。 [方法] 首先, 构建船舶航行的多坐标转换和时间配准算法, 实现感知设备在时间和空间上的统一, 并对采集的点云数据进行校正和滤波处理; 其次, 提出一种改进的随机采样一致性算法(RANSAC), 通过引入泊位高程来确定聚类阈值, 并优化聚类成本函数, 从而降低点云数据随机性对岸线检测精度的影响; 最后, 将识别的岸线交集作为泊位的特征点, 辅助无人艇(USV)进行定位, 并通过实船验证该方法的感知效果。 [结果] 实验结果表明, 该定位方法可为船舶提供误差小于 0.256 m 的定位信息, 同时在实际环境中对各种干扰有较强的适应性。 [结论] 改进 RANSAC 船舶靠离泊定位方法在点云数据质量较差的前提下, 仍能保证较高的定位精度。

关键词: 无人艇; 系泊; 靠离泊; 导航; 定位; 激光雷达; RANSAC 算法

中图分类号: U675.79

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03858

0 引言

船舶近距离低速靠离泊操作中, 对船体运动状态的精确感知至关重要, 这直接关系到操作的安全和效率^[1]。然而, 传统船舶感知系统在近距离低速环境下对船体运动状态的估计仍存在误差, 难以实时获取准确获取船位、靠泊距离、靠泊速度和靠泊角等关键参数^[2], 无法为控制模块提供可靠的数据支持。随着船舶向大型化发展, 这种误差会增加操作风险, 进一步凸显了提高近距离感知精度的必要性^[3]。

为了减小靠离泊感知误差, 目前多采用新的测速、测距装置来优化感知系统^[4]。目前船舶靠离泊感知方法大致可分为两类^[5]: 基于岸基的靠离泊感知方法和基于船载传感器的靠离泊感知方法。针对基于岸基的靠离泊感知方法, Perkovic 等^[6]

提出了激光测距系统, 并将该系统用于斯洛文尼亚的科佩尔港, 成功测量了大型集装箱船与码头的距离和靠泊速度。Kim 等^[7]采用智能视觉监控系统来估计船舶与泊位的相对距离。激光系统具有高精度和快速反应的优势, 确保数据的及时性, 但一维和二维激光系统难以准确识别目标船舶。为此, 闫晓飞等^[8]提出了靠泊信息提取系统, 通过 3D 激光雷达捕捉并构建目标船舶的三维几何形状, 从而实现对船舶的靠泊距离、靠泊角和靠泊速度的测量。针对基于船载传感器的靠离泊感知方法, Leite 等^[9]利用三维激光技术提取了泊位的几何特征, 以估计船舶相对泊位的位置和朝向。Szelangiewicz 等^[10]在无人艇(USV)仿真环境中进行了靠泊试验, 利用单线激光雷达测定船舶与泊位距离, 但忽视了无人艇在横摇、纵摇方向的波动, 感知精度在真实海洋环境中可能有所降低。

收稿日期: 2024-04-02 修回日期: 2024-05-21 网络首发时间: 2025-01-15 08:05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2602305); 湖北省重点研发计划项目(2023DJC175); 广西重点研发计划项目(桂科 AA23062052); 福建省科学技术协会科技创新智库课题研究项目(FJKX-2022XKB016)

作者简介: 贺治卜, 男, 1998 年生, 博士生。研究方向: 船舶智能航行决策。E-mail: he_zhi_bo@whut.edu.cn

柳晨光, 男, 1988 年生, 副研究员。研究方向: 船舶智能航行控制。E-mail: liuchengguang@whut.edu.cn

*通信作者: 柳晨光

Martinsen 等^[11]采用超声波距离传感器测量靠泊距离,以实时计算安全操作区域,该方法可以精确检测无人艇到岸线的距离,但无法实现对泊位距离的检测。在当前研究中,研究人员主要聚焦于对岸线距离检测和三自由度泊位检测,而针对靠离泊过程中从泊位检测到距离感知再到最终的船舶靠离泊定位的研究较少。此外,由于船舶靠离泊过程中感知设备会受到不同程度的干扰^[12],容易出现测量误差,仅使用单一的感知设备难以准确地感知船舶的位姿。同时,在靠离泊过程中,船体在横摇、纵摇、艏摇方向的波动将导致激光雷达、视频等传感设备的测量结果出现波动。然而,当前的研究中,研究人员往往忽视了对这些波动的补偿,尤其是在横摇和纵摇两个方向。

为此,本文将采用一种融合激光雷达和惯性导航的船舶靠离泊定位方法,以实现高精度定位。首先,研究不同感知设备在时间和空间上的统一算法,利用惯导数据修正激光点云的测量波动,实现点云“防抖”;其次,提出一种改进的随机采样一致性算法(random sample consensus, RANSAC),用于检测泊位岸线,并将识别的岸线交集作为泊位的特征点,辅助船舶进行定位;最后,在相关大型无人艇靠离泊感知实验中对所提算法进行验证。

1 问题描述与相关理论

本文主要解决船舶靠离泊时的泊位识别和定位问题,按照不同参考坐标系可以将该问题分为两种类型^[13]:一是船舶在某一固定坐标系下的定位问题,二是船舶附体坐标系下障碍物识别与定位的问题。这两种类型的问题可以互相通过坐标映射的方式实现多传感器的数据融合。

1.1 导航坐标系定义

本文涉及的坐标系包括5种:地球惯性坐标系(earth-centered inertial frame, ECI) $O_i - x_i y_i z_i$ 、北东地坐标系(north-east-down frame, NED) $O_n - x_n y_n z_n$ 、附体坐标系(body-fixed frame, BF) $O_b - x_b y_b z_b$ 、激光雷达构建地图坐标系^[14](LiDAR mapping frame, LR) $O_{lr} - x_{lr} y_{lr} z_{lr}$ 和局部坐标系(local coordinate frame, LC) $O_c - x_c y_c z_c$,具体定义方式如图1所示。图中,局部坐标系选用船舶开始离泊时的激光雷达位置为原点, x_c 轴、 y_c 轴、 z_c 轴的方向分别是平行、垂直于岸线的长边和竖直向上。

船舶可通过全球导航卫星系统(GNSS)获取自身在地球惯性坐标系的位置,将ECI坐标系转换为NED坐标系。若忽视高度信息,则可以完全转换为NED坐标系,具体方法在此不予赘述,本

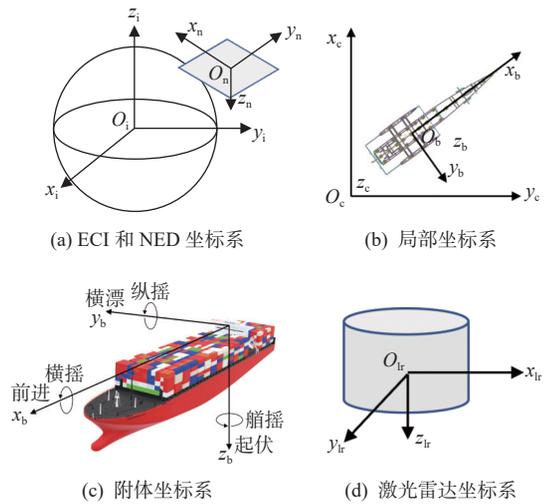


图1 坐标系定义

Fig. 1 Coordinate systems definition

文最后的结果是在局部坐标系中呈现。

船端的感知设备,例如惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)所测得的数据是基于船舶的附体坐标系。在附体坐标系中,坐标轴 x_b 指向船首,坐标轴 y_b 指向右舷,坐标轴 z_b 指向龙骨。IMU测量船舶在这3个坐标轴的位移和旋转。在进行定位时,需要先将船舶在附体坐标系下的位移和旋转转换到NED坐标系下。

激光雷达在测量时,也有自身的地图坐标系,这一坐标系与船舶的附体坐标系类似,坐标轴 x_{lr} 指向雷达正前方,坐标轴 y_{lr} 指向雷达正右边,坐标轴 z_{lr} 指向正下方。在已知激光雷达在船舶的安装位置和安装角度的前提下,坐标系 $O_{lr} - x_{lr} y_{lr} z_{lr}$ 可以通过旋转、平移的方式转换到坐标系 $O_b - x_b y_b z_b$, 这样可以将激光雷达的点云数据转换到附体坐标系中。为方便绘图,本文的显示坐标系均为局部坐标系,但数据的处理、空间转换的基准坐标系是NED坐标系。

1.2 导航坐标转换

本文主要以NED坐标系作为展示与结果分析的坐标系,其余坐标系均需要转换到NED坐标系下。NED坐标系的原点设定为初始状态下船舶的位置,以此为参考完成地球惯性坐标系与NED坐标系之间的相互转换。

船舶附体坐标系中 x_b, y_b, z_b 三轴的速度分量和旋转角度为 $\{u, v, w, \varphi, \theta, \psi\}$, 该信息由IMU测得。船舶附体坐标系中的运动可通过以下公式转换为NED坐标系下的运动:

$$R_c(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_b^n(\psi, \theta, \varphi) = \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\varphi) \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_n(k+1) = \mathbf{P}_n(k) + h \mathbf{R}_b^n(\Theta_b(k)) \mathbf{v}_b(k) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}_z(\psi)$, $\mathbf{R}_y(\theta)$, $\mathbf{R}_x(\varphi)$ 分别为绕 z , y , x 三轴旋转 ψ, θ, φ 度的旋转矩阵; $\mathbf{R}_b^n(\psi, \theta, \varphi)$ 为附体坐标系旋转到 NED 坐标系的欧拉角旋转矩阵; $\mathbf{P}_n(k+1)$ 为 NED 坐标系下船舶在 $k+1$ 时刻的位置; h 为采样时间; $\Theta_b(k)$ 为 k 时刻船舶的三轴姿态角; $\mathbf{v}_b(k) = \{u, v, w\}$ 为 k 时刻船舶三轴的速度分量。

激光雷达与 IMU 的安装位置和角度可能存在不可避免的偏差, 因此需要将点云坐标系的数据转换到船舶附体坐标系, 然后通过 IMU 数据将其转换到 NED 坐标系。点云坐标系到附体坐标系的处理方式与附体坐标系到 NED 坐标系类似。定义点云坐标系旋转到附体坐标系的欧拉角旋转矩阵为 $\mathbf{R}_r^b(\psi, \theta, \varphi)$; 其次, 因为激光雷达与船舶相对静止, 仅需要建立一个平移矩阵 $\mathbf{T}_r^b(X, Y, Z)$ 来修正这一偏移量。激光点云在 k 时刻时, 其中一点的坐标为 $\mathbf{P}_i(k)$, 可由式 (6) 计算。

$$\mathbf{P}_b(k) = \mathbf{T}_r^b(X, Y, Z) + \mathbf{R}_r^b(\Theta_b(k)) \mathbf{P}_i(k) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{P}_b(k)$ 为该点在船舶附体坐标系中的位置, 通过附体坐标系到 NED 坐标系的转换。激光雷达生成的点云坐标将被转换至 NED 坐标系中, 如图 2 所示。

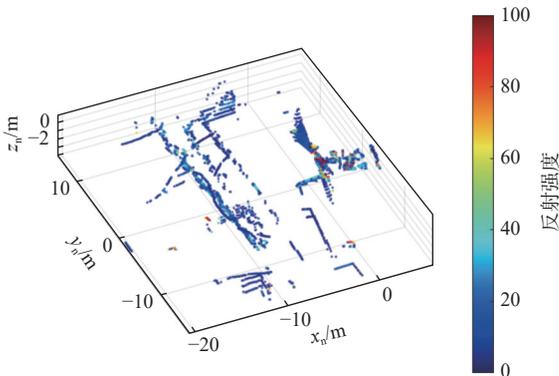


图 2 北东地坐标系下的点云图

Fig. 2 Point cloud in NED coordinate system

1.3 硬件参数与时间配准

通过上述工作, 原始激光点云数据已被转换为 NED 坐标系下点云数据格式, 下一步需对靠离

泊位等进行识别并定位。船舶靠离泊定位只需基于二维平面进行计算分析。为便于描述, 本文选择一艘船长 45 m、船宽 12 m 的大型无人艇作为研究对象进行说明, 该无人艇以船载的激光雷达安装点作为船体固定点。以泊位内凹点作为泊位特征点, 如图 3 所示。其中, 激光雷达为 16 线, 采样频率为 10 Hz。IMU 和 GNSS 的采样频率分别为 50 和 10 Hz。通过识别泊位的岸线以及各岸线的交会处, 可实现对泊位特征点的定位。由于各传感器的采样频率存在差异, 需要对激光点云进行时间上的配准。选择 10 Hz 作为处理的基准频率, 并对 IMU 的数据进行相应的采样调整, 从而确保各传感器的数据在时间上保持一致。

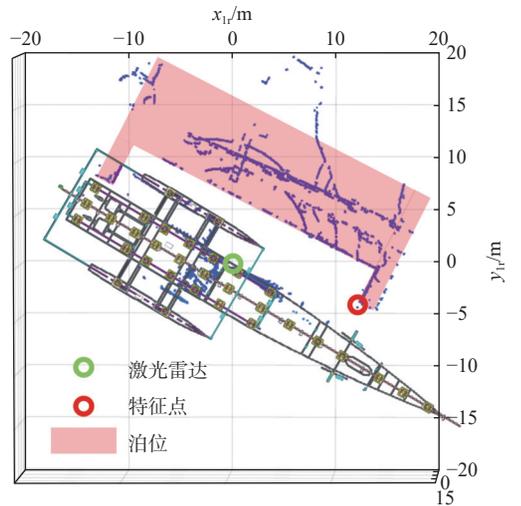


图 3 靠离泊点云特征点提取

Fig. 3 Feature point extraction of berthing and unberthing point cloud

2 船舶靠离泊感知数据处理

单一传感器难以满足船舶靠离泊信息感知的要求。例如, GNSS 定位虽然存在一定经纬度漂移问题, 但其在距离泊位较远的地方仍然能保证定位精度; 激光雷达定位精度高, 但在靠离泊这种复杂场景下, 其与泊位距离较远时, 泊位的点云数量会下降, 从而降低了定位精度。因此, 船舶靠离泊感知有必要使用多传感器数据进行融合互补。

2.1 点云预处理

原始的三维点云数据需要转化为泊位特征点。首先, 对点云数据进行预处理, 包括点云数据格式转换、坐标转换等, 其中坐标转换已在 1.2 节中进行了描述。

其次, 为实现船舶的靠离泊定位, 还需对点云数据去噪处理。本文采用统计滤波算法来剔除点云中的噪声点数据, 激光点云滤波效果如图 4 所

示,其中噪声点数据的来源主要包括扫描得到的泊位附近的固定设施点云数据和水面波动产生的噪声点,此处对点云数据进行统计分析,以识别出水面波动所产生的噪声点数据并将其滤除;而固定设施噪声点一般数据量较大,去除起来比较困难,本文通过所提改进的RANSAC算法识别出岸线,设置阈值从而剔除该噪声点数据。

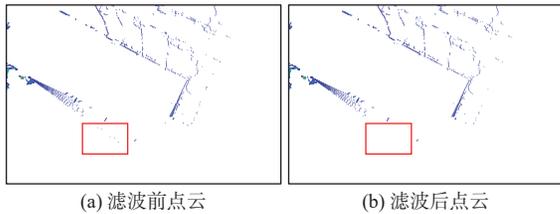


图4 激光点云滤波效果
Fig. 4 Laser point cloud filtering effect

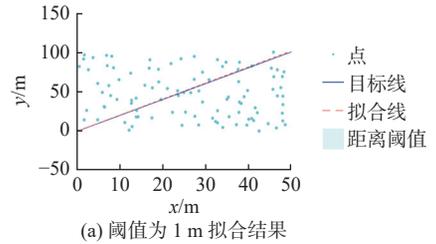
2.2 基于改进的RANSAC算法岸线提取

2.2.1 改进的RANSAC算法

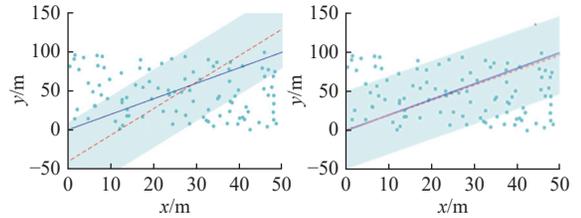
本文采用RANSAC算法的直线拟合模型来拟合岸线。该算法通过随机采样一小部分数据点来估计模型参数,并使用这个估计的模型对整个数据集进行验证。RANSAC算法具有鲁棒性强、适用于参数化模型、阈值可调整的特点,能够在存在大量离群点的情况下找到最佳拟合模型^[15]。在靠离泊场景中往往存在水面波动或潮汐等因素导致的离群点,岸线也可以用参数化模型来表示。因此,本文采用RANSAC算法来拟合岸线。但若将RANSAC算法直接用于岸线提取,将会面临以下问题:1)要合理确定算法中输入的距离阈值,否则拟合的效果会较差^[16];2)由于在迭代过程中,该步骤的成本函数是符合约束的内点的个数,若用于提取岸线,岸基建筑点云和噪声样本点云可能被视为内点,从而增加内点数量,造成误差,降低性能。

为了验证上述问题,设计了一个实验。所设计的样本符合 $y = 2x$ 线性模型,同时引入环境噪声作为干扰值。选择不同的距离阈值来拟合直线。其中,图5(a)展示了阈值为1 m时的拟合结果,图5(b)和图5(c)是阈值为50 m时的拟合结果。经过对比发现,在图5(b)中,样本的拟合是不准确的;相反,在合适的阈值1 m下,样本的拟合更为准确。此外,图5(b)和图5(c)是距离阈值均设置为50 m时的拟合结果,出现两种不同的拟合结果是因为RANSAC算法在搜索内点时存在随机性,以及筛选最优模型的成本函数不合适。

因此,本文提出一种基于RANSAC的新型岸线提取算法,以便更精确地提取岸线,更好地适



(a) 阈值为1 m拟合结果



(b) 阈值为50 m拟合结果1 (c) 阈值为50 m拟合结果2

图5 RANSAC算法在不同距离阈值下的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of RANSAC algorithm under different distance thresholds

用于靠离泊的各种场景。在本研究中,主要的检测目标为泊位,因此参照文献[16]中的方式,将泊位的高程(露出水面的高度)作为距离阈值的设定依据,如图6所示。其中,受到涨落潮的影响,泊位的高程范围为 (h_1, h_2) ,激光雷达安装的高程为 h_3 。取涨潮时泊位高程 h_1 为距离阈值,保证RANSAC聚类的点云都处于泊位区域。

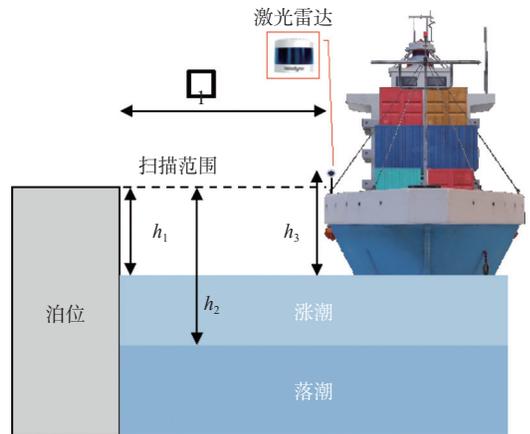


图6 激光雷达靠离泊测量示意图

Fig. 6 Schematic of LiDAR berthing and unberthing measurement

此外,还提出了一种考虑岸基到船载激光雷达距离特征的成本函数,如式(7)所示,不再使用符合约束的内点个数来筛选最优模型,而是将符合约束的内点继续进行分类,不同类别的内点对成本函数有不同的影响比重。在此基础上,可以减少随机性的影响,使算法效果更好^[17]。

$$C(d, \sigma) = \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{d(P_i, L)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: C 为总成本; N 为点云的数量; P_i 为第 i 个点的坐标; L 为目标直线; $d(P_i, L)$ 为点到目标直线的距离; σ 为衰减函数的标准差,控制成本函数的衰

减速度。

图 7 所示为改进后的 RANSAC 算法流程。通过估计最优距离阈值并设计更适用于靠离泊场景的成本函数,减小噪声点对结果的影响。在岸线提取阶段,对三维激光点云进行处理。基于对实验所采集数据的观测,将最小内点的个数设定为 50,迭代次数设定为 500。为了检测泊位的多条岸线,对每次运行 RANSAC 算法的包含点云集进行剔除,然后在剩余点云中继续运行算法,以找到所有的泊位直线点云合集。在识别所有岸线后,计算所识别岸线之间的交点,并选择距离局部坐标系原点更近的点作为特征点。通过坐标转换,可获得特征点在各个坐标系下的位置信息。

2.2.2 岸线提取效果分析

本节主要测试改进 RANSAC 算法在岸线点云数据较稀疏、较稠密以及岸基建筑噪声点较多等不同情况下的提取效果,并与常规 RANSAC 算法进行比较,以验证本文所提方法的有效性和适用性。

在靠离泊场景中,本文提出的改进 RANSAC

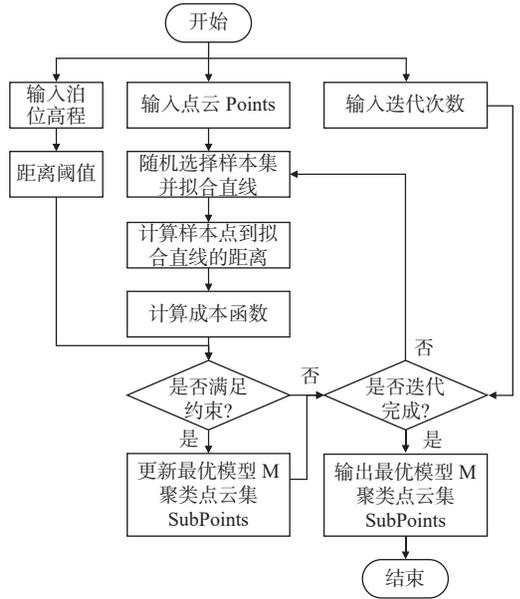


图 7 改进 RANSAC 算法流程图

Fig. 7 Flowchart of the improved RANSAC algorithm

算法对岸线的识别效果如图 8 所示。其中,聚类后的点云集和聚类生成的岸线最优模型将被用于后续的靠离泊定位中。

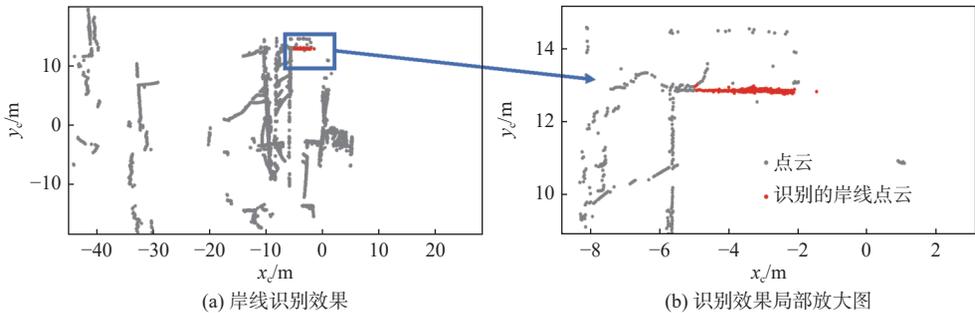


图 8 基于改进 RANSAC 算法的点云岸线识别结果

Fig. 8 Point cloud shoreline recognition results based on improved RANSAC algorithm

常规 RANSAC 和改进 RANSAC 算法在离泊过程中的岸线提取结果对比如图 9 所示。其中,图 9(a)和图 9(b)分别表示在场景 1 和场景 2 下,无人艇开始离泊时的岸线提取效果对比。图 9(c)和图 9(d)分别表示在场景 3 和场景 4 下,离泊过程中的岸线提取效果对比。图中,灰色点为激光雷达获取的点云数据,红线和绿线分别为使用常规 RANSAC 算法和改进 RANSAC 算法的提取结果。不同场景下提取岸线与实际岸线的偏差角如表 1 所示。

当无人艇开始离泊时,运用常规 RANSAC 算法所提取的岸线与实际岸线的偏差角为 $3^{\circ}39'$,改进 RANSAC 算法的偏差角为 $1^{\circ}10'$ 。此时,两种算法的提取精度比较接近,这是因为船舶距离泊位较近,激光雷达采集到的泊位点云数据比较完整。当无人艇开始运动时,运用常规 RANSAC 算

法所提取的岸线和实际岸线的偏差角为 $29^{\circ}19'$,而改进 RANSAC 算法的偏差角仅为 $1^{\circ}13'$ 。两种结果相差较大,改进 RANSAC 算法的提取精度明显优于常规 RANSAC 算法。这是由于激光雷达可能受到距离、船舶姿态变化的影响,采集到的岸线点云数据不完整且数量较少,而且常规算法以符合距离阈值约束的内点个数作为选择模型的成本函数,会使激光雷达扫描到的岸基建筑的点云数据对拟合岸线的结果造成影响^[18],导致误差较大。在激光雷达采集数据较稀疏的情况下,改进 RANSAC 算法表现出较明显的优势;当点云数据较稠密时,改进 RANSAC 算法仍有较好效果。

3 实验验证

本文的实验验证采用了于 2023 年 5 月 15 日在某海域采集的船长 45 m、船宽 12 m 的无人艇

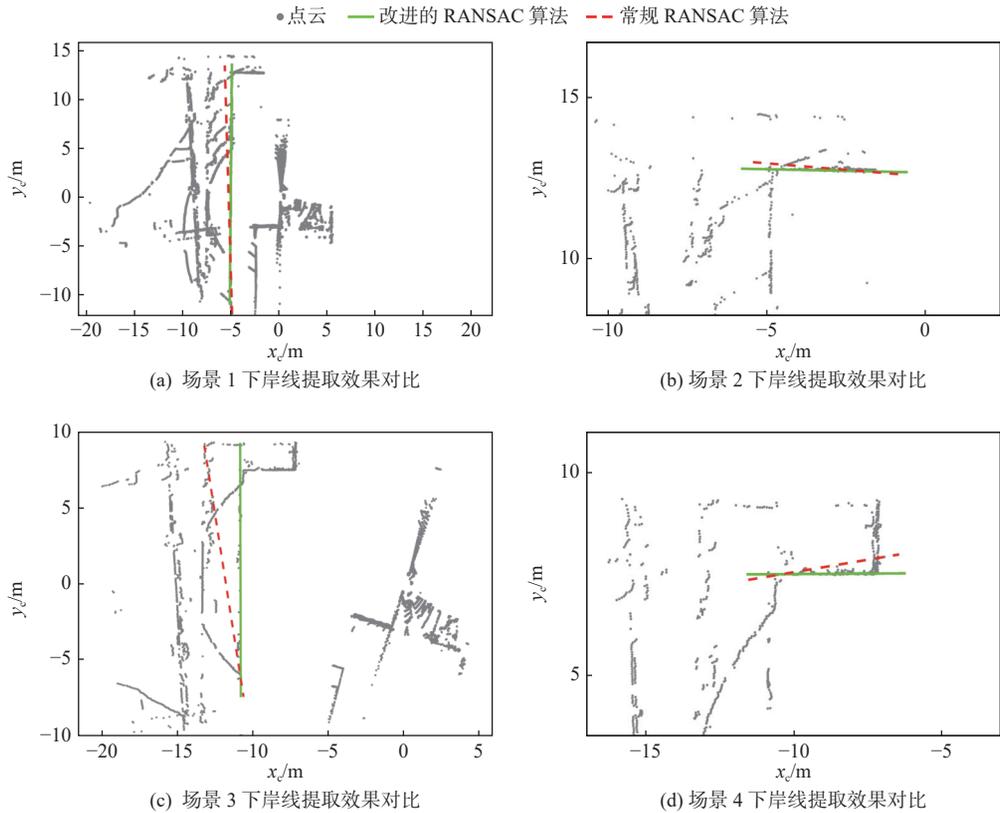


图9 离泊过程岸线提取结果对比图

Fig. 9 Comparison of shoreline extraction results during unberthing process

表1 不同方法提取岸线与实际岸线的偏差角

Table 1 Deviation angles between extracted shorelines and actual shoreline by different methods

场景	点云密度	常规RANSAC 岸线偏差角	改进RANSAC 岸线偏差角
场景1	稠密	9°48'	1°7'
场景2	稠密	3°39'	1°10'
场景3	稀疏	29°19'	1°13'
场景4	稀疏	6°31'	0°56'

离泊实验数据, 靠离泊测试场景如图10所示。

当无人艇远离泊位时, 激光雷达点云数据过于稀疏, 在点云识别层面的精度已经无法保障。因此, 实验选取了无人艇离泊过程中的前800帧(80 s, 4000条IMU数据)激光点云作为数据测试案例。

无人艇的三轴角度变化如图11所示。无人



图10 靠离泊测试场景

Fig. 10 Berthing and unberthing test scenario

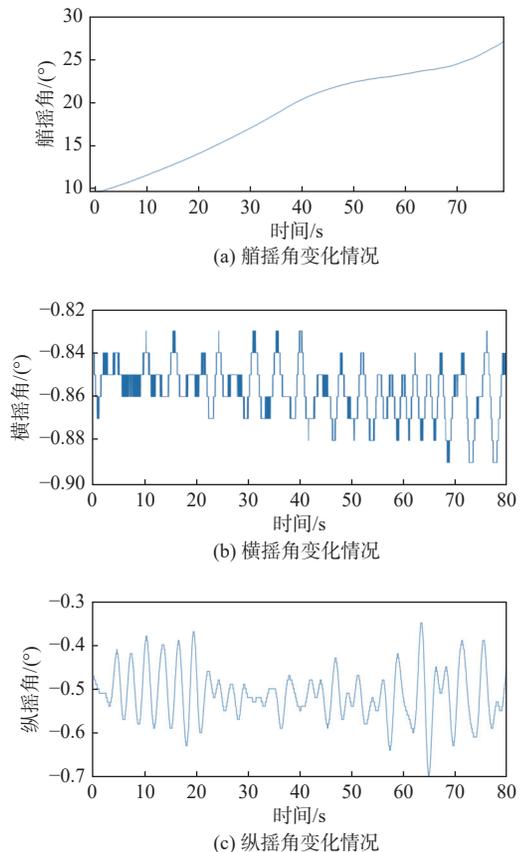


图11 靠离泊过程中无人艇三轴变化情况

Fig. 11 Changes in three axes of USV during berthing or unberthing process

艇的运动主要在船摇方向, 而在另外两轴的波动较小。无人艇的轨迹如图12所示, 坐标原点为实

验开始时刻无人艇的位置。其中 IMU 生成的无人艇轨迹是由 IMU 东速北速积分而得。GNSS 数据是由实时更新的定位信息与实验起始时刻的定位信息通过经纬度到平面的坐标转换得出。由图 12 可以看出, GNSS 数据存在一定波动, 而且 GNSS 数据和 IMU 数据之间存在相位偏移, 这是由于 IMU 和 GNSS 的安装位置不同、无人艇转向时的转心也不同。

通过将 IMU 数据作为激光雷达的姿态补偿, 整个离泊过程可被映射到 NED 坐标系中(图 13)。图 13(a)为离泊起始时刻的点云, 图 13(b)为离泊结束时刻的点云。在离泊过程中, 无人艇的运动轨迹、开始和结束时刻点云以及这两个时刻特征点在局部坐标系中的位置如图 14 所示。由图可以观察到特征点定位存在漂移的情况。这一漂移

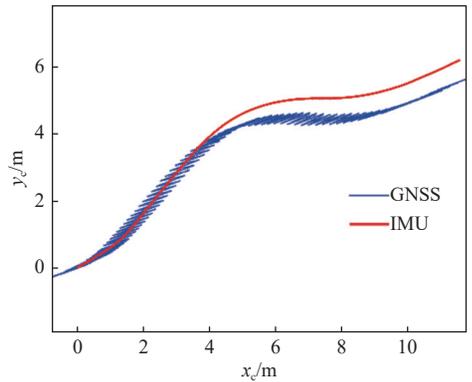


图 12 靠泊过程 GNSS 和 IMU 的无人艇轨迹

Fig. 12 Trajectory of USV during berthing and unberthing using GNSS and IMU

误差是因 IMU 对激光雷达位移补偿的偏差所致, IMU 与激光雷达的安装位置不同, 其在空间上的运动轨迹也不相同, 所以此误差难以避免。

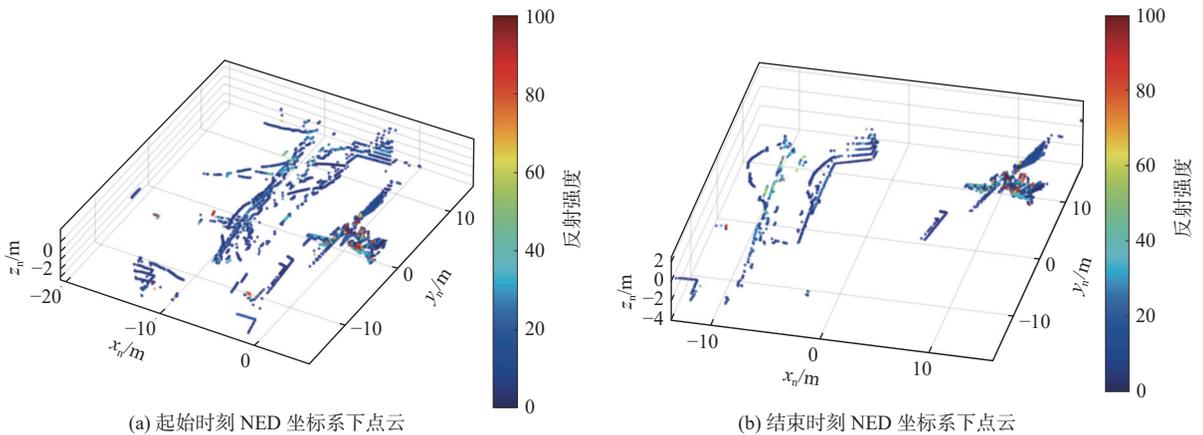


图 13 实验过程点云变化图

Fig. 13 Point cloud changes during experimental process

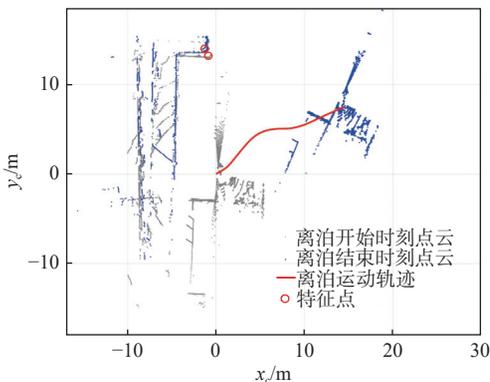


图 14 无人船离泊过程的运动轨迹与开始、结束时刻的特征点位置

Fig. 14 Motion trajectory of USV during unberthing process and feature point positions at start and end moments

值得注意的是, 传统 RANSAC 算法造成的误差已经通过 2.2 节使用的方法得以消除, 利用激光雷达定位具有一定的可靠性, 但在距离较远、点云稀疏时, 激光雷达的定位误差仍然会逐渐增

大。本文在前期对检测的特征点进行了精确的经纬度坐标标定, 通过计算无人艇 GNSS 实时定位数据与特征点坐标经纬度, 可以获取 GNSS 定位距离。同理, 基于 IMU 中东速、北速的积分, 可以获得更加精确的无人艇到特征点的距离信息。经验证, 实验所用的 IMU 在 1 min 内的测量误差约为 0.056 m, 明显小于 GNSS 方法以及激光雷达融合算法的值。因此, 可将这一基于 IMU 的距离作为测量基准值(图 12)。采用不同方法测量的无人艇到岸线特征点的距离变化如图 15 所示。其中, 3 条线分别代表融合激光雷达和 IMU 两种传感器所得到的距离变化曲线、使用单个 GNSS 传感器定位得到的距离变化曲线, 以及距离变化基准值曲线。计算得出, 本文方法的平均测量误差为 0.256 m, 最大测量误差为 0.596 m。而 GNSS 测量结果的平均误差为 0.478 m, 最大测量误差为 0.839 m。本文方法的精度相比于 GNSS 提升了 46.4%。此外, 采用 GNSS 方法进行靠泊

泊定位还需要先确定泊位特征点的高精度经纬度坐标,而本文所提方法只需要预先估算泊位的高程,即可获得更加精确的定位信息。文献[18]所采用的岸基测量方法可以提供平均误差为0.810 m的测距信息,与之相比,本文所采用的船

载方案可以提升约68.4%的精度。值得注意的是,图15所示激光雷达和GNSS曲线与距离变化基准值曲线始终存在一定偏移,这是由于无人艇上的雷达、IMU和GNSS天线的安装位置有所不同所致。

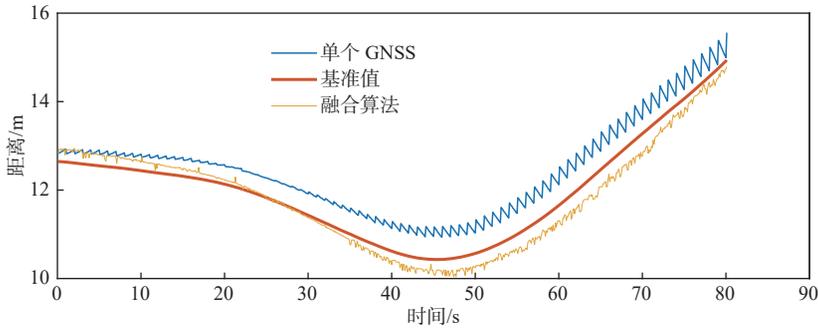


图15 不同定位方法到特征点的距离对比

Fig. 15 Distances from different positioning methods to feature point

4 结 语

本文融合激光雷达、IMU、GNSS感知数据对无人艇靠离泊高精度定位问题进行了研究。在对各感知设备数据进行时空配准基础上,提出了一种基于改进RANSAC的岸线提取方法,将多岸线重合的交点作为泊位的特征点,实现船舶在坐标系中的定位,并提高了检测岸线的精度。实验结果表明,本文提出的改进RANSAC算法能够为船舶提供误差在0.256 m以内的可靠定位信息,具有更强的稳定性和可靠性。该方法能发挥激光雷达测距精度高的优势,为船舶靠离泊定位相关研究提供参考。

但是,本文方法也存在一定的局限性。在硬件层面,其受到激光雷达的视场角与线程约束。以本研究所采用的16线激光雷达为例,其对泊位感知的有效距离约为30 m。超过这一距离后,激光点云会变得极为稀疏,无法稳定探测到泊位。在算法层面,本文方法需要预估泊位高程,在泊位高程较小的情况下,算法的识别精度可能降低。

在未来的研究中,可采用更高性能的激光雷达设备,或者采用视觉信息提前识别泊位的方位、高程的参考信息,提升算法对泊位的识别精度。此外,在后续靠离泊感知问题中,可考虑采用远程、近程传感器设备,获取完整流程的靠离泊定位信息。利用激光雷达、毫米波雷达等近距离传感器获取精度较高的感知定位信息,同时结合远距离探测设备以降低成本。通过多种设备的交替使用,实现全流程的靠离泊感知。

参考文献:

- [1] 李国帅,张显库,张安超. 智能船舶靠泊技术研究热点与趋势[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 3-14.
LI G S, ZHANG X K, ZHANG A C. Research hot-spots and tendency of intelligent ship berthing technology [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 3-14 (in Chinese).
- [2] HU B, LIU X W, JING Q F, et al. Estimation of berthing state of maritime autonomous surface ships based on 3D LiDAR[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 251: 111131.
- [3] 刘佳仑,董智霖,李诗杰,等. 基于改进反步滑模控制算法的拖轮自主靠泊控制[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 119-127.
LIU J L, DONG Z L, LI S J, et al. Autonomous berthing control of tugboat based on improved backstepping sliding mode control algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 119-127 (in Chinese).
- [4] 李小毛,张鑫,王文涛,等. 基于3D激光雷达的无人水面艇海上目标检测[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(1): 27-36.
LI X M, ZHANG X, WANG W T, et al. 3D Lidar-based marine object detection for USV[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(1): 27-36 (in Chinese).
- [5] 严新平,王树武,马枫. 智能货运船舶研究现状与发展思考[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 1-6.
YAN X P, WANG S W, MA F. Review and prospect for intelligent cargo ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 1-6 (in Chinese).
- [6] PERKOVIC M, GUCMA M, LUIN B, et al. Accommodating larger container vessels using an integrated laser system for approach and berthing[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2017, 52: 106-116.
- [7] KIM H, KIM D, PARK B, et al. Artificial intelligence vision-based monitoring system for ship berthing[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 227014-227023.
- [8] 闫晓飞,刘泽西,李颖,等. 基于激光三维视觉的船舶靠泊动态监测技术[J]. *激光与红外*, 2016, 46(12): 1452-1458.

- YAN X F, LIU Z X, LI Y, et al. Ship berthing dynamic monitoring technology based on laser 3D vision[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(12): 1452–1458 (in Chinese).
- [9] LEITE P, SILVA R, MATOS A, et al. An hierarchical architecture for docking autonomous surface vehicles[C]// 2019 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). Porto, Portugal: IEEE, 2019: 1–6.
- [10] SZELANGIEWICZ T, ŻELAZNY K, ANTOSIK A, et al. Application of measurement sensors and navigation devices in experimental research of the computer system for the control of an unmanned ship model[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1312.
- [11] MARTINSEN A B, BITAR G, LEKKAS A M, et al. Optimization-based automatic docking and berthing of ASVs using exteroceptive sensors: theory and experiments[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 204974–204986.
- [12] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 18–31.
WANG Y Y, LIU J L, MA F, et al. Review and prospect of remote control intelligent ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 18–31 (in Chinese).
- [13] 柳晨光, 郭珏菡, 吴勇, 等. 无人水面艇三维激光雷达目标实时识别系统 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(4): 202–211.
LIU C G, GUO J H, WU Y, et al. 3D LiDAR based real-time object recognition system for unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 202–211 (in Chinese).
- [14] MIYAUCHI Y, SAWADA R, AKIMOTO Y, et al. Optimization on planning of trajectory and control of autonomous berthing and unberthing for the realistic port geometry[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110390.
- [15] CANAZ SEVGEN S, KARSLI F. An improved RANSAC algorithm for extracting roof planes from airborne LIDAR data[J]. *The Photogrammetric Record*, 2020, 35(169): 40–57.
- [16] CAO R, WANG Y, ZHANG Y, et al. Optimal time selection for ISAR imaging of ship target via novel approach of centerline extraction with RANSAC algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 9987–10005.
- [17] LI N, SHEN Q Y, WANG L, et al. Optimal time selection for ISAR imaging of ship targets based on time-frequency analysis of multiple scatterers[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4017505.
- [18] 兰加芬, 郑茂, 初秀民, 等. 基于激光雷达的船舶位姿感知方法研究 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*. (2023-07-10) [2024-04-02]. doi: 10.13203/j.whugis20220792.
LAN J F, ZHENG M, CHU X M, et al. Ship position and attitude sensing method based on Lidar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. (2023-07-10) [2024-04-02]. doi: 10.13203/j.whugis20220792 (in Chinese).

High-precision berthing and unberthing ship positioning method by fusing LiDAR and inertial navigation system

HE Zhibo^{1,2}, YAN Wenzhou^{1,2}, LIU Chenguang^{*1,3}, CHU Xiumin^{1,3,4}, LIU Xinyu^{1,3}

1 State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

3 Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

4 College of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350121, China

Abstract: [**Objective**] Addressing the requirement for precise sensing during ship berthing and unberthing at close range, we propose a high-precision berthing and unberthing positioning method by fusing LiDAR with an inertial navigation system. [**Methods**] Initially, we develop a multi-coordinate conversion and time registration algorithm for ship navigation, achieving the temporal and spatial unification of various sensing devices while correcting the collected point cloud data. Subsequently, we introduce an enhanced random sample consensus (RANSAC) berth shoreline detection method which mitigates the impact of point cloud data randomness on shoreline detection accuracy by considering berth elevation and optimizing the clustering cost function. The identified shoreline intersection serves as a characteristic point for berthing, aiding unmanned surface vehicles in positioning. Finally, the effectiveness of the proposed method is validated through real ship experiments. [**Results**] The experimental outcomes demonstrate that this positioning method yields positioning information for ships with an error of less than 0.256 m and exhibits strong adaptability to various interferences in real-world environments. [**Conclusion**] The improved RANSAC method for ship berthing and unberthing can obtain high positioning accuracy even when the quality of the point cloud data is poor.

Key words: unmanned vehicles; mooring; berthing and unberthing; navigation; positioning; lightlaser detection and ranging (LiDAR); RANSAC