引文格式:兰加芬,郑茂,初秀民,等.利用激光雷达进行船舶位姿感知[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(4):782-791.DOI:10.13203/j.whugis20220792

Citation:LAN Jiafen,ZHENG Mao,CHU Xiumin,et al.Ship Position and Pose Sensing with LiDAR[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(4):782-791.DOI:10.13203/j.whugis20220792

利用激光雷达进行船舶位姿感知

兰加芬[1,2] 郑 茂[2,3] 初秀民[2,3] 柳晨光[2,3] 吴 勇[1,2]

1 武汉理工大学交通与物流工程学院,湖北 武汉,430063

2 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心,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

摘 要:为精确测量船舶进入升船机船厢的位置、航速、偏航角等关键位姿参数,提出了自适应体素栅格长度计算方法、基于特征点的船舶位置感知方法以及自适应姿态感知方法。以长江三峡5号为例分析了关键参数的影响,并通过蓝箭208号与华嘉8号验证了感知精度。与测速轮测量结果对比表明,船舶纵向位置平均偏差0.810 m,航速平均偏差0.030 m/s,偏航角平均偏差0.27°。所提出的位姿感知方法具有良好的精度,可为船舶进出船厢航行辅助决策系统的开发提供技术支撑。

关键词:三峡升船机;激光雷达;点云滤波;位置感知;姿态感知

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-01-20

DOI:10.13203/j.whugis20220792 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0782-10

Ship Position and Pose Sensing with LiDAR

LAN Jiafen[1,2] *ZHENG Mao*[2,3] *CHU Xiumin*[2,3] *LIU Chenguang*[2,3] *WU Yong*[1,2]

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

2 National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

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

Abstract: **Objectives**: To achieve accurate shore-based measurement of the ship's position, speed, yaw angle and other key motion parameters when a ship enters the ship chamber of the ship lift, a ship's position and pose sensing method with light detection and ranging was developed. **Methods**: To address the specific challenges of point cloud occlusion and noise interference during the process of ships entering a ship lift, a method is developed with the goal of improving the accuracy and efficiency of point cloud data processing. This method utilizes the k-d tree and bounding box algorithms, along with an adaptive voxel grid length calculation method. A feature-based ship position sensing method and an adaptive pose perception method are incorporated, enabling point cloud preprocessing as well as ship position and pose sensing. The system's accuracy is validated using data from the Three Gorges 5 ship, and the impact of key parameters is analyzed. Furthermore, the system's accuracy is also verified using data from Lanjian 208 and Huajia 8 ships. **Results**: The results show that when the voxel filter constant is 1 000, the neighborhood is 10, and the search angle step is 0.25°, the ship position and pose sensing method has good robustness and smoothness while ensuring the operation efficiency and accuracy of the system. The average deviation of the longitudinal position of the ship is 0.810 m, the average deviation of the speed is 0.030 m/s, and the average deviation of the yaw angle is 0.27°.**Conclusions**: The proposed position and pose sensing method can meet the requirements of engineering practice, and provide technical support for the development of the navigation decision-making system for ships entering and exiting the ship lift.

基金项目:国家自然科学基金(52001243);交通运输部重点项目(SXHXGZ-2021-3)。

第一作者:兰加芬,博士生,主要从事水路交通感知、船舶操纵等方面的研究。lanjiafen@whut.edu.cn

通信作者:郑茂,博士,高级工程师。zhengmao@whut.edu.cn

Key words: Three Gorges ship lift; LiDAR; point cloud filtering; position sensing; pose sensing

缩短船舶进厢时间对提升三峡升船机通航效率具有重要意义。船舶下行进厢时与下游航道落差最高达113 m，如图1所示，驾驶员存在心理恐慌，导致船舶进厢速度慢，通航效率低。同时，随着运输船舶的大型化，升船机每厢次仅能通过1艘船舶，船舶最大下沉量随航速的增加而加大，超过安全限速将增加触底风险[1]，故需精确感知与控制船速，以确保船舶进厢安全。

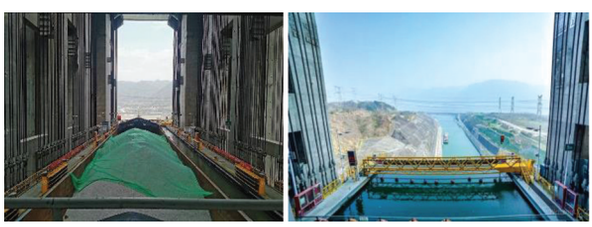


图1　视野受限

Fig. 1　Restricted Vision

驾驶员操作船舶进入升船机船厢时，主要凭借经验判断船舶位置和偏航角，在船舶尺寸较大及通航环境复杂等不利条件下，驾驶十分困难。精确感知船舶位姿（位置、航速、姿态），可为船舶提供高精度航行数据服务，引导船舶在升船机与船闸等受限水域安全航行。

在船舶位置与速度精确感知方面，文献[2]采用雷达测速仪，在葛洲坝三号船闸200 m范围内测定了船舶航速，但测量值波动较大。文献[3]采用线性调频连续波雷达对三峡船闸的船舶位置和航速进行实时监测，测得的航速精度较高，但船舶位置数据波动大且不连续。文献[4]基于激光点云数据，采用滑动平均法获得了船舶靠泊时船首尾相对码头距离、速度等参数，但缺少实测数据验证。在船闸、升船机等受限水域，由于被通航建筑物遮挡，差分北斗/GPS定位误差通常在数十米量级，难以满足船舶精确定位与测速需求。此外，海事雷达测距精度不足[5]，视觉传感器无法直接测距[6]，而三维激光雷达能提供全天候、高分辨率的实时三维点云，通过数据处理可获得目标实时位姿，已广泛应用于无人车与机器人避障等领域[7-9]。

在点云预处理方面，激光雷达在采集三维点云数据时会受各类因素的影响而产生噪点。点云滤波作为三维重建技术领域的研究热点，国内外学者提出了多种滤波算法，如统计滤波[10-11]、半径滤波[12]及双边滤波[13-14]等。相对于双边滤波，统计滤波与半径滤波时间复杂度较低，效率较高。文献[15]采用半径滤波和统计滤波算法去除水下地形的大尺度噪点，结果表明，半径滤波能保留绝大部分地形特征，并去除边缘离散噪点，统计滤波可去除较为密集复杂的聚集噪点，两者总体滤波效果均较好。

在位姿感知方面，现有的激光雷达位姿感知方法主要包括深度学习方法、主成分分析（principal component analysis，PCA）方法[16-17]、模型匹配法[18-19]和矩形包围盒法[20-21]。基于深度学习的位姿感知方法主要通过卷积神经网络输出船舶位姿数据，需要大量训练数据。PCA方法通过计算点云协方差矩阵特征向量确定船舶姿态，简单高效，但对点云完整性要求高。模型匹配法通过目标与模型库的特征匹配获得船舶姿态，但依赖于船舶姿态数据库。矩形包围盒法主要是建立包围目标点云并满足矩形面积最小化、点到边接近度最大化、点到边平方误差最小化等条件的外接矩形，但对于大面积非均匀或遮挡区域，会产生错误感知。文献[22]分别采用点云配准方法与PCA方法感知船舶姿态，仿真结果表明点云配准方法精度高于PCA方法，但点云配准方法需建立船舶点云模板库，且耗时较长，无法实时测量。文献[23-24]采用聚类中心邻域判别法加速确定各坐标轴的正方向向量，平均耗时降到3.47 s/帧。文献[25]采用随机抽样一致法拟合场景平面，获取平面法向量以确定姿态角，结果表明目标点云完整时，精度较高，反之，偏差较大。

由于船舶进出船厢过程中存在不同程度的遮挡，现有方法对样本数量及点云完整性要求高，导致船舶位姿信息难以有效获得。本文结合三峡升船机通航特点，提出了点云预处理、船舶姿态自适应感知以及基于特征点的船舶位置感知等方法，实现了船舶位姿感知，通过三峡升船机实际场景测试验证了所提船舶位姿感知方法的有效性与精确性。

1　点云数据处理方法

1.1　点云预处理方法

点云数据预处理过程包括点云坐标转换、点云滤波等过程。

1）点云坐标转换。将激光雷达坐标系$\{a\}=(x,y,z)$转换到船厢坐标系$\{n\}=(X,Y,Z)$。设ϕ、θ和ψ分别为绕x、y及z轴的旋转角度，其旋转

矩阵分别为$\boldsymbol{R}_{x,\phi}$、$\boldsymbol{R}_{y,\theta}$和$\boldsymbol{R}_{z,\psi}$,计算公式为:

$$\boldsymbol{R}_{x,\phi}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi & \cos\phi\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{R}_{y,\theta}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0 & \sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}_{z,\psi}=\begin{bmatrix}\cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{3}$$

设某点云在激光雷达坐标系的坐标为(x_0,y_0,z_0),则其在船厢坐标系的坐标(X_0,Y_0,Z_0)可表示为:

$$\begin{bmatrix}X_0\\ Y_0\\ Z_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a\\ b\\ c\end{bmatrix}+\boldsymbol{R}_{x,\phi}\boldsymbol{R}_{y,\theta}\boldsymbol{R}_{z,\psi}\begin{bmatrix}x_0\\ y_0\\ z_0\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中,a、b、c分别为激光雷达中心点在船厢坐标系的X、Y、Z方向坐标。

2)点云滤波。点云滤波包括船舶点云提取、冗余点云去除和噪点去除3个步骤。

船舶点云提取采用直通滤波法,通过限定点云在X、Y、Z方向的范围,去除固定通航建筑物的干扰;删除反射率小于20的点云,以去除水面波纹等噪点干扰。保留水面以上且在水域范围内的点云,从而快速提取船舶点云数据。

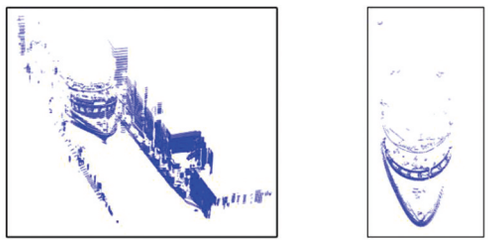
冗余点云去除主要采用投影及体素滤波。通过将船舶点云投影至XY平面,去除船舶垂向运动的干扰。同时,创建点云的体素栅格,通过重心表示体素内的所有点,在保持点云特征的同时滤除冗余点云数据,极大地减少点数,提升计算效率。因此,提出一种自适应体素栅格长度L:

$$L=\sqrt{p_n}/\alpha \tag{5}$$

式中,p_n为通过直通与投影滤波后的点数;α为设定的体素常数。若$L\leqslant 0.01$,L取固定值0.01,防止栅格不含点云。

噪点去除主要采用半径滤波与统计滤波的组合策略,在船舶较远时,点云量较少且较为集中,噪点分布较离散,通过设定半径阈值r删除半径范围内邻近点数量不满足阈值n_r的点云。船舶较近时,点数较多且相对分散,删除邻近点数量阈值n_s内,与邻近点距离大于$\mu\pm\sigma\times k_s$的点云,其中μ、σ为n_s个邻近点的平均距离和标准差,k_s为比例系数。

通过点云滤波,可从原本复杂的点云中提取精确的船舶点云,如图2所示。



(a) 原始点云 (b) 预处理后的船舶点云

图2 点云滤波对比

Fig. 2 Point Cloud Filtering Comparison

1.2 船舶位置感知方法

船厢内水域环境复杂,存在烟气等强干扰,点云噪点多。如图3所示,船舶进厢过程中会频繁启停,当船舶柴油机启动瞬间,烟气较多,点云密集且反射率高,常规方法难以过滤。

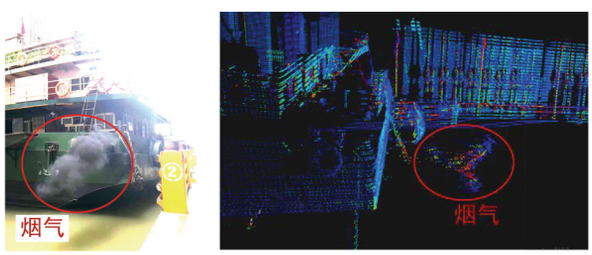


图3 船舶烟气

Fig. 3 Shipborne Flue Gas

考虑到船舶排烟口均在两舷侧,而船中线面附近烟气较少,提出一种基于特征点的船舶位置感知方法,如图4所示。其主要流程为:设邻域k,取禁停线中心点作为特征点m,获取与特征点最近的k个点云,按照与特征点的距离值排序,取其中值作为船舶离禁停线的纵向距离,以降低噪点影响;通过连续两帧点云解算船舶实际移动距离,从而获得航速;并通过卡尔曼滤波对航速进行平滑滤波。为提升搜索效率,采用k-d树方法建立船舶点云树形索引结构,并近似搜索特征点m最近的k个点,近似搜索递归过程详见文献[26]。

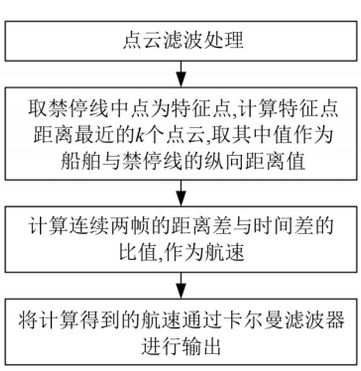


图4 船舶位置感知方法流程

Fig. 4 Flowchart of Ship Position Sensing Method

1.3　船舶姿态感知方法

船舶进厢航行过程中存在不同程度的遮挡,结合船舶进入三峡升船机实际点云分布情况,提出一种自适应姿态感知方法,其流程如图5所示。其中,k_1为船首与船长的比值。其主要流程为:分别以矩形面积最小化和点到边平方误差最小化为标准,计算原始船舶点云和去除船首点云的偏航角θ_1和θ_2,同时计算船舶平行中体点数N,若$|\theta_1-\theta_2|\leqslant 1^\circ$或$N\leqslant 10$,则输出$\theta_1$作为偏航角,否则$\theta_2$作为偏航角。

因精确求解矩形框难以实现,本文基于搜索方法近似找到最佳拟合矩形,主要步骤如下:

1)以一定搜索角度步长δ遍历所有方向;

2)在每次迭代中,找到一个指向该方向并包含所有点云的矩形;

3)计算矩形面积作为矩形面积最小化方法的目标函数。计算所有点到矩形四条边的距离,基于这些距离,将n个点云分为P和Q集合,并计算相应的平方误差,作为点到边平方误差最小化方法的目标函数。即

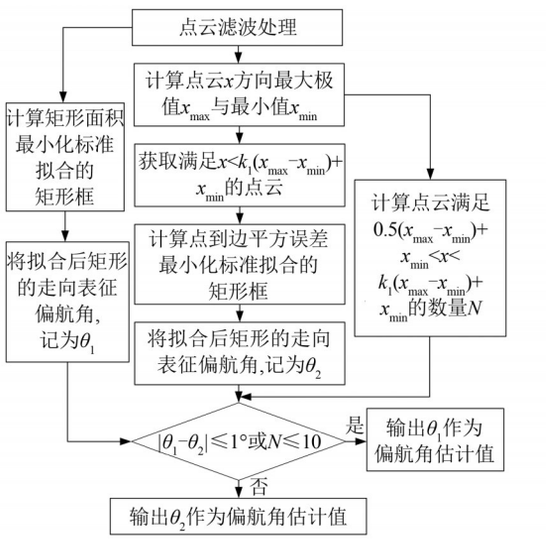


图5　船舶姿态感知方法流程

Fig. 5　Flowchart of Ship Pose Sensing Method

$$\begin{aligned}&\underset{P,\theta,c_1,c_2}{\text{最小化}}\sum_{i\in P}\left(x_i\cos\theta+y_i\sin\theta-c_1\right)^2+\sum_{i\in Q}\left(-x_i\sin\theta+y_i\cos\theta-c_2\right)^2\\&\text{满足}P\cup Q=\{1,2,\cdots,n\},c_1、\ c_2\in\mathbf{R},0^\circ\leqslant\theta\leqslant 90^\circ\end{aligned}\tag{6}$$

其中,矩形框的两条垂线表达式分别为$x\cos\theta+y\sin\theta=c_1$和$-x\sin\theta+y\cos\theta=c_2$。

4)迭代所有方向,获得相应的矩形面积和平方误差后,寻找最小的矩形面积或平方误差的方向作为偏航角,并根据该方向拟合矩形。

在船舶姿态框建立后,计算姿态框与岸边的最近距离作为船舶离岸边的横向距离。

2　船舶进厢实验与分析

本文采用Horn-X2 Pro激光雷达,其在10%反射率下的有效量程超300 m,水平视场角为90°,垂直视场角为30°,角分辨率达0.05°,抗环境光和恶劣天气干扰。三峡升船机布置图如图6所示。

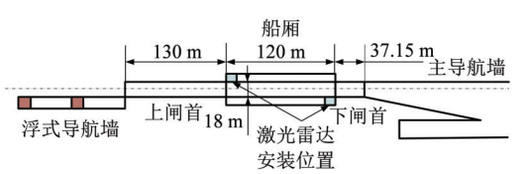


图6　三峡升船机布置图

Fig. 6　Three Gorges Ship Lift Layout

从图7可以看出,船厢下游安装的激光雷达可采集上闸首至船厢水域300 m范围内的船舶点云。通过上下游侧两个激光雷达的相互配合,可实现闸首至船厢的全水域监测。

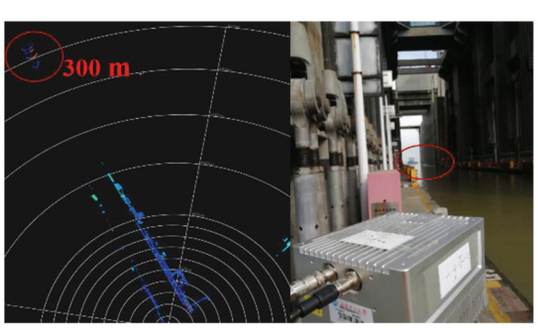


图7　300 m处船舶点云采集

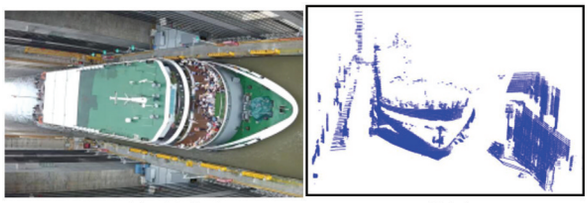
Fig. 7　Ship Point Cloud Collection at 300 m

2.1　关键参数影响分析

1)点云预处理参数。本文算法是基于Microsoft Windows 10系统(1.80 GHz Intel Core i7 CPU,8 GB RAM)C++框架开发的,未启用并行优化。为了便于算法性能与点云的可视化,采用了Qt5的GUI库、开源vtk库等,并增加交互按钮,便于调参与显示。

随着船舶进厢,点云量逐渐增多,以长江三峡5号(图8)为例,探讨体素常数α对系统运行时间(包括点云坐标转换、点云滤波、姿态感知、位置感知等耗时)的影响。

从表1中可以看出,随着体素常数增大,滤波后点云中的点数及系统运行时间增加。具体而言,滤波与姿态感知耗时逐渐增加,而点云坐标



(a) 三峡5号进厢 (b) 原始点云

图8 三峡5号原始数据

Fig. 8 Raw Data of Three Gorges 5 Ship

转换与位置感知耗时基本不变。从图9中可以看出,体素常数较小时,系统运行时间主要受点云坐标转换耗时影响。但随着体素常数增大,姿态感知耗时逐渐成为主导因素。点云滤波与位置感知在各个体素常数下耗时很少。总体而言,系统运行效率对姿态感知和坐标转换敏感,对点云滤波与位置感知不敏感。

表1 体素常数对系统运行时间的影响

Table 1 Effect of the Voxel Constant on System Running Time

体素常数	原始点数/个	体素滤波后的点数/个	点云坐标转换耗时/s	点云滤波耗时/s	姿态感知耗时/s	位置感知耗时/s	系统运行时间/s
300	80 158	570	0.303	0.005	0.060	0.024	0.397
500		1 018	0.306	0.017	0.103	0.022	0.473
1 000		2 240	0.307	0.020	0.209	0.021	0.583
1 500		3 734	0.304	0.026	0.370	0.021	0.745
2 000		5 485	0.305	0.027	0.496	0.022	0.877
2 500		6 453	0.306	0.031	0.577	0.023	0.962

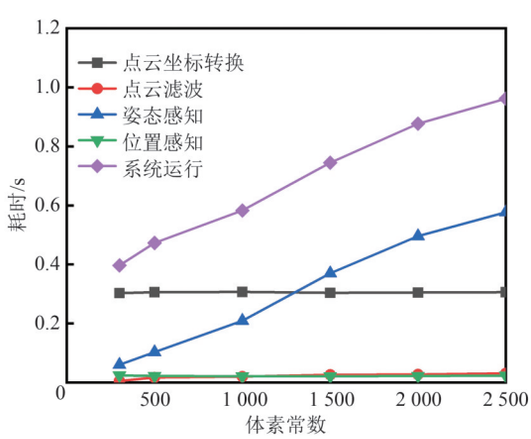


图9 体素常数的影响

Fig. 9 Effects of the Voxel Constant

通过图10中不同体素常数下滤波后的船舶点云图像,可以直观地观察到随着体素常数的增大,滤波后的点数逐渐增多,点云越密集。为平衡系统运行效率与点云特征,选取体素常数为1 000。

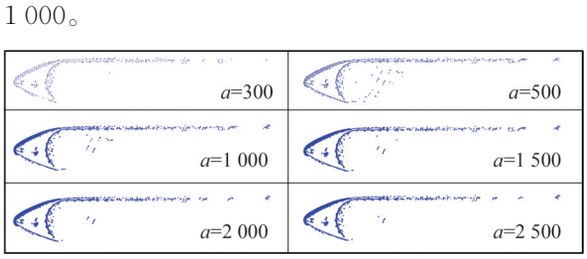
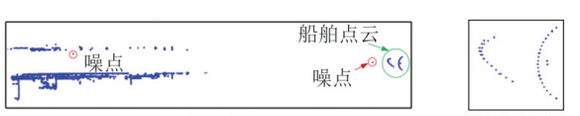


图10 体素滤波后的点云

Fig. 10 Point Cloud After the Voxel Filtering

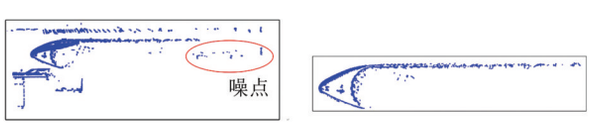
结合实际点云数据,经参数调优,在体素滤波前后的点数比小于2时,采用半径滤波,滤波半径取1.5 m,点数阈值取8。反之,采用统计滤波,标准差倍数取2,近邻点数量取50。图11和图12分别为采用半径滤波和统计滤波对不同位置船舶点云的处理效果。从图11中可以看出,半径滤波可保留船舶点云特征的同时去除孤立噪点。从图12中可以看出,统计滤波可以在去除较为密集噪点的同时保留船舶点云大部分特征。



(a) 原始点云 (b) 滤波后点云

图11 半径滤波效果

Fig. 11 Radius Filtering Effect



(a) 原始点云 (b) 滤波后的点云

图12 统计滤波效果

Fig. 12 Statistical Filtering Effect

2)船舶位置感知参数。位置感知计算高效,但邻域k对船舶位置计算的平稳度和精度有显著影响。不稳定的位置值可能导致船舶速度的突变,因此选择合适的邻域k值至关重要。

如图13所示,横轴为数据采集时间,纵轴为船舶与禁停线的纵向距离。随着邻域k增大,相同时刻的距离计算值略微增加,曲线趋于平稳。邻域k为1和5时,曲线形状非常相似,几乎重合。邻域k为10和15时,曲线也表现出较高的相似

性。在纵向距离为250～300 m时,因船舶进入上闸首前需不断调整其航向,导致纵向距离波动较大。当邻域k为5、10、15时,与邻域k为1相比,纵向距离的平均误差分别为0.064 m、0.595 m与0.978 m。总体而言,增加邻域k值可以提高位置计算结果的平稳度,但精度略有下降。综合考虑计算平稳度与准确度,取邻域k为10。

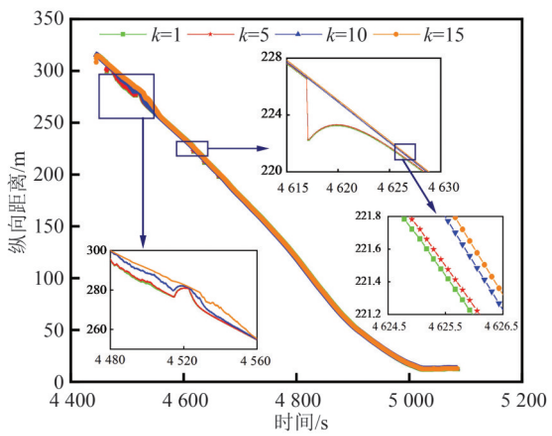


图13　邻域k的影响

Fig. 13　Influence of Neighborhood k

3)船舶姿态感知参数。搜索角度步长δ是姿态测量精度与效率的关键要素,以长江三峡5号为例,研究搜索角度步长对船舶姿态感知效率的影响。根据图14结果显示,随着搜索角度步长的增加,船舶姿态感知耗时逐渐变小,曲线趋于稳定。具体来说,感知耗时变小的幅度分别为49%、33%、23%、18%、16%、11%。然而,感知精度线性下降。综合考虑系统运行效率与姿态感知精度,采用0.25°为搜索角度步长,并以船舶进厢过程中4种典型点云场景为例,分别采用矩形面积最小(Area)、点到边接近度最大(Nearest)、点到边平方误差最小(Variance)、PCA以及本文方法建立姿态框(图15),偏航角计算值与标定值的绝对误差结果如表2所示。

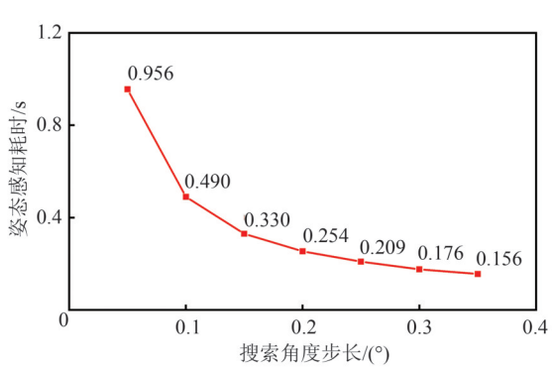


图14　搜索角度步长的影响

Fig. 14　Effects of Rotating Search Angle Step

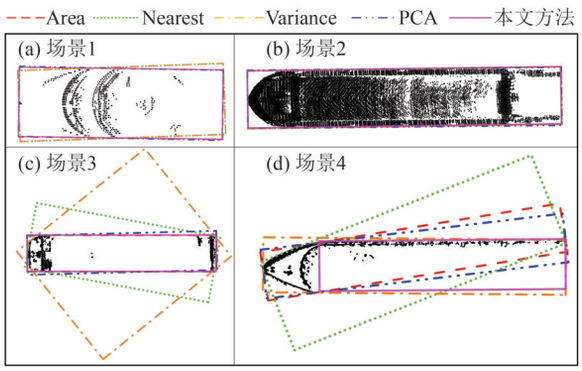


图15　船舶姿态感知方法对比

Fig. 15　Comparison of Ship Pose Sensing Methods

表2　偏航角的绝对误差/(°)

Table 2　Absolute Errors of Yaw Angles/(°)

方法	场景1	场景2	场景3	场景4
Area	0.15	0.05	0.04	8.82
Nearst	2.90	0.05	10.90	21.10
Variance	2.90	0.05	38.75	0.90
PCA	0.25	0.18	1.39	7.23
本文方法	0.15	0.05	0.04	0.10

由图15和表2可看出,点云较完整时(如场景2),上述方法均能取得较好效果。船身点云被遮挡但船首点云完整且对称时(如场景1),本文方法、Area与PCA方法能够获得较好效果,Nearest、Variance方法效果较差。船中被遮挡但船首、尾点云完整时(如场景3),本文方法、Area方法能够获得较好效果,PCA方法效果次之,但Nearest、Variance计算结果明显偏离实际值。点云被遮挡且分布不均时(如场景4),Area、Nearest与PCA方法的感知效果均欠佳,Variance方法有一定的偏离,而本文方法仍可较为准确地感知姿态。综上,本文方法较Area、Nearest、Variance、PCA方法具有良好的鲁棒性。

2.2　对比分析

1)船舶位置对比。为验证本文方法的计算精度,以三峡升船机的典型船舶为例,与自主开发的测速轮(图16)测量结果进行对比。测速轮采用光栅编码器作为核心元件,经标定可得,测距精度为±0.20 m,测速精度为±0.03 m/s,将测速轮抵至船舶舷侧,船舶航行时带动测速轮转动,从而测量船舶移动距离与航速。采用均方根误差(root mean square error,RMSE)与皮尔逊积矩相关系数(Pearson's product-moment correlation coefficient,PCC)衡量偏差,计算公式为:

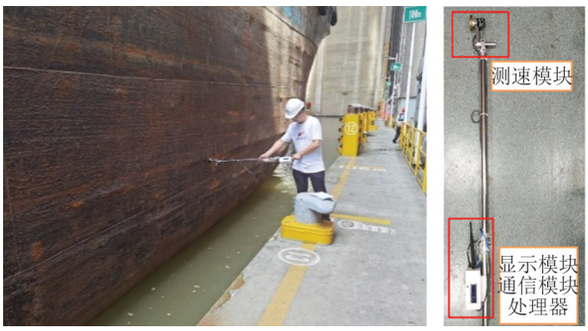


图16 测速轮

Fig. 16 Speed Measuring Wheel

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(h_i-f_i\right)^2} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{CC}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left\{\left(h_i-\bar{h}\right)\left(f_i-\bar{f}\right)\right\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(h_i-\bar{h}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(f_i-\bar{f}\right)^2}} \tag{8}$$

式中,R_{MSE}为均方根误差;P_{CC}为皮尔逊积矩相关系数;h为本文计算结果;f为测速轮测量结果;$\bar{h}$和$\bar{f}$分别为其均值;N为采样点数量。

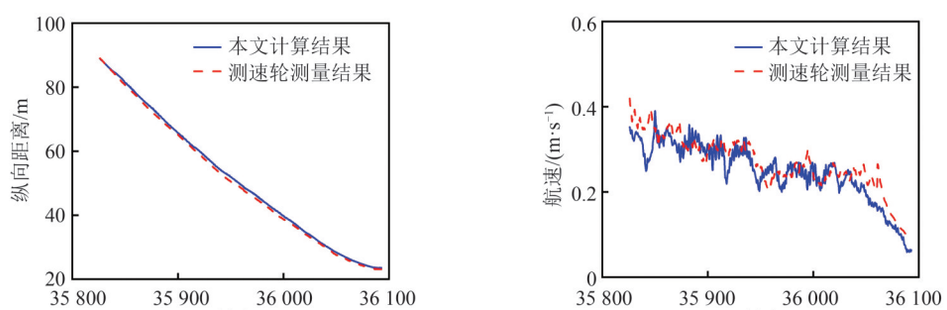
图17~19分别为蓝箭208号和华嘉8号进厢视频画面,及其纵向距离与航速结果对比。从图18和图19中可以看出,蓝箭208号与华嘉8号纵向距离与航速的计算结果与测速轮测量结果均十分接近。华嘉8号的速度波动大于蓝箭208号,这是由于华嘉8号尺度大于蓝箭208号,进厢



(a) 蓝箭208号进厢 (b) 华嘉8号进厢

图17 视频画面

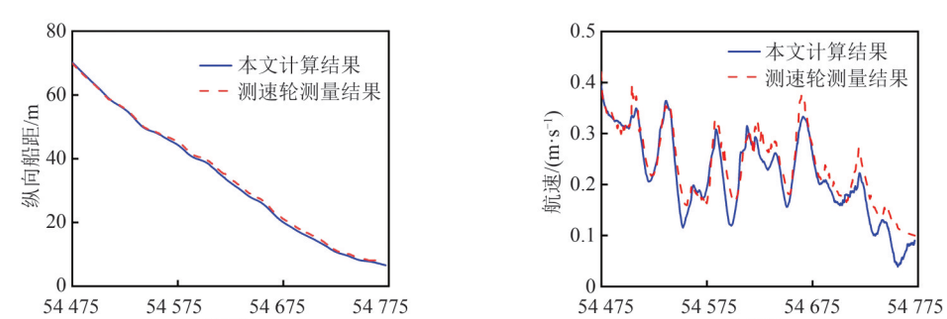
Fig. 17 Video Footage



(a) 纵向距离对比 (b) 航速对比

图18 蓝箭208号结果对比

Fig. 18 Result Comparison of Lanjian 208 Ship



(a) 纵向距离对比 (b) 航速对比

图19 华嘉8号结果对比

Fig. 19 Result Comparison of Huajia 8 Ship

操纵更为困难,需不断调整主机转速。

表3为本文计算结果与测速轮测量结果的误差统计值。可看出,本文方法纵向距离感知结果与测速轮测量结果的平均偏差为0.810 m,航速平均偏差为0.030 m/s,纵向距离、航速的计算与测量结果均具有强正相关性,验证了本文位置感知方法的有效性。其中,误差来源主要为计算误差(激光点云受环境干扰造成最近点捕捉误差)

与测量误差(船舷侧外板焊缝等影响测速轮的顺滑转动,造成测距误差)。

表 3　误差统计

Table 3　Error Statistics

船舶	R_{MSE}		P_{CC}	
	纵向距离/m	速度/(m·s^{-1})	纵向距离/m	速度/(m·s^{-1})
蓝箭 208 号	0.859	0.029	0.999	0.897
华嘉 8 号	0.760	0.031	0.999	0.958

2)船姿态对比。采用畸变校正后的船舶进厢视频画面,经像素点比例换算获取视频标定的船舶偏航角。为更直观显示船舶进厢姿态变化,以 30 s 为间隔绘制蓝箭 208 号与华嘉 8 号的船舶点云及拟合姿态框,并计算对应的纵向距离、横向距离与偏航角,如图 20 和图 21 所示。可见,本文方法对蓝箭 208 号与华嘉 8 号均可有效建立姿态框,并获得偏航角与横向距离。蓝箭 208 号横向距离与偏航角的变化幅度均大于华嘉 8 号,这是因为蓝箭 208 号的船宽(13.6 m)小于华嘉 8 号(17.2 m),其左右可移动范围更大。蓝箭 208 号计算偏航角与标定偏航角十分接近,两者 RMSE 为 0.08°,而华嘉 8 号计算偏航角与标定偏航角相对偏离较大,且计算偏航角波动幅度大于标定偏航角,两者 RMSE 为 0.46°,如表 4 所示。其主要原因是:蓝箭 208 号船首高度较低,进厢全过程中,激光雷达均可捕捉到船首与船尾点云;而华嘉 8 号船首高大,遮挡了船中和船尾,尚未进入船厢时,激光雷达只能捕捉到华嘉 8 号的船首点云,进入船厢后,随着船舶纵向距离逐渐减小,靠近激光雷达一侧的舷侧点云逐渐增多(如图 22 所示),此时本文方法可有效建立舷侧点云姿态框,获取准确的姿态。

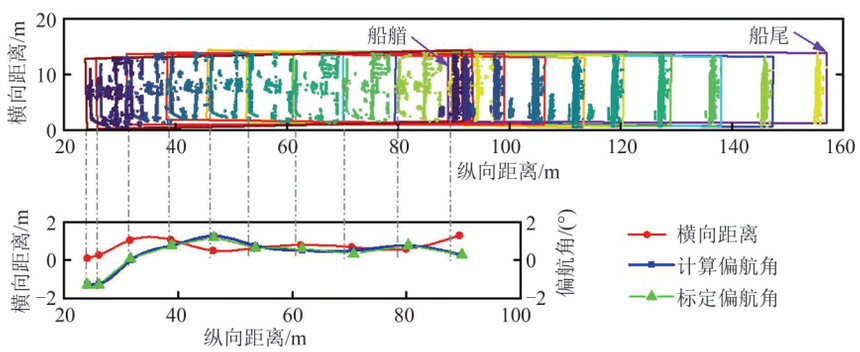


图 20　蓝箭 208 号姿态角与横向距离变化图

Fig. 20　Pose Angle and Lateral Distance Change Diagram of Lanjian 208 Ship

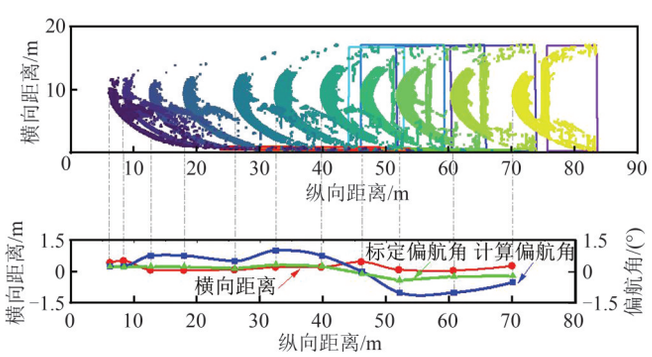


图 21　华嘉 8 号姿态角与横向距离变化图

Fig. 21　Pose Angle and Lateral Distance Change Diagram of Huajia 8 Ship

表 4　偏航角均方根误差/(°)

Table 4　R_{MSE} of the Yaw Angle/(°)

船名	R_{MSE}	平均偏差
蓝箭 208 号	0.08	0.27
华嘉 8 号	0.46	

3　结　语

本文结合三峡升船机通航特点,基于三维激光雷达提出了点云预处理、船舶位置与姿态感知等方法,并在三峡升船机进行了现场实验,主要结论如下:

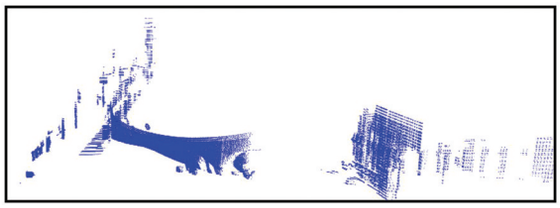


图22 华嘉8号原始点云图

Fig. 22 Raw Point Cloud Map of Huajia 8 Ship

1)在点云预处理方面,随着体素常数的增大,滤波后的点数及系统运行时间均增加。通过自适应体素栅格长度参数调优提升系统运行效率,通过半径与统计组合滤波方法保留船舶点云特征并去除噪点。

2)在船舶位置感知方面,邻域值增加可提高位置计算的平稳度,但精度略有下降。与测速轮测量结果的对比表明,纵向距离平均偏差为0.810 m,航速平均偏差为0.030 m/s,验证了本文提出的位置感知方法的有效性。

3)在船舶姿态感知方面,随着搜索角度步长的增加,船舶姿态感知耗时逐渐减小且趋于稳定。进厢4种典型点云场景表明,本文提出的姿态感知方法较传统方法具有更强的鲁棒性,并可准确获得蓝箭208号与华嘉8号的横向距离,偏航角感知精度受点云完整性影响,偏航角平均偏差为0.27°,对船首低矮的船舶姿态测量精度更高。

参 考 文 献

[1] 谢保峰,张树奎,胡甚平. 浅水区域船舶航行下沉量的数值计算[J]. 舰船科学技术,2022,44(20):42-45.
XIE Baofeng, ZHANG Shukui, HU Shenping. Numerical Calculation of Ship Sinking in Shallow Water [J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(20): 42-45.

[2] 吴鹏. 一种升船机用船速检测预警系统的设计[J]. 自动化应用,2014(8):90-92.
WU Peng. Design of Speed Detection Warning System for Shiplift[J]. *Automation Application*, 2014(8): 90-92.

[3] 张慧. 三峡升船机船舶安全检测及预警系统的研究[D]. 大连:大连海事大学,2016.
ZHANG Hui. Research on Ship Safety Detection and Early Warning System of Three Gorges Ship Lift [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.

[4] 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 Xiaofei, LIU Zexi, LI Ying, et al. Ship Berthing Dynamic Monitoring Technology Based on Laser 3D Vision[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(12): 1452-1458.

[5] 庄佳园,徐玉如,万磊,等. 基于雷达图像的水面无人艇目标检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报,2012,33(2):129-135.
ZHUANG Jiayuan, XU Yuru, WAN Lei, et al. Target Detection of an Unmanned Surface Vehicle Based on a Radar Image[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(2): 129-135.

[6] 詹华蕊,姜晓荣. 复杂背景下无人艇视频视觉目标图像识别算法[J]. 舰船科学技术,2020,42(16):79-81.
ZHAN Huarui, JIANG Xiaorong. Image Recognition Algorithm of Unmanned Aerial Vehicle Video Under Complex Background[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(16): 79-81.

[7] 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 Chenguang, GUO Juehan, WU Yong, et al. 3D LiDAR Based Real-Time Object Recognition System for Unmanned Surface Vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 202-211.

[8] 叶语同,李必军,付黎明. 智能驾驶中点云目标快速检测与跟踪[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(1):139-144.
YE Yutong, LI Bijun, FU Liming. Rapid Detection and Tracking of Point Cloud Targets in Intelligent Driving[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 139-144.

[9] 黄远宪,李必军,黄琦,等. 融合相机与激光雷达的目标检测、跟踪与预测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(6):945-951.
HUANG Yuanxian, LI Bijun, HUANG Qi, et al. Camera-LiDAR Fusion for Object Detection, Tracking and Prediction[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 945-951.

[10] XU X, ZHANG L, YANG J, et al. LiDAR Camera Calibration Method Based on Ranging Statistical Characteristics and Improved RANSAC Algorithm [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 141: 103776.

[11] CARRILHO A C, GALO M, DOS SANTOS R C. Statistical Outlier Detection Method for Airborne LiDAR Data[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2018, 42: 87-92.

[12] DUAN Y, YANG C, LI H. Low-Complexity

Adaptive Radius Outlier Removal Filter Based on PCA for LiDAR Point Cloud Denoising[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(20): E1-E7.

[13] PREMEBIDA C, GARROTE L, ASVADI A, et al. High-Resolution LIDAR-Based Depth Mapping Using Bilateral Filter[C]//The 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Rio de Janeiro, Brazil,2016.

[14] MASOULEH M K, SHAH-HOSSEINI R. Fusion of Deep Learning with Adaptive Bilateral Filter for Building Outline Extraction from Remote Sensing Imagery[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(4): 046018.

[15] 崔晓冬, 沈蔚, 帅晨甫, 等. 多波束点云滤波算法初步研究及适用性分析[J]. 海洋测绘, 2021, 41(5):5.
CUI Xiaodong, SHEN Wei, SHUAI Chenfu, et al. Preliminary Research and Application Analysis of Multi-beam Point Cloud Filtering Algorithm[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2021, 41(5): 5.

[16] AGARWAL P, HUSAIN A, RANJAN R K. Pole Like Object Detection Using PCA inTerrestrial LiDAR System[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2089(1): 012004.

[17] GUO S Y, RONG Z, WANG S, et al. A LiDAR SLAM with PCA-Based Feature Extraction and Two-Stage Matching[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,2022,71: 8501711.

[18] GRABNER A, ROTH P M, LEPETIT V. 3D Pose Estimation and 3D Model Retrieval for Objects in the Wild[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 2018.

[19] BUCH A G, PETERSEN H G, KRÜGER N. Local Shape Feature Fusion for Improved Matching, Pose Estimation and 3D Object Recognition[J]. *Springer Plus*, 2016, 5: 297.

[20] GAO Q J, YIN D Y, LUO Q J, et al. Minimum Elastic Bounding Box Algorithm for Dimension Detection of 3D Objects: A Case of Airline Baggage Measurement[J]. *IET Image Processing*, 2018, 12(8): 1313-1321.

[21] ZHANG X, XU W D, DONG C Y, et al. Efficient L-Shape Fitting for Vehicle Detection Using Laser Scanners[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Los Angeles, CA, USA, 2017.

[22] 高广. 激光雷达成像模拟及点云船舶位姿估计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
GAO Guang. Research on LiDAR Imaging Simulation and Point Cloud Ship Pose Estimation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.

[23] LÜ D, SUN J F, LI Q, et al. Fully Automatic Registration of Structured Objects Based on Laser Radar Range Images[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4698-4703.

[24] LÜ D, SUN J F, LI Q, et al. 3D Pose Estimation of Ground Rigid Target Based on Ladar Range Image[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(33): 8073-8081.

[25] 张楠, 孙剑峰, 姜鹏, 等. 激光雷达场景三维姿态点法向量估计方法[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 0105004.
ZHANG Nan, SUN Jianfeng, JIANG Peng, et al. Pose Estimation Algorithms for LiDAR Scene Based on Point Normal Vector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0105004.

[26] GREENSPAN M, YURICK M. Approximate k-d Tree Search for Efficient ICP[C]//The Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Banff, Canada, 2003.