

DOI: 10.3901/JME.2022.04.202

无人水面艇三维激光雷达目标实时识别系统*

柳晨光^{1,2} 郭珏菡^{1,2,3} 吴 勇^{1,2,3} 初秀民^{1,2} 吴文祥^{1,2,3} 雷超凡^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学国家水运安全工程技术研究中心 武汉 430063;

2. 武汉理工大学智能交通系统研究中心 武汉 430063;

3. 武汉理工大学交通与物流工程学院 武汉 430063)

摘要: 为解决无人水面艇动态环境目标动态感知问题,研究无人艇三维激光雷达目标实时识别系统。设计出无人艇三维激光雷达目标实时识别系统结构、硬件组成及数据通信协议。基于点云库(Point cloud library, PCL)、Qt 和 Visual Studio 平台开发了无人艇三维激光雷达目标实时识别系统软件,实现了点云数据校正、实时处理、数据显示、状态输出、远程通信等功能。考虑到无人艇航行时周边环境障碍物三维激光点云分布特征,将三维激光点云投影至多属性二维栅格进行表示,利用八邻域算法实现了障碍物栅格的聚类,解决了点云数据处理、目标分割、点云图像远程交互等关键技术。最后,构建了室外水池环境下的无人艇三维激光雷达目标实时识别系统试验平台,测试结果表明该系统能够可靠、准确识别无人艇周围 100 m 范围内的障碍目标。

关键词: 无人艇; 激光雷达; 三维点云; 目标识别; 栅格地图; 八邻域

中图分类号: U675

3D LiDAR Based Real-time Object Recognition System for Unmanned Surface Vehicles

LIU Chenguang^{1,2} GUO Juehan^{1,2,3} WU Yong^{1,2,3} CHU Xiumin^{1,2}WU Wenxiang^{1,2,3} LEI Chaofan^{1,2,3}

(1. National Engineering Research Center for Water Transport Safety,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

2. Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

Abstract: In order to solve the problem of unmanned surface vehicles (USVs) dynamic environment target dynamic perception, a 3D (three dimension) LiDAR based real-time object recognition system is studied. The structure, hardware components and data communication protocol of the 3D LiDAR based real-time object recognition system are designed. Based on the point cloud library (PCL) library, Qt and Visual Studio platform, the system software is developed, which realizes point cloud data correction, real-time processing, data display, status output, and remote communication and other functions. Considering the characteristics of the 3D point cloud in the surrounding environment of a sailing USV, the 3D laser point cloud is projected to a multi-attribute two-dimensional grid for representation, and the eight-neighbor algorithm is used to realize the clustering of the obstacle grid. Key technologies such as point cloud data processing, target segmentation, and remote interaction of point cloud images are solved. Finally, the platform of 3D LiDAR based real-time object recognition system for a USV in an outdoor pool environment is constructed, and the results show that the system can reliably and correctly identify the obstacles within a range of 100 m around the USV.

Key words: unmanned surface vehicle; LiDAR; 3D point cloud; target recognition; grid map; eight-neighborhood

* 国家自然科学基金(52001240)、湖北省自然科学基金(2020CFB307)、重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX1220)、中央高校基本科研业务费专项资金资(203144003, 202444001, 213244001)资助项目。20210716 收到初稿, 20211102 收到修改稿

0 前言

近年来, 无人水面艇(无人艇)通过结合人工智能、新一代通信和先进传感等技术, 已成为集智能感知、自主决策、远程操控、探测侦查于一体的水面航行器, 可替代有人船舶执行各项复杂、高危水上作业任务(海事巡逻、应急救援、海洋环境监测、水质处理、航道测绘等)^[1]。无人艇一般具有岸基远程遥控和船端自主航行两种控制模式: 远程遥控技术难度较低, 很早就应用于军事远程巡航和扫雷; 自主航行技术目前尚未完全实现, 其在动态环境障碍物实时感知方面还存在不足。当前无人艇普遍使用的感知设备在航行中对周围障碍物识别存在缺陷, 比如航海雷达有近距离目标感知盲区和测距不准的问题^[2], 视觉传感器有难以全天候运行和无法直接测距的问题^[3], 毫米波雷达有感知分辨率低和测量盲区的问题^[4], 这些都给无人艇实时目标检测和避障等带来了较大的困难。三维激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)能提供分辨率高、全天候、抗干扰能力强的周围场景实时三维点云, 通过对生成的三维点云处理可获得场景内障碍目标实时状态, 已被广泛应用于无人机、无人车、机器人避障等领域。但三维激光雷达的探测距离较短(<300 m), 用于中大型船舶的障碍物感知具有局限性, 而无人艇作为一种小型水面航行器, 具有良好机动性, 三维激光雷达刚好能满足其环境感知需求^[5]。因此, 三维激光雷达可成为无人艇水面障碍物目标识别的重要手段, 是实现无人艇自主航行的关键。

目前, 激光雷达已在无人艇环境感知中得到了一些应用。2016 年, 在国际无人驾驶车辆系统协会海上机器人挑战赛中, 参赛船舶普遍使用激光雷达作为目标检测传感器^[6]。2018 年, 丹麦马尔基集团将激光雷达等感知设备安装在其建造的集装箱船上, 用于通航环境感知和运动特征识别, 为自动避碰的研究提供了数据支持和态势认知基础^[7]。此外, 三维激光雷达还用于船舶靠离泊过程中的泊位码头识别^[8]。可见, 激光雷达在船舶智能感知系统中的应用愈来愈广泛。

与车辆^[9]、飞行器^[10]和机器人^[11]等载体相比, 激光雷达在无人艇上的应用仍不够成熟。文献[5]和文献[12]均开展了基于三维激光雷达的无人艇目标识别研究, 提出了考虑无人艇摇晃和水面目标特征的目标识别与分类算法, 但这些算法均未在真实无人艇航行环境下进行测试。文献[13]提出了一种港

口环境下基于激光雷达避障的无人艇路径跟随方法, 但其对激光点云处理过程探讨较少。文献[14]对三维激光雷达在船舶上的应用进行了技术总结。针对上述不足, 本文设计一种无人艇三维激光雷达目标实时识别系统, 针对系统需求设计系统硬件、软件和通信结构, 研究三维激光点云目标识别涉及的点云处理、目标分割、点云图像远程交互等关键技术, 构建无人艇三维激光目标实时识别系统试验平台, 并开展系统算法和性能的测试验证。

1 系统设计

航行过程中环境障碍目标会给无人艇航行安全带来重大隐患, 具备环境障碍物实时检测能力是实现无人艇自主航行的基础^[15-17]。无人艇自主航行时需要获取近距离范围内(<300 m)障碍目标的精确位置、方位角、大小等状态信息, 以进行避障操作。因此, 构建无人艇三维激光雷达目标实时识别系统将有效解决船舶近距离障碍目标识别问题。

本文设计的无人艇三维激光雷达目标识别系统(简称无人艇识别系统), 其障碍目标识别过程如下。

(1) 通过全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)、电子罗经和姿态仪获取无人艇的位置、航速、姿态角等信息, 并计算校正后的激光点云坐标。

(2) 通过对三维激光点云进行滤波、栅格化等处理后, 利用八邻域算法实现对栅格目标的实时分割和目标识别。

(3) 利用 TCP/IP 传输方式, 将障碍物识别结果发送至航行决策单元和远程控制单元。

无人艇三维激光雷达目标识别系统主要由无人艇、感知设备、船载上位机(工控机)和岸基客户端组成, 其结构如图 1 所示。

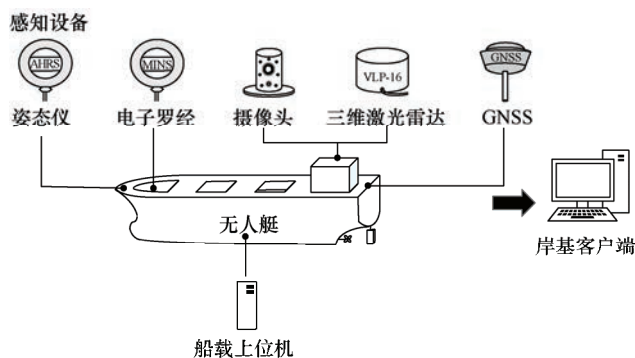


图 1 平台结构组成

系统各模块的功能如下。

(1) 三维激光雷达、摄像机等图像感知设备, 用于检测无人艇航行领域内存在的障碍物状态信息并将其发送至船上上位机。

(2) GNSS、电子罗经和姿态仪等状态感知设备, 用于检测无人艇在航行时的姿态角、加速度和实时大地坐标, 并将这些信息实时回传至船上上位机, 以对无人艇进行坐标定位和对激光雷达数据进行姿态校正。

(3) 船上上位机, 用于接收无人艇上感知设备和三维激光雷达数据, 通过对这些数据进行实时处理, 得到无人艇周围障碍目标识别结果。

(4) 岸基客户端, 用于将航行过程中无人艇状态信息、障碍物识别信息进行展示, 同时岸基管理人员可对无人艇进行远程操控。

2 系统硬件实现

2.1 硬件组成

无人艇识别系统的硬件结构主要包括船体、动力驱动模块、三维激光雷达、工控机、姿态仪、GNSS、电子罗经、供电模块、通信模块和远程遥控模块等。无人艇识别系统主要组件介绍如表 1 所示。

表 1 无人艇系统主要组件

设备名称	主要功能
无人艇船体	水面航行器
动力驱动模块	用于控制螺旋桨和舵机
三维激光雷达	获取无人艇周围环境的三维点云数据
船上上位机	用于激光雷达点云数据和其他数据的融合、处理和交互, 发送控制指令
姿态仪	获取无人艇实时姿态角、加速度等数据
GNSS	获取无人艇经纬度和航速数据
电子罗经	获取无人艇精确船首向数据
供电模块	为无人艇所有设备供电
通信模块	保证无人艇内部通信以及无人艇与岸基通信工作正常
远程遥控模块	实时远程监控无人艇工作状态

2.2 数据传输

无人艇识别系统数据传输结构如图 2 所示。首先, 由远程操控单元向无人艇发送航行任务指令, 并对无人艇航行路径点等基本参数进行设定; 其次, 船上上位机根据接收到的任务指令和环境障碍信息计算得到控制指令, 发送给运动驱动单元, 使螺旋桨和舵机

开始工作; 再次, 由三维激光雷达对无人艇周围信息进行探测, 由 GNSS 接收机、电子罗经和姿态仪等设备对无人艇的经纬度、姿态数据等航行信息进行采集, 并将三维激光雷达点云数据和航行状态数据实时发送至船上上位机; 最后, 上位机将感知设备信息传输至远程遥控单元并进行数据显示与存储。

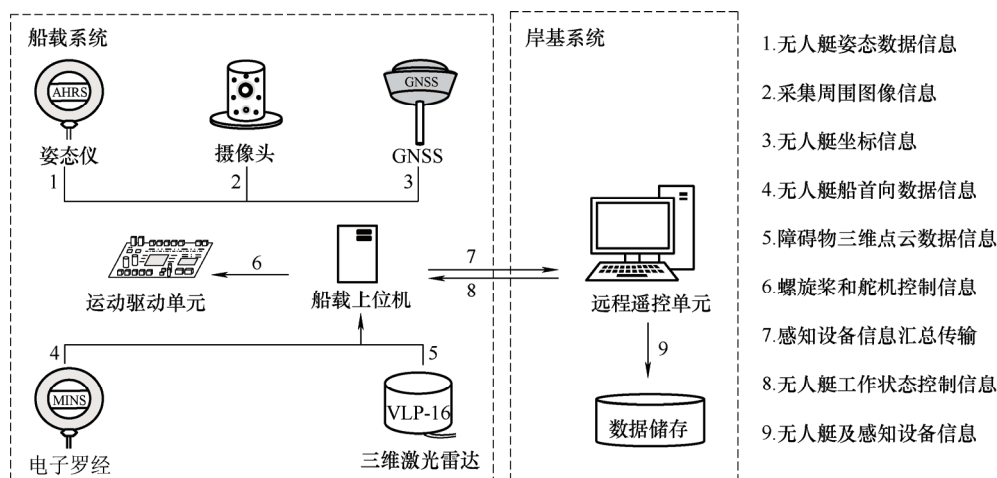


图 2 数据传输结构

3 系统软件实现

3.1 软件架构及功能

在 Microsoft Windows 10 操作系统上，基于 Microsoft Visual Studio 2017、点云库(point cloud

library, PCL)1.9.1 和 Qt 5.9.2 等平台，以 Velodyne 公司 16 线激光雷达(VLP16)为对象，开发了无人艇三维激光雷达目标识别软件“VLP16Process 1.0”(简称 VLP 1.0)，该软件可实现无人艇三维激光点云数据的实时读取、处理、识别、显示、存储和输出等功能。VLP 1.0 软件功能框架如图 3 所示。

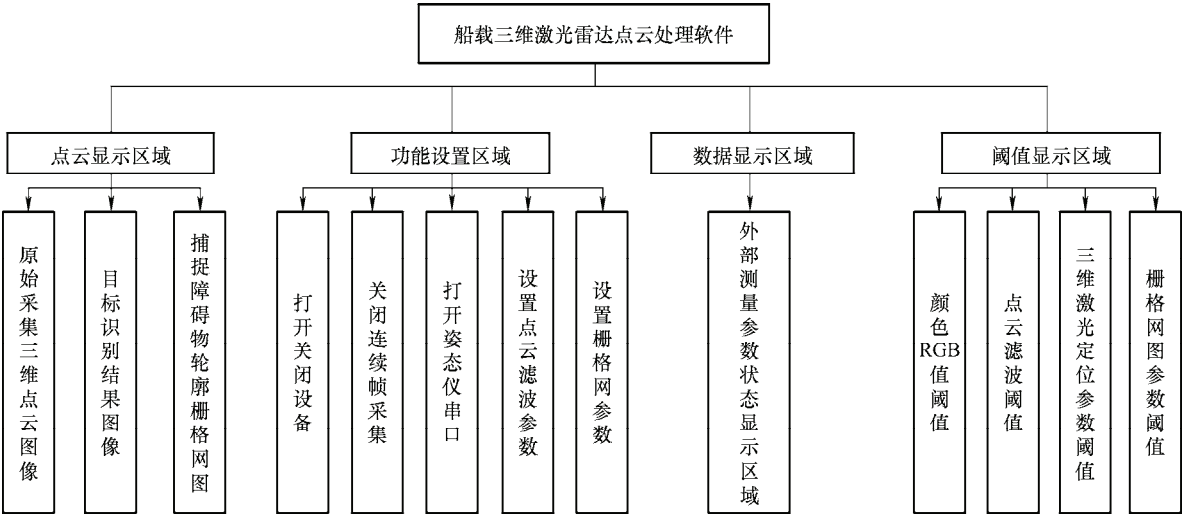


图 3 VLP1.0 软件功能框架

(1) 点云显示区域。位于系统窗口的上方，显示试验船舶在水域内三维激光雷达采集的船舶周围障碍物的三维点云图像(左方)和识别轮廓之后的栅格图像(右方)。

(2) 功能设置区域。其各按钮对应功能如表 2 所示。

表 2 软件按钮功能

按钮	功能
Open LiDAR	打开三维激光物体识别设备
Stop Receive	停止接收三维激光获取数值
Filter Set	点云滤波参数设置
Grid Set	栅格参数设置
Stop Display	停止连续帧图像采集
Open AttiCom	打开姿态传感器串口

以 Filter Set 为例，当点击该按钮后，可对点云滤波参数进行调整。如图 4 所示，在 Cloud Filter 组框内可设置 X 轴、Y 轴和 Z 轴的三维点云范围，即输入 X 轴、Y 轴和 Z 轴三个方向的最小值和最大值，该软件则根据坐标范围筛选相应的三维点云。Intensity 为可接受的三维点云反射强度的最小值。Angle 为可接受的三维点云水平角度范围。



图 4 点云滤波设置

(3) 数据显示区域。数据显示区域是用于展示本船航行过程中状态量实时变化情况，包括无人艇的航行速度(Speed)、船首向(Heading 或 Yaw)、纵倾角(Pitch)和横滚角(Roll)等。

(4) 状态输出区域。状态输出区域位于窗口左下角，可显示雷达连接、数据保存、通信等状态。

3.2 软件实现

VLP 1.0 软件界面如图 5 所示，包括原始三维点云显示、目标识别结果显示(不同颜色栅格表示不同障碍物目标)、软件运行状态显示、系统与参数设置、船舶状态显示等功能区。该软件能够实现点云预处理、点云分割、障碍栅格标识、点云显示和配置等功能，处理速度能达到 5 Hz 以上，并可将障碍物识别结果通过 TCP/IP 协议发送至航行决策计算单元，实现无人艇的实时避碰。

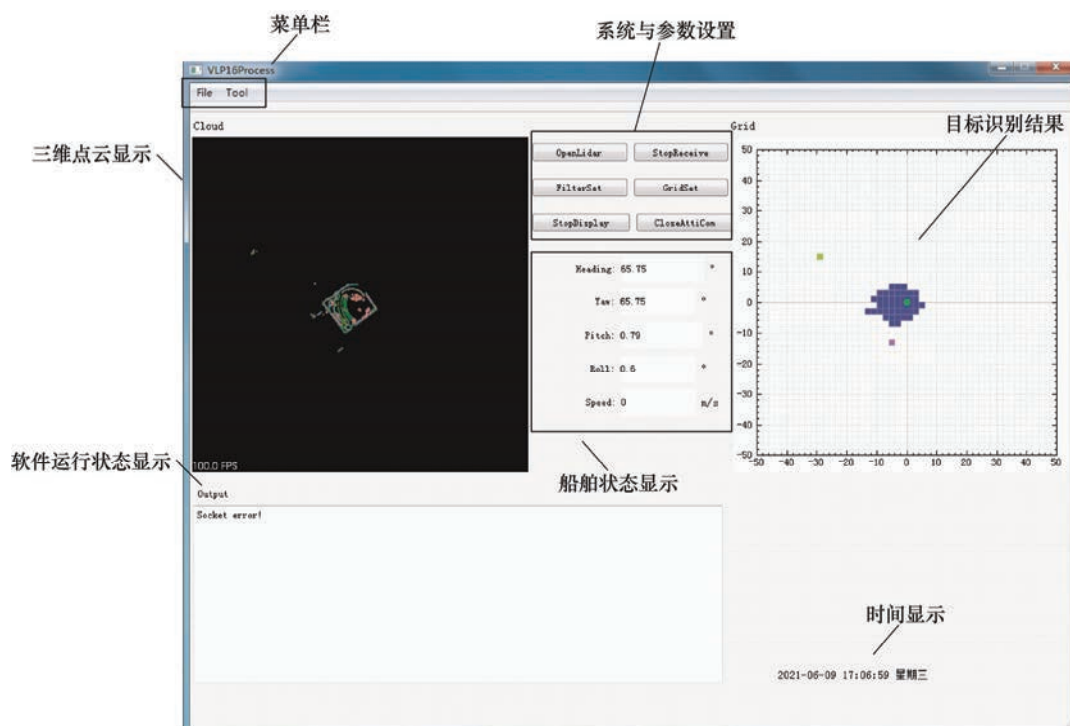


图 5 VLP 1.0 点云处理软件界面

4 系统关键技术

4.1 点云数据处理技术

点云数据预处理过程包括坐标转换与校正、点云滤波和栅格表示等过程。

(1) 坐标转换与校正。无人艇进行点云数据处理时, 主要涉及 4 个坐标系的坐标转换^[18], 即 LiDAR 坐标系 $\{i\} = (\rho, \alpha, \omega)$ (以激光雷达中心为原点的球坐标系)、无人艇附体坐标系 $\{b\} = (x, y, z)$ (以激光雷达中心为原点, 无人艇中纵剖面为 x 轴, 垂直于中纵剖面方向为 y 轴的笛卡儿坐标系)、水平面坐标系 $\{b_0\} = (x_0, y_0, z_0)$ (以激光雷达中心为原点, 水平面正北方向为 x_0 轴, 水平面正东方向为 y_0 轴的笛卡儿坐标系)和全局(大地)坐标系 $\{n\} = (X, Y, Z)$, 如图 6 所示。

在数据处理时, 首先需要将激光雷达原始点云从球坐标形式 (ρ, α, ω) 转换为无人艇坐标系下的笛卡儿坐标 (x, y, z)

$$\begin{cases} x = \rho \cos \omega \cos \alpha \\ y = \rho \cos \omega \sin \alpha \\ z = \rho \sin \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为球坐标中的球径; α 为球坐标中的方位

角; ω 为球坐标中的高度角。

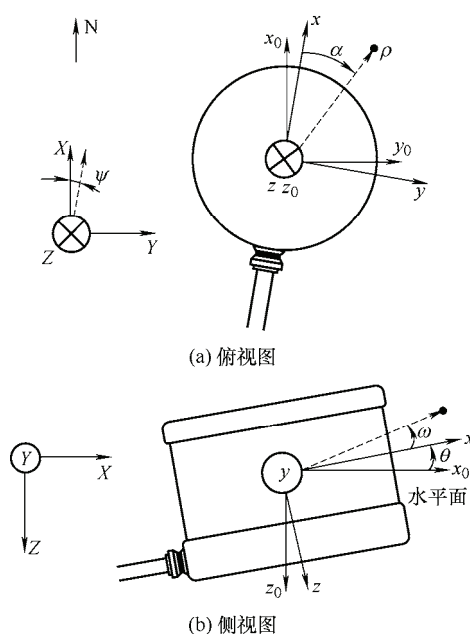


图 6 无人艇坐标系定义

激光雷达扫描过程中无人艇横摇、纵摇和偏航会引起实际扫描到的点云坐标与无人艇在水平稳态下(水平面坐标系 $\{b_0\}$)的坐标不一致, 因此有必要对点云坐标进行运动补偿和校正。设 ϕ 、 θ 和 ψ 分别为无人艇横滚角、纵倾角和船首向(偏航角), 则其旋转矩阵分别为 $R_{x,\phi}$ 、 $R_{y,\theta}$ 和 $R_{z,\psi}$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{x,\phi} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_{y,\theta} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_{z,\psi} &= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

无人艇在摇晃情况下, 坐标系 $\{b\}$ 下的激光雷达点云坐标 (x, y, z) 可校正为水平面坐标系下的坐标 (x_0, y_0, z_0) , 即

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{x,\phi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{z,\psi} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

将 (x_0, y_0, z_0) 与激光雷达中心点在全局坐标系 $\{n\}$ 下的坐标进行叠加, 即可得到每一个激光点云在 $\{n\}$ 下的坐标值。假设 t 时刻某一点云在 $\{i\}$ 坐标系下的坐标为 (ρ, α, ω) , 则其对应在全局坐标系 $\{n\}$ 下的坐标为 (X, Y, Z)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} + \mathbf{R}_{x,\phi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{z,\psi} \begin{pmatrix} \rho \cos \omega \cos \alpha \\ \rho \cos \omega \sin \alpha \\ \rho \sin \omega \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, (X_L, Y_L, Z_L) 为 t 时刻激光雷达中心点在全局坐标系 $\{n\}$ 下的坐标, 通过 GNSS 测量可得。

(2) 点云滤波。三维激光雷达点云滤波主要包括 3 个流程: 首先, 采用直通滤波器, 根据需要分别设置激光雷达点云在 x 、 y 和 z 轴的阈值以及扫描角度的阈值, 将阈值外的点云去掉。其次, 通过体素化算法对点云数据进行下采样, 为点云数据创建一个三维体素栅格, 该体素内的所有点用重心点表示, 过滤其余点云数据, 在保存点云形状特征的同时减少数据点。最后, 利用点云反射强度设置阈值, 低于该阈值的点云数据, 将其作为噪声点滤除。

(3) 栅格表示。以 Velodyne 公司 VLP-16 激光雷达为例, 其每秒最多产生 30 万个数据点, 在目标检测时如果对每个点都进行处理, 会导致计算量过大, 实时性变差, 因此需要将点云三维数据转换为栅格地图来处理^[20-22]。本文根据激光雷达检测范围建立二维栅格地图, 以激光雷达中心为栅格地图的原点, 如图 7 和图 8 所示。其中, R 为激光雷达的探测范围, 栅格大小与船长有关, 通常一个栅格里包含有若干个激光扫描点。栅格属性包括栅格坐标、有无激光返回点、栅格包含的点数量和平均高度值

等。定义栅格点数量大于某值为障碍栅格, 否则为非障碍栅格。

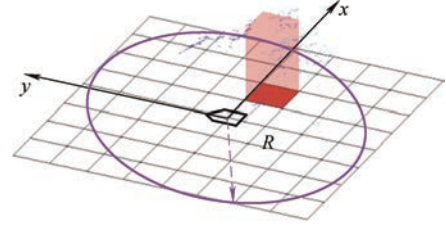


图 7 点云投影

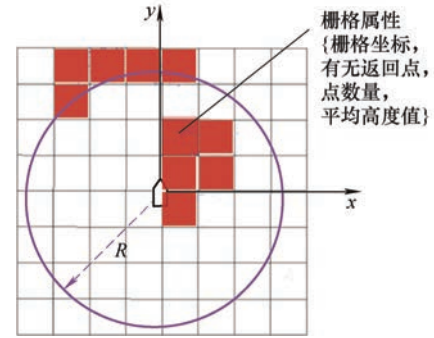


图 8 栅格地图

4.2 点云分割技术

八邻域搜索方法以网格为基础, 具有易实现、计算量小等优点^[23], 因此本文利用八邻域膨胀的快速区域标记方法实现点云分割。选定栅格 C 作为当前中心栅格, 与当前网格所有方向相邻接的栅格为 8 个邻接栅格, 标号分别为 $\{N_0, N_1, N_2, \dots, N_7\}$, 如图 9 所示。

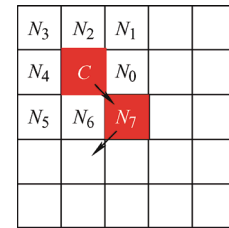


图 9 八邻域定义

八邻域实现点云分割的步骤如下。

(1) 以栅格坐标系最左下角栅格(x 和 y 坐标值均最小)为起点, 按照从左至右、从下到上的方式进行检索, 找到的第一个障碍栅格为障碍物 O_1 的起点栅格。

(2) 以起点栅格正右方栅格 N_0 为初始方向 ($C \rightarrow N_0$) 逆时针遍历其八邻域栅格。

(3) 若 N_p ($p=0, 1, 2, \dots, 7$) 为障碍栅格, 则以 N_p 为中心栅格, 在当前搜索方向 ($C \rightarrow N_p$) 基础上顺时针旋转 90° (搜索方向减 2), 以避免与上一次已搜索栅格重复。

(4) 重复步骤(2)和(3), 继续寻找下一个障碍网格, 直到搜索不到任何其他障碍栅格(排除已搜索障碍栅格)为止, 得到障碍物 O_1 所有障碍栅格集。

(5) 以栅格坐标系最左下角栅格为起点寻找下一个障碍物 O_2 的起点栅格, 并保证障碍物 O_2 的起点栅格与 O_1 所有障碍栅格都不重复, 重复步骤(2)到(4), 得到障碍物 O_2 所有障碍栅格集。

(6) 依次类推, 得到栅格地图上所有障碍物的障碍栅格集。

在示例中, 对栅格进行分割后获得的障碍栅格结果如图 10 所示, 障碍物“1”“2”“3”为分割后的障碍物目标。

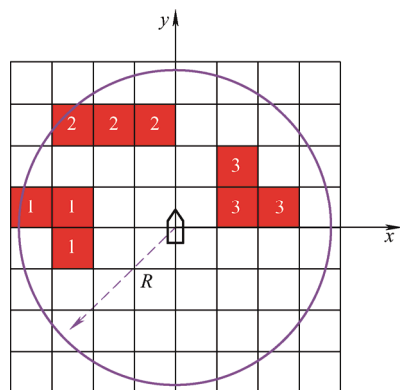


图 10 障碍栅格分割结果示例

4.3 激光点云图像远程传输

考虑到三维激光点云实时数据量很大, 受传输带宽限制通常难以实现对三维点云数据的实时远程监控。因此, 本系统研发了一种三维激光点云数据压缩技术, 将三维点云转换为图像数据, 并根据船舶实时船首向对图像进行旋转校正(图像正上方为正北方向), 以达到与航海雷达相同的显示效果。三维激光雷达目标实时识别系统是利用船载计算机通过 UDP 协议发送三维激光雷达数据到目的主机 IP 的方式, 实现对无人船运动过程以及对感知设备获取的周围障碍物信息的实时监控和存储, 如图 11 所示。

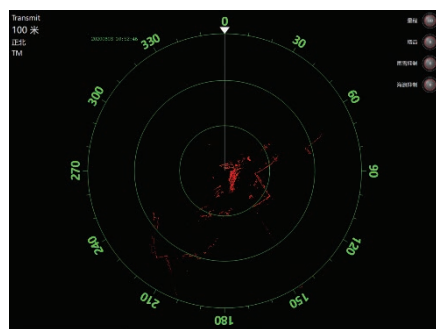


图 11 激光点云图像远程传输效果

5 试验验证

本文通过对无人艇进行室外水池环境下的自主航行试验, 实现对无人艇三维激光雷达目标识别系统硬件、软件和算法性能的验证。在船尾安装三维激光雷达和摄像头, 以同时获取无人艇周围障碍物的三维点云数据和视频信息, 如图 12 所示。



图 12 无人艇试验平台

2021 年 5 月 1 号, 在福州市闽江学院校内水道搭建无人艇三维激光雷达目标实时识别系统平台, 具体试验环境如图 13 所示。



图 13 试验场景

试验中所用的 Velodyne VLP-16 型三维激光雷达在水面环境的有效距离大致为 100 m, 扫描频率为 5~20 Hz, 采用二维栅格法对激光点云进行栅格化。采用八邻域算法对栅格进行分割。所获取的视频信息和分割后的栅格信息分别如图 14、15 所示, 其中栅格中每一种颜色代表同一个障碍目标。从图 14 和图 15 对比图中可以看出, 系统可以准确识别出无人艇周围的障碍目标, 并对识别到的目标进行了正确分类。



图 14 视频显示障碍物图像

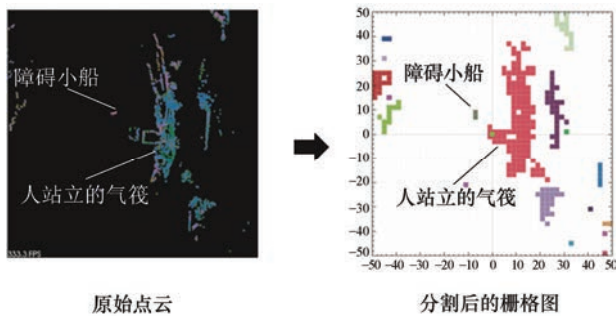


图 15 点云分割和目标识别算法

由三维激光雷达目标识别系统界面可知, 系统将获取的三维激光雷达数据转换为栅格图像数据, 并根据电子罗经获取的船首向数据以及姿态仪获得的姿态角数据, 对图像进行实时旋转校正, 使图像的正上方为正北方向。选取试验过程中时间为 90 s、160 s、240 s 和 314 s 的典型点云图像和栅格图像进行验证, 如图 16 所示, 图中 t 表示试验过程记录的时间, ψ 表示该时刻的船首向。从试验结果可以看出。

(1) 激光雷达点云实时处理频率大于 5 Hz, 满足无人艇航行感知与控制的需要。

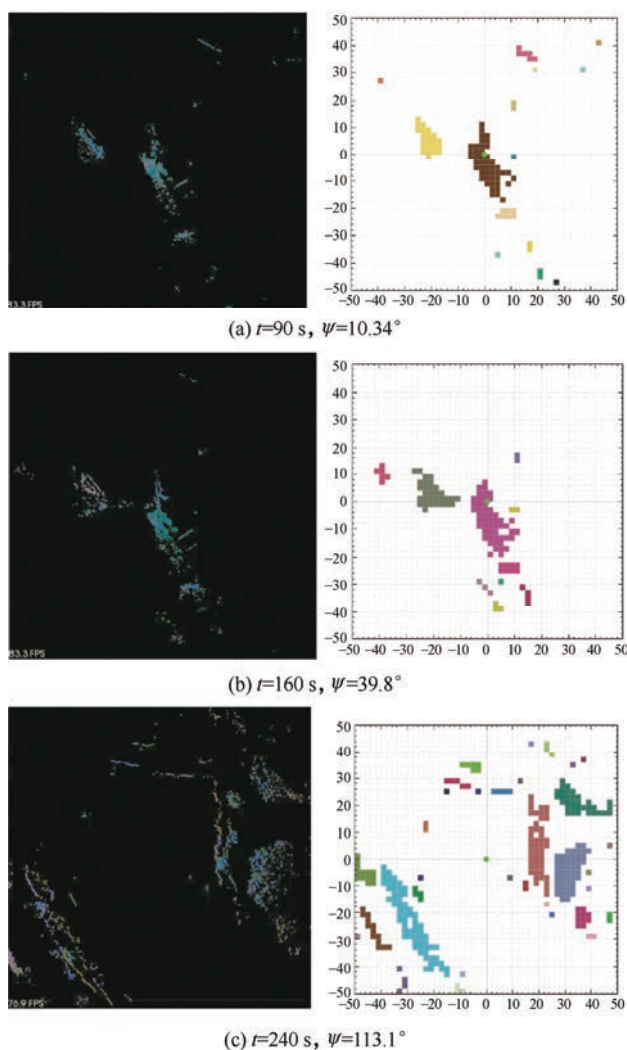


图 16 点云图像自动校准识别

(2) 系统可以实现对无人艇周围环境的可靠感知以及对点云图像的角度校正。

(3) 通过将不同时刻识别的激光点云障碍物信息与该时刻的采集图像进行匹配, 发现识别的障碍物结果能够与图像中的障碍物对应, 这验证了点云处理和八邻域目标分割算法的有效性。

6 结论

本文采用三维激光雷达等感知技术, 设计了一种应用于航行环境下的无人艇三维激光雷达目标实时识别系统, 该系统可以在无人艇航行过程中实时对周围障碍物进行感知与识别。通过构建无人艇三维激光雷达目标实时识别系统真实平台, 实现了对系统各项功能与可靠性的测试, 结果表明该系统能够可靠识别无人艇周围近 100 m 范围内的障碍物目标。

虽然目前三维激光雷达的有效距离探测距离较短, 无法替代常规船舶航海雷达远距离障碍物探测的功能, 但三维激光雷达目标感知能有效弥补现有船舶近距离目标感知的不足, 并在船舶自主靠离泊过程中提供泊位轮廓信息。此外, 三维激光雷达目标感知系统还能与传统航海雷达自动标绘进行融合, 进一步提升船舶的环境感知能力。

参 考 文 献

- [1] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
LIU Chenguang, CHU Xiumin, WU Qing, et al. A review and prospect of USV research[J]. Ship Building of China, 2014, 55(4): 194-205.
- [2] 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.
- [3] 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(8): 79-81.
ZHAN Huarui, JIANG Xiaorong. Image recognition algorithm of unmanned aerial vehicle video under complex background[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(8): 79-81.
- [4] 胡延平, 刘菲, 魏振亚, 等. 基于毫米波雷达与视觉信息融合的车辆跟踪[J/OL]. 中国机械工程. [2021-06-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20201112.1014.004.html>.
HU Yanping, LIU Fei, WEI Zhenya, et al. Vehicle tracking method based on radar and vision information fusion[J/OL]. Chinese Mechanical Engineering. [2021-06-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20201112.1014.004.html>.
- [5] 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, 2017, 23(1): 27-36.
LI Xiaomao, ZHANG Xin, WANG Wentao, et al. 3D LiDAR-based marine object detection for USV[J]. Journal of Shanghai University, 2017, 23(1): 27-36.
- [6] STANISLAS L, DUNBABIN M. Multimodal sensor fusion for robust obstacle detection and classification in the maritime RobotX challenge[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 44(2): 343-351.
- [7] MH&L Staff. Maersk first to test lidar on container ship[EB/OL]. [2021-06-29]. <https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/22054981/maersk-first-to-test-lidar-on-container-ship>.
- [8] 朱飞祥, 王少博, 邢胜伟, 等. 基于三维激光雷达的沿海泊位码头识别算法[J]. 中国航海, 2020: 75-78, 96.
ZHU Feixiang, WANG Shaobo, XING Shengwei, et al. Wharf identification algorithm based on 3D LiDAR[J]. Navigation of China, 2020: 75-78, 96.
- [9] 陈晓冬, 张佳琛, 庞伟淞, 等. 智能驾驶车载激光雷达关键技术与应用算法[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 34-46.
CHEN Xiaodong, ZHAGN Jiachen, PANG Weisong, et al. Key technology and application algorithm of intelligent driving vehicle LiDAR[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 34-46.
- [10] HRABAR S. An evaluation of stereo and laser - based range sensing for rotorcraft unmanned aerial vehicle obstacle avoidance[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(2): 215-239.
- [11] 李捷, 袁夏, 赵春霞, 等. 基于 2 维激光雷达的小型地面移动机器人自主回收方法[J]. 机器人, 2017, 39(5): 688-696.
- LI Jie, YUAN Xia, ZHAO Chunxia, et al. Automatic withdrawal method based on 2D laser radar for small ground mobile robot[J]. Robot, 2017, 39(5): 688-696.
- [12] 赵玉梁. 基于三维激光雷达的无人船目标检测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
ZHAO Yuliang. Unmanned surface vehicle target detection based on 3D Lidar[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [13] VILLA J, AALTONEN J, KOSKINEN K T. Path-following with lidar-based obstacle avoidance of an unmanned surface vehicle in harbor conditions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1812-1820.
- [14] 郭珏菡, 柳晨光, 于周讯, 等. 智能船舶激光雷达感知技术综述与展望[C]//第十五届中国智能交通年会科技论文集. 深圳: 中国智能交通协会, 2020: 162-173.
GUO Juehan, LIU Chenguang, YU Zhouxun, et al. Application and outlook of ship perception based on LiDAR[C]//Proceedings of the 15 ITS China Congress. Shenzhen: China Intelligent Transportation Systems Association, 2020: 162-173.
- [15] 刘德庆, 张杰, 金久才. 基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 273-278.
LIU Deqing, ZHANG Jie, JIN Jiucan. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 273-278.
- [16] 柳晨光, 初秀民, 毛庆洲, 等. 无人船自适应路径跟踪控制系统[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 216-227.
LIU Chenguang, CHU Xiumin, MA Qingzhou, et al. Adaptive path following control system for unmanned surface vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 216-227.
- [17] 王贵槐, 谢朔, 柳晨光, 等. 基于激光雷达的内河无人船障碍物识别方法[J]. 光学技术, 2018, 44(5): 602-608.
WANG Guihuai, XIE Shuo, LIU Chenguang, et al. Obstacle identification method based on laser radar for inland unmanned vessel[J]. Optical Technique, 2018, 44(5): 602-608.
- [18] MIADLICKI K, PAJOR M, SAKÓW M. Ground plane estimation from sparse LIDAR data for loader crane sensor fusion system[C] // Proceedings of 2017 International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. Miedzyzdroje: IEEE, 2017: 717-722.
- [19] 庄加兴, 焦依, 殷非. 毫米波雷达与激光雷达在无人船上的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 79-82, 119.

- ZHUANG Jiaying, JIAO Nong, YIN Fei. Application of MMW Radar and LiDAR in MASS[J]. Ship Engineering, 2019, 41(11): 79-82, 119.
- [20] QI C R, LIU Wei, WU Chenxia, et al. Frustum PointNets for 3D object detection from RGB-D data[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Utah: IEEE, 2018: 918-927.
- [21] 胡晋山, 康建荣, 张琪, 等. 一种八邻域图像边界追踪改进算法[J]. 测绘通报, 2018(12): 21-25.
- HU Jinshan, KANG Jianrong, ZHANG Qi, et al. An improving image boundary tracking algorithm based on eight neighborhood[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(12): 21-25.
- [22] 张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 9-19.
- ZHANG Yin, REN Guoquan, CHENG Ziyang, et al. Application research of three-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 9-19.
- [23] KAUR P, LAMBA I M S, GOSAIN A. A robust method for image segmentation of noisy digital images[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Taipei, China: IEEE, 2011: 1656-1663.
- [24] THOMPSON D, COYLE E, BROWN J. Efficient LiDAR- based object segmentation and mapping for maritime environments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(2): 352-362.
- [25] 汪汉云. 高分辨率三维点云目标识别技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- WANG Hanyun. Research on object detection for high resolution 3D point cloud[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [26] 董明晓, 郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(2): 245-248.
- DONG Mingxiao, ZHENG Kangping. A random filter algorithm for reducing noise error of point cloud data[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(2): 245-248.

作者简介: 柳晨光, 男, 1988 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为船舶智能航行控制。

E-mail: liuchengguang@whut.edu.cn

初秀民(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为水路交通感知与控制、智能船舶。

E-mail: chuxm@whut.edu.cn