

# 基于变尺寸栅格地图的船载激光雷达目标检测

李立刚<sup>1</sup>, 郭玉杰<sup>2</sup>, 李林<sup>2</sup>, 郝宪锋<sup>2</sup>, 金久才<sup>3</sup>, 刘德庆<sup>3</sup>, 戴永寿<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580;

<sup>2</sup>中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

<sup>3</sup>自然资源部第一海洋研究所海洋物理与遥感研究室, 山东 青岛 266061

**摘要** 激光雷达具有测距精度高、受环境因素影响小及全天时工作的特点, 非常适合用于无人船障碍物检测。由于激光雷达点云近密远疏, 基于栅格地图的海上障碍物检测的精度就会受到栅格尺寸大小的直接影响。建立了一种栅格尺寸线性增长的变尺寸栅格地图, 结合高度差判别法和八邻域连通分量标记法进行栅格划分及聚类, 通过盒子模型提取障碍物信息, 得出更加精确的障碍物检测结果。开展了海上实船实验, 并对所提方法与传统方法的处理结果进行了比较, 对比处理结果可得, 对于近岸处中小型渔船的检测, 所提方法可有效地解决传统方法中栅格划分和聚类效果较差的问题, 实现更精确实时的海上障碍物检测, 为无人船避障提供数据支撑。

**关键词** 遥感; 无人船; 激光雷达; 障碍物检测; 变尺寸栅格地图

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0828002

## Target Detection of Shipborne Lidar Based on Variable Size Grid Map

Li Ligang<sup>1</sup>, Guo Yujie<sup>2</sup>, Li Lin<sup>2</sup>, Hao Xianfeng<sup>2</sup>, Jin Jiucui<sup>3</sup>, Liu Deqing<sup>3</sup>, Dai Yongshou<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China),  
Qingdao, Shandong 266580, China;

<sup>2</sup>College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China),  
Qingdao, Shandong 266580, China;

<sup>3</sup>Laboratory of Marine Physics and Remote Sensing, First Institute of Oceanography, Ministry of  
Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

**Abstract** Light detection and ranging (LiDAR) offers the advantages of high-ranging accuracy, negligible environmental influence, and all-day operation, making it suitable for unmanned ship obstacle detection. Since LiDAR point cloud is nearly dense and far sparse, the grid's size has a direct effect on the accuracy of obstacle detection based on a grid map. In this study, a variable size grid map with a linear increase of grid size is established. The grid is divided and clustered using the height difference discrimination method and eight-neighborhood connected component marking approach, and the obstacle information is extracted using a box model, yielding a more accurate obstacle detection result. The proposed method can effectively solve the problems of grid division and poor clustering effect in traditional approaches for the detection of small and medium fishing boats near shore, according to the results of a real ship experiment conducted at sea that compared the processing results of the proposed method with the traditional approach. The proposed method provides more accurate and real-time detection of obstacles at sea, as well as data support for unmanned ship obstacle avoidance.

**Key words** remote sensing; unmanned boat; LiDAR; obstacle detection; variable size grid map

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-04-03; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC14052)、中央高校基本科研业务费专项资助(19CX05003A-1)

通信作者: \*daiys@upc.edu.cn

## 1 引言

无人船作为一种新型的水面智能平台,在军事领域和民用领域中扮演着日益重要的角色,而快速精确的障碍物检测能力是无人船顺利执行任务的前提和关键。目前较为常用的无人船障碍物检测手段有航海雷达、激光雷达、摄像头及毫米波雷达等<sup>[1]</sup>。其中激光雷达具有测距精度高、受环境因素影响小及全天时工作等优点,非常适合用于在复杂多变的水上环境中进行障碍物检测<sup>[2]</sup>。

激光雷达产生的数据为具有三维坐标及反射强度信息的点云数据,点云数据具有量大、无序及近密远疏的特点,如何对其进行高效的处理是实现快速精确的障碍物检测的关键<sup>[3]</sup>。按照对点云数据处理方法的不同,可将基于激光雷达进行障碍物检测的方法分为两类:第一类是直接对点云数据本身进行处理并得出障碍物检测结果的方法<sup>[4-6]</sup>,此类方法处理结果相对精确,但运算量大且实时性差,适用于对实时性要求不高的系统;第二类是通过栅格地图对点云数据进行处理并得出障碍物检测结果的方法<sup>[7-8]</sup>,此类方法计算效率高,实时性好,适用于对实时性要求较高的系统。由于无人船的工作环境具有复杂多变的特点,需要具备实时性较高的障碍物检测能力,因此相比于第一类方法,第二类方法更加适用于无人船障碍物检测。

在通过栅格地图对点云数据进行处理时,栅格尺寸是影响检测精度和处理速度的关键因素<sup>[9]</sup>。针对点云近密远疏的特点造成栅格尺寸难以合理选取的问题,刘德庆等<sup>[10]</sup>提出了一种根据障碍物总体数量和处理时间选取栅格尺寸的方法,其中栅格尺寸与障碍物总体数量及处理时间均为反比关系,在综合考虑障碍物总体数量和处理时间后选取合适的栅格尺寸来进行障碍物检测,此方法仅考虑了障碍物总体数量和处理时间两种因素,未考虑距离因素,难以对远距离处分布有多个障碍物等情况实现精确的障碍物检测。Börcs等<sup>[11]</sup>通过建立两个不同栅格尺寸的栅格地图来对障碍物进行检测,先通过较大栅格尺寸的栅格地图初步得到障碍物相关信息,再通过较小栅格尺寸的栅格地图对其进行进一步处理,最后得出障碍物检测结果。此方法计算过程复杂,处理时间较长,降低了检测的实时性。

针对激光雷达点云近密远疏的特点造成栅格尺寸难以合理选取的问题,本文提出了一种基于变尺寸栅格地图对点云数据进行处理的方法,有效地解决了传统方法检测效果较差的问题,实现了更精确实时的障碍物检测,为无人船避障提供数据支撑。

## 2 基本原理

基于变尺寸栅格地图进行障碍物检测的步骤如下:首先建立用于处理点云数据的变尺寸栅格地图并进行点云投影,然后结合栅格划分及聚类算法对栅格进行处理,最后通过盒子模型获取障碍物信息并得出障碍物检测结果。基于变尺寸栅格地图进行障碍物检测的算法流程如图 1 所示。

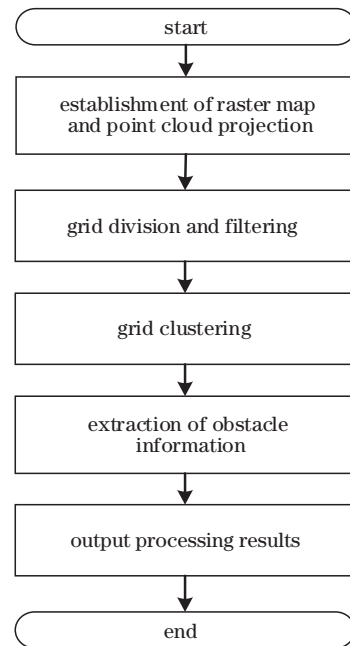


图 1 基于变尺寸栅格地图的激光雷达障碍物检测算法流程  
Fig. 1 Flowchart of lidar obstacle detection algorithm based on variable size grid map

### 2.1 栅格地图的建立及点云投影

以无人船为坐标原点,结合激光雷达的检测范围建立栅格地图,由于激光雷达点云的密集程度会随着距离的增加而线性降低,本文使栅格的尺寸以等差数列的形式增加,栅格地图的大小用  $R \times R$  (单位为  $m \times m$ ) 来表示,对应点云  $X$ 、 $Y$  的坐标范围即为  $[-R/2, R/2]$ 。变尺寸栅格地图如图 2 所示。

以第一、四象限中栅格的长度取值为例,设定栅格的长度从原点处的  $a_1$  到随  $X$  坐标的增加而增长

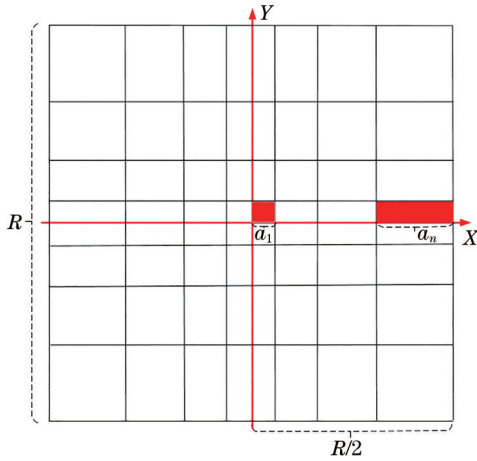


图 2 变尺寸栅格地图示意图

Fig. 2 Schematic of variable size raster map

至  $R/2$  处的  $a_n$ , 得到栅格长度增长范围、栅格增长次数与栅格地图大小之间关系的表达式为

$$\begin{cases} a_1 + (n - 1) \times d = a_n \\ n \times (a_1 + a_n) / 2 = R/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_1$  为原点处栅格的长度;  $a_n$  为 X 轴坐标为  $R/2$  时栅格的长度;  $d$  为栅格长度增长的公差;  $n$  为栅格增长次数。

由(1)式可知, 在栅格地图大小及栅格增长范围确定以后, 即可求得相应的栅格增长次数  $n$  及栅格长度增长的公差  $d$ , 计算方法分别为

$$\begin{cases} n = R / (a_1 + a_n) \\ d = (a_n - a_1) / (n - 1) \end{cases} \quad (2)$$

在得到了栅格长度的增长次数  $n$  后, 为得到 X 正半轴中每个栅格对应的 X 坐标的范围, 对同一纵坐标下的栅格沿 X 轴正方向从 1~ $n$  进行排序, 将第  $k$  个栅格对应的 X 坐标的范围表示为  $[P_{k-1}, P_k]$ ,  $P_k$  的计算公式为

$$P_k = a_1 \times k + k \times (k - 1) \times d / 2, \quad n + 1 > k > 0. \quad (3)$$

其中  $P_0 = 0$ 。由(3)式即可得到 X 正半轴中每个栅格对应的 X 坐标的范围, 根据坐标轴的对称性, 进而可得 X 负半轴中每个栅格对应的 X 坐标的范围, 同理可得每个栅格对应的 Y 坐标的范围, 最终得到栅格地图中每个栅格对应的 X、Y 坐标的范围, 完成栅格地图的建立。

将接收的点云数据依据其 X、Y 坐标投影至相应的栅格内, 同时求出每个栅格中点云的 X、Y 及 Z 坐标的最值和点云总数, 为后续判断是否为障碍栅格提供依据。点云投影流程如图 3 所示。

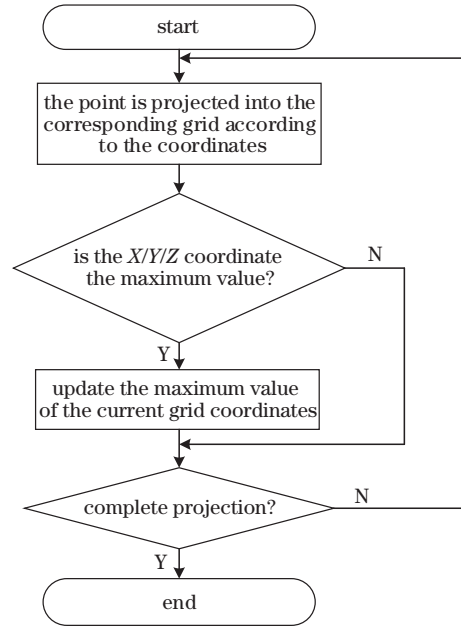


图 3 点云投影流程

Fig. 3 Flowchart of point cloud projection

## 2.2 栅格划分及虚假障碍栅格的滤除

由于海面障碍物具有一定的高度值, 其所形成的回波点之间也会有相应的高度差。基于此特点, 采用高度差判别法来将栅格划分为障碍栅格与非障碍栅格<sup>[12]</sup>, 划分规则为

$$\text{label}[i, j] = \begin{cases} 0, & H_{\max} - H_{\min} \leq \eta \\ 1, & H_{\max} - H_{\min} > \eta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $H_{\max}$  为当前栅格中点的 Z 坐标的最大值;  $H_{\min}$  为当前栅格中点的 Z 坐标的最小值;  $\eta$  为设定的高度差阈值;  $\text{label}[i, j]$  为当前栅格的标记值;  $i, j$  分别为在 X、Y 轴方向上的栅格的序号。

由于海上环境复杂多变, 桥洞、低空飞行的海鸥等不确定因素均可能产生虚假障碍栅格, 其中桥洞等悬空障碍物所产生的回波点均具有较大的高度值, 海鸥等小型障碍物所产生的回波点分布较为稀疏。基于以上特点遍历所有障碍栅格, 将满足以下判断条件的障碍栅格判定为虚假障碍栅格并进行滤除, 使其标记值为 0:

- 1) 邻近栅格中不存在障碍栅格且栅格内点云总数小于设定的数量阈值  $\alpha$ ;
- 2) 当前栅格内 Z 坐标的最小值  $H_{\min}$  大于设定的高度阈值  $H_t$ 。

## 2.3 栅格聚类及障碍物信息的提取

在标记出所有障碍栅格后, 需对含有同一障碍物回波点的障碍栅格进行聚类, 进而提取出障碍物存在位置及范围。结合属于同一障碍物的障碍栅

格之间距离较近的特点,采用八邻域连通分量标记法进行障碍栅格的聚类<sup>[7]</sup>,即把当前障碍栅格与其周围分布的障碍栅格归为一类进行处理,具体聚类过程如下。

通过两次遍历栅格地图,对属于同一障碍物的障碍栅格进行聚类。第一次遍历:按照从左到右、从下至上的顺序遍历栅格地图中的栅格,若当前栅格为障碍栅格,则依据其邻近栅格(左、下、左下、右下)标记值的分布情况对当前栅格的标记值进行处理,依据如下。

1) 若邻近栅格中不存在障碍栅格,则将新的标记值赋予当前栅格。

2) 若邻近栅格中存在障碍栅格且障碍栅格的标记值相同,则将该标记值赋予当前栅格。

3) 若邻近栅格中存在障碍栅格且障碍栅格的标记值不相同,将障碍栅格中最小的标记值赋予当前障碍栅格,并记录当前不同的标记值(将其视为同一连通域)。

第二次遍历:对同一连通域中具有不同标记值的障碍栅格的标记值进行统一(取最小标记值),完成栅格聚类。

在完成栅格聚类后,便可依据盒子模型提取出障碍物存在的位置及范围<sup>[13]</sup>,计算方法为

$$\begin{cases} L = X_{\max} - X_{\min} \\ W = Y_{\max} - Y_{\min} \\ H = Z_{\max} \\ X_{\text{loc}} = (X_{\max} + X_{\min})/2 \\ Y_{\text{loc}} = (Y_{\max} + Y_{\min})/2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ 、 $Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$ 分别为同一类障碍栅格中 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 坐标的最小值和最大值; $L$ 、 $W$ 、 $H$ 分别为障碍物存在区域的长、宽、高; $X_{\text{loc}}$ 、 $Y_{\text{loc}}$ 分别为障碍物存在位置的 $X$ 、 $Y$ 坐标。

### 3 实验及结果分析

为验证基于变尺寸栅格地图的障碍物检测方法的有效性,进行了海上实船实验,并获取了实验数据。分别采用基于传统栅格地图的障碍物检测方法(方法一)和基于变尺寸栅格地图的障碍物检测方法(方法二)对实验数据进行处理,并对两种方法的实际处理效果进行比较与分析。

#### 3.1 实验准备

相较于陆地环境,激光雷达在海上检测时检测效果易受海浪影响,本次实验地点为青岛唐岛湾近

岸海域,实验海况为2级,激光雷达检测效果受海浪影响较小。经调研分析,选用速腾聚创公司的RS-16型激光雷达进行海上障碍物检测,结合实际应用需求,本次实验中将其工作频率设定为10 Hz,激光雷达在无人船上的安装高度为1.3 m,激光雷达性能参数如表1所示。

表1 激光雷达性能参数  
Table 1 Performance parameters of lidar

Parameter	Value
Line number	16
Horizontal field of view angle / (°)	360
Vertical field of view angle / (°)	±15
Horizontal angular resolution / (°)	0.1/0.2/0.4
Vertical angular resolution / (°)	2.0
Working frequency / Hz	5/10/20
Ranging accuracy / cm	±2
Range / m	0~150

根据激光雷达的最大测量距离,设定栅格地图的大小为300 m×300 m;结合激光雷达的安装高度、水平角度分辨率及垂直角度分辨率,将方法二中的栅格增长范围设为1~5 m;同时方法一中的栅格尺寸分别取1 m×1 m、5 m×5 m;与陆地环境中的障碍物不同,在本次实验场景中海上障碍物的高度大多处于0.5~2.5 m,宽度大多处于0.5~2 m,长度大多处于3~10 m;结合海上障碍物的形状特点,将两种方法中高度差阈值 $\eta$ 均设置为0.15 m,点云总数阈值 $\alpha$ 均设置为3,由于无人船整体高度为2 m,为保证无人船安全航行,将两种方法中高度阈值 $H_i$ 均设置为3 m。

#### 3.2 实验过程及结果分析

本次实验过程中,使无人船自身保持停泊状态来对前方不同距离处的5个停泊船只进行检测,实验场景及原始点云如图4所示。5个被测目标对应点云在图中用圆圈标注,无人船位置在图中用三角号标注。

由原始点云图可得,相较于陆地环境,海面的镜面反射导致海面的回波点较少,点云图中的大部分回波点是岸堤形成的,在近距离处的点云分布相对密集,在远距离处的点云分布相对稀疏。分别采用传统方法和所提方法对本组实验数据进行处理,传统方法中栅格尺寸的大小分别取1 m×1 m、5 m×5 m,所提方法中栅格尺寸增长范围取1~5 m,目标存在区域范围及位置信息采用盒子模



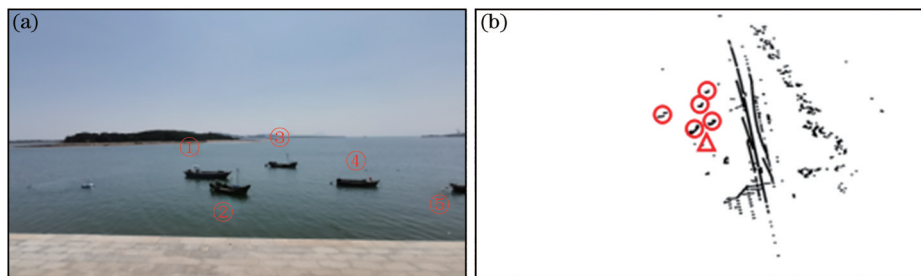


图 4 实验场景及原始点云图。(a)实验场景图;(b)原始点云图

Fig. 4 Experimental scene and original point cloud map. (a) Experimental scene; (b) point cloud image

型<sup>[13]</sup>来表示。两种方法对实验数据的处理效果如图 5 所示。

从处理效果图可得,由于方法二对点云图中所有点云均进行了处理,岸堤中大部分障碍物也被检

测到,检测结果中包含了较多其他障碍物的信息。为更直观地查看不同方法对被测目标的检测效果,截取出不同方法对无人船前方 5 个目标的检测结果,如表 2 所示。

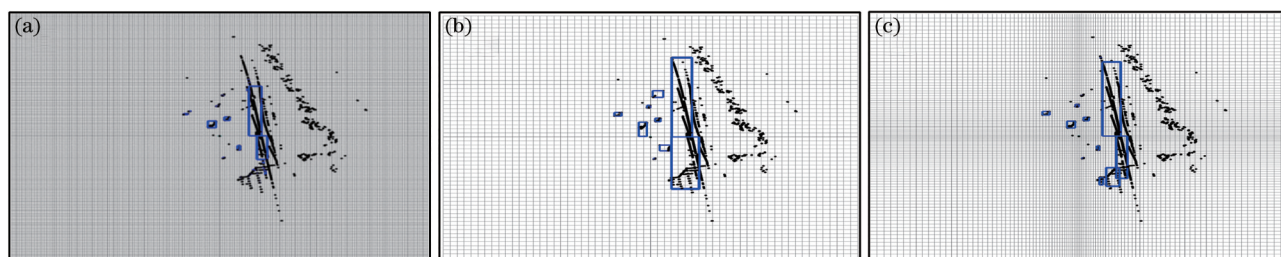


图 5 不同方法处理效果图。(a)栅格尺寸取 1 m×1 m 时方法一处理效果;(b)栅格尺寸取 5 m×5 m 时方法一处理效果;(c)方法二处理效果

Fig. 5 Processing effect of different methods. (a) Processing effect of method 1 when the grid size is 1 m×1 m; (b) processing effect of method 1 when the grid size is 5 m×5 m; (c) processing effect of method 2

表 2 不同方法检测结果

Table 2 Detection results of different methods

Target	Method	Grid size / (m×m)	Length /m	Wide /m	High /m	Coordinate
1	1	1×1	5.85	8.41	2.57	(-5.50,14.09)
		5×5	5.85	17.65	2.57	(-5.50,9.47)
	2	1×1-5×5	5.85	8.41	2.57	(-5.50,14.09)
2	1	1×1	3.92	4.39	1.88	(5.35,20.99)
		5×5	3.92	4.39	1.88	(5.35,20.99)
	2	1×1-5×5	3.92	4.39	1.88	(5.35,20.99)
3	1	1×1	3.04	1.35	0.25	(-24.38,26.73)
		5×5	1.30	0.56	2.15	(-21.68,29.97)
	2	1×1-5×5	5.02	4.43	2.15	(-23.54,28.04)
4	1	1×1	1.77	0.83	0.59	(-1.68,36.32)
		5×5	0.26	0.64	0.70	(-0.43,38.49)
	2	1×1-5×5	2.41	3.23	0.59	(-1.36,37.52)
5	1	1×1	2.41	3.23	0.59	(-1.36,37.52)
		5×5	1.39	0.87	1.24	(2.22,49.55)
	2	1×1-5×5	7.72	8.28	1.24	(5.39,53.26)
			1.59	0.45	1.25	(2.32,49.91)

结合图 5 和表 2 可得:

1) 对于 15.1 m 处的 1 号被测目标,传统方法在将栅格尺寸选取为 5 m×5 m 进行数据处理时,栅格尺寸设置过大,导致错误聚类进而发生了目标合并的情况,得到了错误的检测结果,所提方法在近处的栅格尺寸较小的情况下有效地对不同目标进行了区分,实现了正确的聚类,得到了较为准确的检测结果;

2) 对于 21.6 m 处的 2 号被测目标,两种方法均得出了较为准确的检测结果;

3) 对于 36.6 m 处的 3 号和 37.5 m 处的 4 号被测目标,传统方法在将栅格尺寸设置为 1 m×1 m 进行数据处理时,栅格尺寸设置过小,导致聚类失败进而发生了目标分裂的情况,所提方法在较远处栅格尺寸较大的情况下实现了正确的聚类,得到了较为准确的检测结果;

4) 对于 49.6 m 处的被测目标 5,传统方法在将栅格尺寸设置为 5 m×5 m 进行数据处理时,栅格尺寸设置过大,导致未能对杂波点与障碍物点进行精确划分,检测结果不精确,所提方法有效地滤除了杂波点,得出了较为准确的检测结果。

### 3.3 实验总结

由实验结果可得,传统方法在选取较小栅格尺寸对目标进行处理的过程中容易发生聚类失败的问题,在选取较大栅格尺寸对目标进行处理的过程中容易出现错误聚类及检测结果不精确的问题。所提方法基于变尺寸栅格地图对目标进行处理,对不同距离处的目标均得出了准确可靠的检测结果,相较于传统方法,所提方法实现了更精确的障碍物检测。

## 4 结 论

提出了一种基于变尺寸栅格地图的激光雷达障碍物检测方法。在建立栅格尺寸线性增长的变尺寸栅格地图后,依据高度差判别法进行栅格划分,利用八邻域联通分量标记法进行栅格聚类,采用盒子模型进行障碍物信息提取,较好地解决了固定栅格地图尺寸选取困难的问题,提高了障碍物检测精度。通过进行海上实船实验验证所提方法的有效性,实验结果表明,所提方法在近距离处可有效解决目标合并的问题,在远距离处可有效解决目标分裂及检测精度降低的问题,相比于传统检测方法,可更加准确地实时地实现海上无人船周边障碍物检测。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang H B, Yang J, Sun J, et al. Research on data processing method of three-dimensional lidar for different ranges[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(8): 22-28. 江浩斌, 羊杰, 孙军, 等. 适应不同距离的三维激光雷达数据处理方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(8): 22-28.
- [2] Zu S, Hu P P, Pan Q. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810001. 祖爽, 胡攀攀, 潘奇. 基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0810001.
- [3] Wang H T, Lei X D, Zhao Z Z. 3D deep learning classification method for airborne LiDAR point clouds fusing spectral information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 122802. 王宏涛, 雷相达, 赵宗泽. 融合光谱信息的机载 LiDAR 点云三维深度学习分类方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 122802.
- [4] Liu C, Zhao J, Liu Z H, et al. Improved lidar obstacle detection method based on Euclidean clustering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201105. 刘畅, 赵津, 刘子豪, 等. 基于欧氏聚类的改进激光雷达障碍物检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201105.
- [5] Behley J, Steinhage V, Cremers A B. Efficient radius neighbor search in three-dimensional point clouds[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 3625-3630.
- [6] Jiang J F, Li Q Z, Huang M H, et al. Real-time detection of obstacles and passable areas based on three-dimensional lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 242801. 蒋剑飞, 李其仲, 黄妙华, 等. 基于三维激光雷达的障碍物及可通行区域实时检测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 242801.
- [7] 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. 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.

- [8] Wang S C, Tan D K, Xie Y H, et al. Obstacle detection and tracking for intelligent vehicle based on density characteristics of point cloud using 3D lidar [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(10): 1311-1317.  
汪世财, 谈东奎, 谢有浩, 等. 基于激光雷达点云密度特征的智能车障碍物检测与跟踪[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(10): 1311-1317.
- [9] Yue W T, Su J, Gu Z M, et al. Best grid size of the occupancy grid map and its accuracy[J]. *Robot*, 2020, 42(2): 199-206.  
岳伟韬, 苏婧, 谷志珉, 等. 占据栅格地图的最佳栅格大小与地图精度[J]. *机器人*, 2020, 42(2): 199-206.
- [10] Liu D Q, Zhang J, Jin J C. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110002.  
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): 0110002.
- [11] Börzs A, Nagy B, Benedek C. Fast 3-D urban object detection on streaming point clouds[M]//Agapito L, Bronstein M M, Rother C. *Computer vision-ECCV 2014 workshops. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2015, 8926: 628-639.
- [12] Goga S, Nedevschi S. An approach for segmenting 3D LiDAR data using multi-volume grid structures [C]//2017 13th IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), September 7-9, 2017, Cluj-Napoca, Romania. New York: IEEE Press, 2017: 309-315.
- [13] Dewan A, Caselitz T, Tipaldi G D, et al. Motion-based detection and tracking in 3D LiDAR scans[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 16-21, 2016, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2016: 4508-4513.