

基于三维激光雷达的无人船障碍物 自适应栅格表达方法

刘德庆*, 张杰, 金久才**

自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要 针对无人船(USV)海上近距离实时性避碰检测的需求,提出一种基于三维激光雷达的 USV 障碍物自适应栅格表达方法。根据 USV 周边环境障碍物的激光雷达点云分布,建立障碍物密集度和障碍物表达时间与栅格地图分辨率之间的函数关系,自适应确定适中的地图分辨率,构建栅格地图;对三维激光雷达点云数据进行降维处理,将三维激光雷达点云投影到栅格地图,减小数据量,提高障碍物检测效率。利用三维激光雷达开展方法验证性实验,获取了三种不同障碍物场景的激光雷达点云数据。处理结果显示:环境中障碍物数量越多,获得的期望栅格地图分辨率越高,障碍物表达更精细;反之,障碍物数量越少,获得的期望栅格地图分辨率越低,障碍物表达更快速,可实现障碍物自适应栅格表达。所建立的方法可为后续 USV 局部避碰路径规划研究提供支撑。

关键词 遥感; 三维激光雷达; 无人船; 障碍物表达; 栅格地图; 自适应分辨率

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0110002

Adaptive Grid Representation Method for Unmanned Surface Vehicle Obstacle Based on Three-Dimensional Lidar

Liu Deqing*, Zhang Jie, Jin Jiucui**

First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract To meet the demand for the real-time collision-avoidance detection of close obstacles by an unmanned surface vehicle (USV) on the sea surface, this study establishes an obstacle adaptive grid representation method for the USV based on three-dimensional (3D) lidar. According to the distribution of the lidar point cloud of environmental obstacles around the USV, a functional relationship among obstacle density, obstacle expression time, and grid map resolution is established for adaptively determining the moderate map resolution and constructing a grid map. The 3D lidar point cloud data are subjected to the process of dimensionality reduction and projected onto the grid map to reduce the amount of data and improve obstacle detection efficiency. Furthermore, a method validation experiment is conducted using 3D lidar; consequently, the lidar point cloud data of three different obstacle scenarios are obtained. The results show that the desired resolution of the obtained grid map and number of details regarding the obstacle increase with an increasing number of obstacles. Conversely, the desired resolution of the obtained grid map is lower and obstacle representation is faster with fewer obstacles in the environment, and the obstacle adaptive grid representation can be realized. The follow-up research of USV local collision avoidance path-planning can be supported by the established obstacle adaptive grid representation method.

Key words remote sensing; three-dimensional lidar; unmanned surface vehicle; obstacle representation; grid map; adaptive resolution

OCIS codes 280.3640; 120.1880; 120.0280

1 引 言

良好的环境感知能力是无人船(USV)安全自

主地执行任务的重要保障。目前,无人船障碍物检测手段有航海雷达、视觉相机和三维激光雷达等^[1-2]。航海雷达主要用于远距离海上目标检测与

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-09-03; 录用日期: 2019-09-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405203)、国家自然科学基金(61835001)

* E-mail: liudeqing@fio.org.cn; ** E-mail: jinjiucui@fio.org.cn

跟踪,在近距离范围内存在一定的盲区,且对小目标的检测能力不足^[3-4];视觉相机的优点是可以获取目标轮廓特征,但极易受环境光照条件的影响,且测距能力不足^[5-7];三维激光雷达的优势在于具有高的测距精度和距离分辨率,适用于近距离目标检测,能够较好地弥补航海雷达和视觉相机障碍物检测技术的不足。

近年来,三维激光雷达应用于无人船障碍物检测的研究越来越深入。美国空间海军作战系统中心的研究人员首次验证了三维激光雷达对不同距离海上典型目标的检测性能^[8];韩国 Redone 公司 Lee 等^[9]提出一种基于径向最近邻的三维激光雷达障碍物检测方法;美国海军学院的 Esposito 等^[10]针对无人船自动入坞的需求,提出一种基于三维激光雷达船坞检测方法;上海大学和武汉理工大学也开展了无人船激光雷达障碍物检测的相关研究^[11-12]。然而,三维激光雷达是以固定旋转频率不间断地获取周边环境的障碍信息,数据量较大^[13],特别是在无人船主控计算机性能不高的情况下,激光雷达数据的处理效率是制约无人船实时性避碰检测和避碰路径规划的关键因素。将障碍物的激光雷达点云数据降维,然后利用栅格地图表达障碍物信息,是提高三维激光雷达障碍物检测效率的有效方法之一^[14],其中,栅格地图分辨率(栅格大小)是决定障碍物检测精度和处理速度的关键参数。地图分辨率高,检测精度高,但处理速度慢;地图分辨率低,处理速度快,但检测精度低。然而,在目前的相关研究中均采用固定栅格地图分辨率的方式^[15-16]。

基于此,本文针对无人船海上近距离实时性避碰检测的需求,拟开展基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法研究,以期根据环境中障碍物的分布,自适应确定栅格地图的分辨率,兼顾障碍物检测精度和检测效率,为后续无人船局部路径规划研究提供技术方法支撑。

2 方法与实验

2.1 障碍物自适应栅格表达方法

图 1 是建立的基于三维激光雷达的无人船障碍物栅格表达方法流程。该方法优点是可根据无人船周边环境障碍物的激光雷达点云分布,自适应确定适中的栅格地图分辨率,以兼顾障碍物检测精度和检测效率。

激光雷达用于无人船障碍物检测,需先进行参数标定,之后对激光雷达点云数据进行预处理,去除

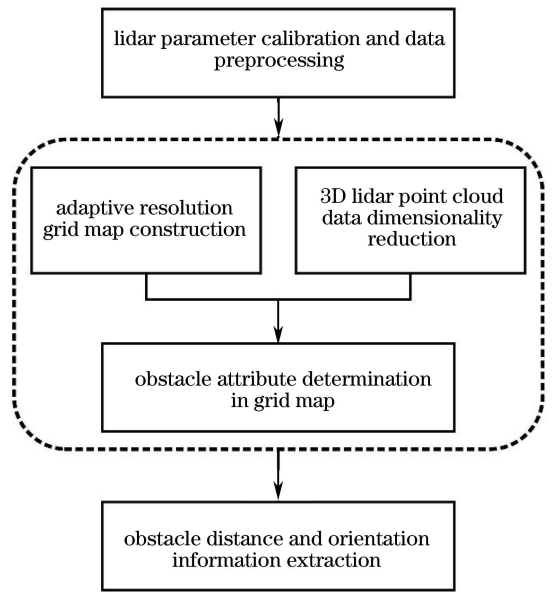


图 1 基于三维激光雷达的 USV 障碍物栅格表达方法流程
Fig. 1 Flow chart of USV obstacle grid representation method based on three-dimensional lidar

无效的雷达点云;在此基础上,利用预处理后的激光雷达点云数据,计算无人船周边环境障碍物的分布情况,然后根据障碍物的多少,自适应确定适中的地图分辨率,构建栅格地图;对三维激光雷达点云数据进行降维处理,将三维激光雷达点云投影到栅格地图中,减小数据量,提高障碍物检测效率;最后,在栅格地图上提取出障碍物的距离、方位等信息,实现障碍物栅格表达。将三维激光雷达点云投影到栅格地图的转换关系为

$$\begin{cases} R_{ow} = (y + T_y) / G + 1 \\ C_{ol} = (x + T_x) / G + 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: R_{ow} 和 C_{ol} 分别为栅格地图的行数和列数; (x, y) 为激光雷达点云平面坐标; T_x 和 T_y 分别为在 x 和 y 坐标上增加的平移量; G 为栅格大小。

本文方法的关键是构建自适应分辨率的栅格地图,具体过程如下。1)以无人船位置为中心构建固定大小的二维栅格地图,对于同一个障碍物环境场景,采用不同分辨率的栅格地图表达,障碍物区域在栅格地图中所占比重不同,因此,引入栅格地图的障碍物密集度 $I = N_o / N_{tot}$ 和障碍物表达时间 t 作为栅格地图分辨率的评价指标, N_o 表示栅格地图中障碍物所占栅格数, N_{tot} 表示栅格地图中总栅格数。障碍物密集度 I 反映障碍物检测精度,障碍物表达时间 t 反映障碍物检测效率,其中,障碍物表达时间进行了多次平均和归一化处理,以减小计算机性能差异对其测量的影响。2)利用激光雷达检测障碍物

的点云数据,分别建立障碍物密集度 I 和障碍物表达时间 t 与栅格地图分辨率 R 之间的函数关系,即

$$\begin{cases} R = f(I), & I \in [0,1] \\ R = g(t), & t \in [0,1] \end{cases}, \quad (2)$$

并将(2)式两函数关系的交点作为确定期望栅格地图分辨率 R_{opt} 的判定依据,即

$$R_{opt} = f(I_{opt}) = g(t_{opt}), \quad (3)$$

式中: I_{opt} 和 t_{opt} 分别为期望栅格地图分辨率对应的障碍物密集度和障碍物表达时间。在栅格地图分辨率尽可能高的前提下,使得障碍物表达时间尽可能短。

2.2 海上目标三维激光雷达数据获取

为验证所建立的三维激光雷达障碍物表达方法,选定青岛某码头附近海域开展激光雷达障碍物检测实验。三维激光雷达选用 Velodyne 公司的 VLP-16 型,其激光束为 16 线(波长 903 nm),海上

最大探测距离约 120 m(实测值),测距精度达到 ± 3 cm,垂直视场角为 $30^\circ(-15^\circ \sim +15^\circ)$,垂直角分辨率为 2° ,水平视场角为 360° ,水平角分辨率为 $0.1^\circ \sim 0.4^\circ$,可按一定的旋转频率($5 \sim 20$ Hz 范围内)不间断地获取周边环境的障碍物点云信息。

实验时,分别将三维激光雷达架设在码头岸边和船艇上,用于获取海上障碍物目标的激光雷达点云数据,以模拟无人船海上激光雷达障碍物检测的场景。图 2 为三维激光雷达检测三种不同障碍物情况下(障碍物数量不同)的实验场景图。图 2(a)为将激光雷达架设在码头岸边,用于检测多障碍物目标的场景,定义为障碍物场景 I;图 2(b)为将激光雷达架设在移动的船艇上,用于检测海上大船等大型目标的场景,定义为障碍物场景 II;图 2(c)为激光雷达架设在移动的船艇上,用于检测海上浮标、小船等小型目标的场景,定义为障碍物场景 III。



图 2 三维激光雷达海上障碍物检测的实验场景图。(a)场景 I;(b)场景 II;(c)场景 III
Fig. 2 Experimental scenes of three-dimensional lidar obstacle detection on sea surface.

(a) Scene I; (b) scene II; (c) scene III

图 3 为三种不同障碍物场景下获取的原始三维激光雷达点云数据,其中,图 3(a)为障碍物场景 I 的

激光雷达点云,图 3(b)为障碍物场景 II 的激光雷达点云,图 3(c)为障碍物场景 III 的激光雷达点云。

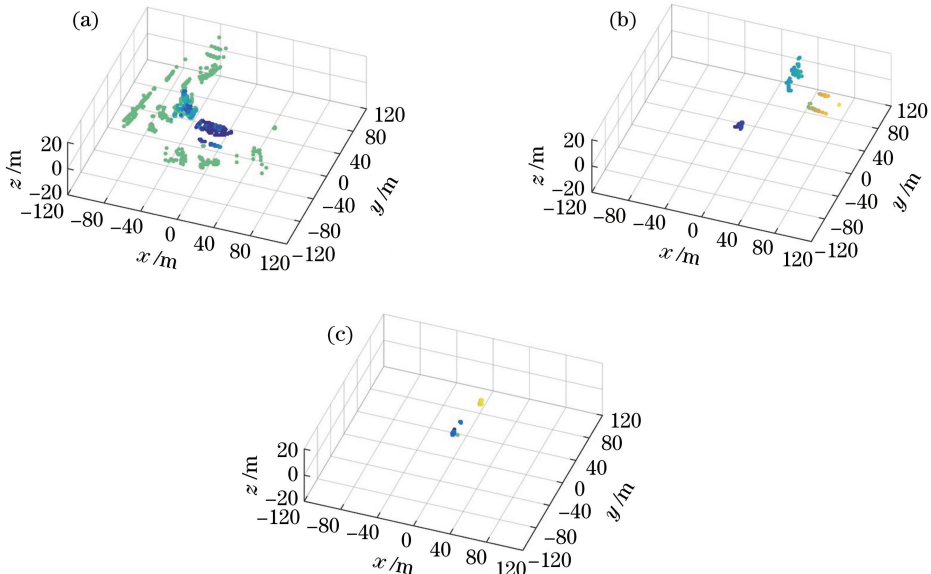


图 3 三种障碍物场景的激光雷达点云。(a)场景 I;(b)场景 II;(c)场景 III

Fig. 3 Lidar point clouds of three obstacle scenes. (a) Scene I; (b) scene II; (c) scene III

从图中可知, VLP-16 型三维激光雷达海上最大探测距离约 120 m, 激光雷达点云可提供障碍物目标的距离、方位以及激光反射强度(图中用颜色表示)等信息, 激光雷达点云的空间分布能够比较清晰地反映船只、浮标等目标的轮廓特征。图 3(a)所示障碍物场景 I 的激光雷达点云, 由于激光雷达布设在码头岸边, 因此激光雷达 y 轴正半轴的点云反映了海上船只等障碍物信息, 激光雷达 y 轴负半轴的点云反映了陆上障碍物信息; 图 3(b)和图 3(c)所示障碍物场景 II 和障碍物场景 III 的激光雷达点云, 包含了用于架设激光雷达的船艇的点云信息。

3 数据处理与结果分析

3.1 激光雷达点云数据预处理

获取障碍物目标的三维激光雷达点云数据

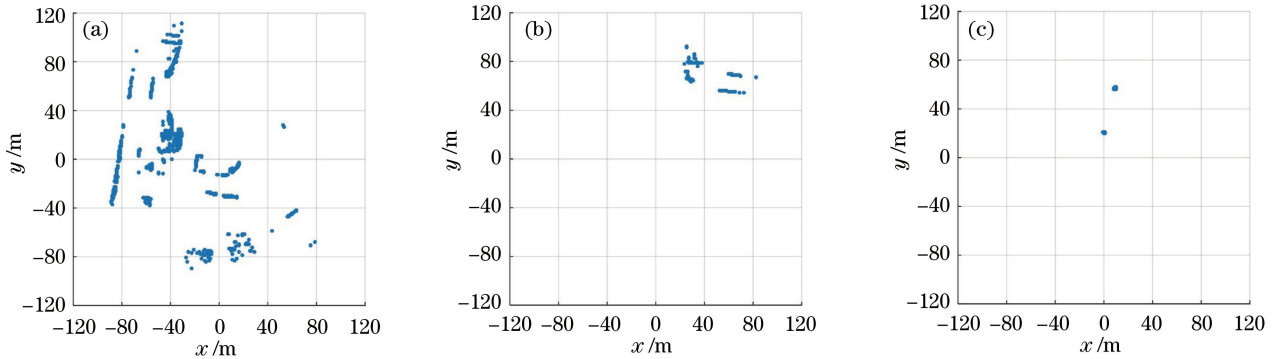


图 4 三种障碍物场景的激光雷达点云数据预处理结果。(a)场景 I; (b)场景 II; (c)场景 III

Fig. 4 Preprocessing results of lidar point clouds of three obstacle scenes. (a) Scene I; (b) scene II; (c) scene III

3.2 分辨率自适应的障碍物栅格地图表达

考虑到实验中所用 Velodyne VLP-16 型激光雷达的海上有效探测距离为 120 m, 设置栅格地图的大小为 $240\text{ m} \times 240\text{ m}$ 。以无人船坐标为中心构建不同分辨率的二维栅格地图, 并选择能够整除 120 的所有正整数分别作为栅格地图的分辨率(栅格大小); 利用激光雷达检测环境中障碍物的点云数据, 计算不同分辨率栅格地图下的障碍物密集度, 并测量对应的障碍物表达时间; 建立障碍物密集度和障碍物表达时间与栅格地图分辨率的关系曲线。图 5(a)、(c)、(e)分别为障碍物场景 I、II、III 的栅格地图分辨率优化结果。

从图 5(a)、(c)、(e)可知, 同一障碍物场景的栅格地图分辨率越高(即, 栅格越小), 障碍物密集度越小, 障碍物表达时间越长; 对于不同障碍物场景, 环境中障碍物数量越多, 障碍物密集度随栅格地图分

后, 需要先去除无效的激光雷达点云, 包括无人船自身反射的点云、激光雷达有效探测范围外的点云以及海浪等返回的干扰点云等。对于近距离的无人船自身反射的点云和激光雷达有效探测范围外的点云, 可通过设置激光雷达的有效探测距离 ($10\text{ m} < d < 120\text{ m}$) 去除; 而对于海浪等因素返回的干扰点云, 其反射强度比障碍物返回的点云强度弱, 可通过设置激光回波强度阈值进行去除。图 4 是对图 3 三种不同障碍物场景的激光雷达点云数据预处理及二维投影的结果。图 4(a)所示的障碍物场景 I 主要去除了激光雷达附近呈圆环状分布的地面点云, 图 4(b)和 4(c)所示的障碍物场景 II 和障碍物场景 III 主要去除了用于架设激光雷达的船艇返回的点云。

分辨率的变化率越大, 而障碍物表达时间随栅格地图分辨率的变化率基本相当; 利用障碍物场景 I、II、III 中的一帧激光雷达点云数据, 优化得到三种场景下的期望栅格地图分辨率分别为 4 m、6 m 和 12 m。图 5(b)、(d)、(f)分别为利用期望栅格地图分辨率构建的三种场景下的障碍物栅格地图。从图中可知, 海上环境中障碍物数量越多, 障碍物需表达更精细, 获得的期望栅格地图分辨率越高; 反之, 障碍物数量越少, 获得的期望栅格地图分辨率越低, 可实现障碍物自适应栅格表达。

表 1 为障碍物自适应栅格表达方法与传统固定栅格(栅格大小分别为 4 m 和 12 m)表达方法的对比。结果显示, 本文方法能够对障碍物数量多的场景(障碍物场景 I)实现更精细的表达, 对障碍物数量少的场景(障碍物场景 III)实现更快速的表达, 进而表明本文方法的有效性。

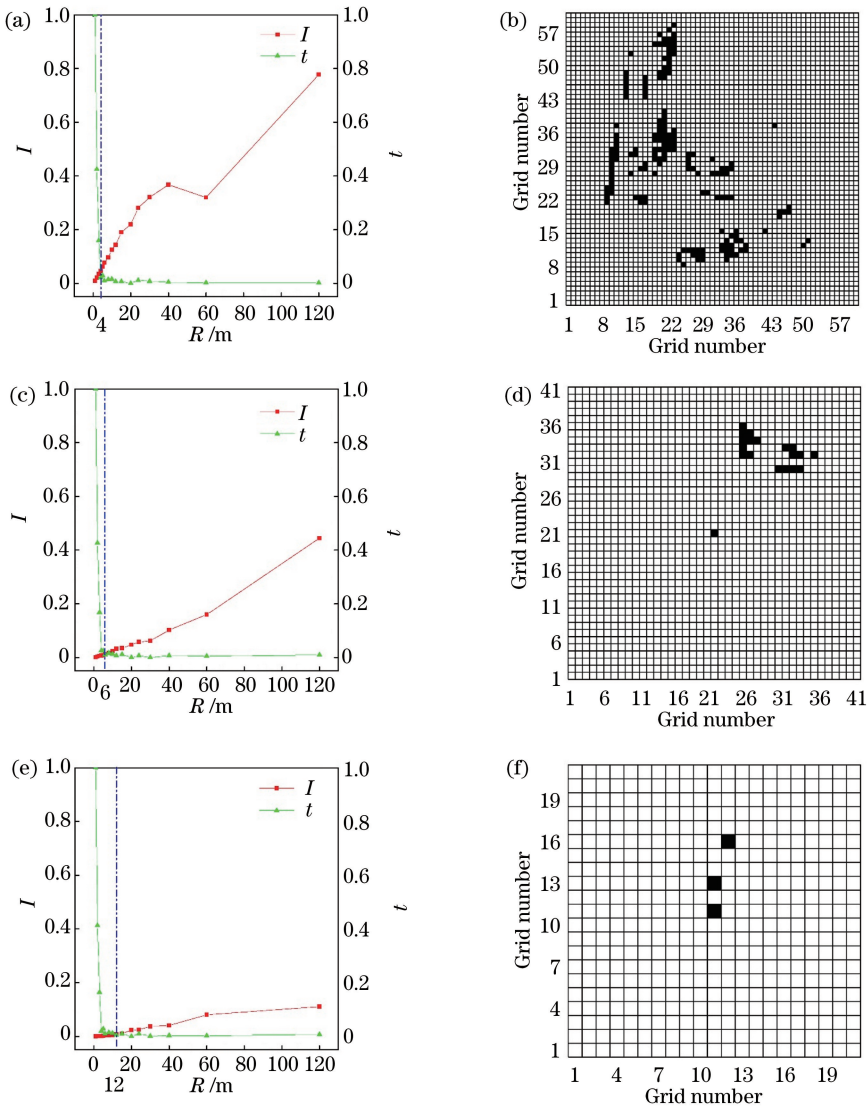


图 5 三种障碍物场景的自适应栅格表达结果。(a)(c)(e) I、II、III 场景的栅格地图分辨率优化结果；(b)(d)(f)对应的栅格地图障碍物表达结果

Fig. 5 Adaptive grid representation results of three obstacle scenes. (a)(c)(e) Optimization results of grid map resolutions of scenes I, II, and III; (b)(d)(f) corresponding results of grid map obstacle representation

表 1 障碍物自适应栅格表达方法(方法 1)与固定栅格表达方法(方法 2)的对比
Table 1 Comparison between obstacle adaptive grid representation method (method 1) and fixed grid representation method (method 2)

Parameter	Scene I			Scene II			Scene III		
	Method 1		Method 2	Method 1		Method 2	Method 1		Method 2
	$R=4\text{ m}$	$R=12\text{ m}$	$R=4\text{ m}$	$R=6\text{ m}$	$R=12\text{ m}$	$R=12\text{ m}$	$R=4\text{ m}$	$R=12\text{ m}$	
I	0.0454	0.0454	0.1429	0.0113	0.0070	0.0579	0.0248	0.0011	0.0248
t	0.0213	0.0213	0.0065	0.0100	0.0255	0.0069	0.0091	0.0193	0.0091

4 结 论

针对无人船海上近距离实时性避碰检测的需求,提出一种基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法。根据无人船周边环境障碍

物的激光雷达点云分布,建立障碍物密集度和障碍物表达时间与栅格地图分辨率之间的函数关系,自适应确定适中的地图分辨率,构建栅格地图;对三维激光雷达点云数据进行降维处理,将三维激光雷达点云投影到栅格地图,减小数据量,提

高障碍物检测效率。进一步对不同障碍物场景的激光雷达点云数据进行处理,结果显示,环境中障碍物数量越多,获得的期望栅格地图分辨率越高,障碍物表达更精细,反之,环境中障碍物数量越少,获得的期望栅格地图分辨率越低,障碍物表达更快速,可实现障碍物的自适应栅格表达。并与传统固定栅格表达方法对比,进一步验证了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Liu Z X, Zhang Y M, Yu X, et al. Unmanned surface vehicles: an overview of developments and challenges[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 41: 71-93.
- [2] Wang B, Su Y M, Wan L, et al. Sea sky line detection method of unmanned surface vehicle based on gradient saliency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0511002.
王博, 苏玉民, 万磊, 等. 基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0511002.
- [3] Almeida C, Franco T, Ferreira H, et al. Radar based collision detection developments on USV ROAZ II[C] // *OCEANS 2009-EUROPE*, May 11-14, 2009, Bremen, Germany. New York: IEEE, 2009: 10915094.
- [4] Zhuang J Y, Zhang L, Zhao S Q, et al. Radar-based collision avoidance for unmanned surface vehicles[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(6): 867-883.
- [5] Ma Z L, Wen J, Liang X M. Video image clarity algorithm research of USV visual system under the sea fog[M] // Tan Y, Shi Y, Mo H. *Advances in swarm intelligence. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 7929: 436-444.
- [6] Mou X Z, Wang H. Image-based maritime obstacle detection using global sparsity potentials[J]. *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, 2016, 14(2): 129-135.
- [7] Polvara R, Sharma S, Wan J, et al. Obstacle avoidance approaches for autonomous navigation of unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Navigation*, 2018, 71(1): 241-256.
- [8] Halterman R, Bruch M. Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7692: 76920D.
- [9] Lee S J, Moon Y S, Ko N Y, et al. A method for object detection using point cloud measurement in the sea environment [C] // *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*, February 21-24, 2017, Busan, Korea. New York: IEEE, 2017: 16790560.
- [10] Esposito J M, Graves M. An algorithm to identify docking locations for autonomous surface vessels from 3-D LiDAR scans[C] // *2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, April 14-15, 2014, Woburn, MA, USA. New York: IEEE, 2014: 14501878.
- [11] Wu P, Xie S R, Liu H L, et al. Autonomous obstacle avoidance of an unmanned surface vehicle based on cooperative manoeuvring [J]. *Industrial Robot: an International Journal*, 2017, 44(1): 64-74.
- [12] Wang S W, Xie L, Ma F, et al. Research of obstacle recognition method for USV based on laser radar[C] // *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, August 8-10, 2017, Banff, AB, Canada. New York: IEEE, 2017: 343-348.
- [13] Yang S J, Zhang K S, Shao Y S. DEM interpolation algorithm of data from spiral scanning lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1110006.
杨书娟, 张珂殊, 邵永社. 螺旋式扫描激光雷达数据的DEM内插算法[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1110006.
- [14] Börcs A, Nagy B, Benedek C. Fast 3-D urban object detection on streaming point clouds[M] // Agapito L, Bronstein M, Rother C. *Computer vision-ECCV 2014 Workshops. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2015, 8926: 628-639.
- [15] 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.
- [16] 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.