

基于自调节 VFH+的水面无人艇雷达避障控制研究

娄虎,赵泽钰,阮文涛,吴政峰,袁明新

(江苏科技大学 机电与动力工程学院,江苏 张家港 215600)

摘要:针对水面无人船在未知水域自主作业时的避障问题,提出一种新型自调节矢量场直方图避障控制算法。通过激光雷达探测仪实时获取无人船周围水域信息,通过划分扇区单元建立障碍物向量场直方图;根据环境信息进行阈值自调节来得到适合当前情况的阈值,进而筛选出无人船可行候选扇区;求取候选扇区代价值,并将代价值最小的扇区方向作为无人船航行方向。数值分析和水上实验表明:通过增加阈值自调节环节,改善了传统矢量场直方图算法存在的阈值敏感问题,使得该方法避障成功率达到 96%,满足了无人船水上自主避障控制要求。

关键词:水面无人船;激光雷达;避障;矢量直方图;阈值自调节

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0179-05

Research on Obstacle Avoidance Control of Lidar for USV Based on Self-adjusting VFH+

LOU Hu, ZHAO Zeyu, RUAN Wentao, WU Zhengfeng, YUAN Mingxin

(College of Mechanical Electrical and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: In order to solve the obstacle avoidance problem of a USV autonomously operating in unknown waters, a new self-adjusting VFH+ for obstacle avoidance control was proposed. The lidar detector was used by USV to obtain information of surrounding waters. The histogram of obstacle vector field was established by dividing the sector units and the threshold value suitable for the current situation was obtained by self-adjusting the threshold. The feasible candidate sectors of a USV were screened out. The cost of candidate sectors was obtained, and the sector with the least cost was selected as the direction of USV. Numerical analysis and water experiments show that the threshold sensitivity problem of the traditional VFH+ has been improved by adding the threshold self-adjustment, and the success rate of the proposed algorithm can reach 96%, which satisfies the requirements of autonomous obstacle avoidance control for USV.

Keywords: USV; lidar; obstacle avoidance; VFH+ algorithm; threshold self adjustment

0 引言

因机动性强、成本低等因素,近年来水面无人船在近海巡逻、水质监控和水产养殖等领域得到广泛使用^[1]。为了保障无人船实现高效、安全作业,自主避障控制技术是关键^[2]。目前无人船避障主要有两种方式^[3]:一种是已知作业水域里的全局避障,但实时性低,不能灵活规避未知障碍物;另一种是基于船载传感器,比如摄像头、超声波和激光雷达等,进行在线避障,具有实时性好且能实时处理未知障碍物的优点,是当前主要避障方式。相比摄像头数据处理量大、超声波探测精度低,激光雷达是目前主要避障传感器,国内外学者围绕其开展了一系列避障算法研究。

BORENSTEIN J 等^[4-5]通过对虚拟势场法^[6]进行改进,在考虑机器人运动特性和机器人尺寸情形下,提出了用于避障的向量场直方图算法(vector field histogram, VFH),但存在阈值敏感、避障路径曲折等不足。贾卫平等^[7]提出了基于激光雷达进行 SLAM 建图,并使用 A*算

法进行全局规划和 DWA 算法进行局部规划,但该方法只适合于室内区域规划与避障,难以用于大范围复杂的室外环境避障。刘杰等^[8]基于激光雷达采集数据,以自适应阈值为条件对传统矢量场直方图进行改进,虽改善了阈值不足时机器人航向剧变的问题,但其仅介绍了最大阈值设置而未说明阈值具体调节过程。

为了解决文中水质检测三体船在未知水域的避障问题,以激光雷达为探测平台,针对雷达点云数据进行阈值自调节器设计,从而提出了新型自适应 VFH+避障算法,仿真和水上实际测试都验证了算法的有效性。

1 水面无人船的系统设计

1.1 无人船系统结构

图 1 为文中所述无人船系统。无人船控制器采用 Linux 系统工控机,负责接收和处理各传感器数据,并下达控制指令;雷达负责周围环境信息的采集,并为无人船避障提供环境数据;定位采用 GPS 模块,用于实时获取无人

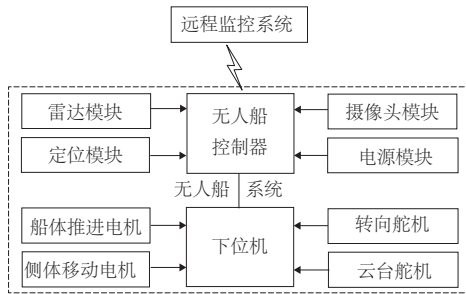
基金项目:张家港市香樟树众创空间培育孵化项目(XZS201703)

第一作者简介:娄虎(1998—),男,江苏徐州人,学士,研究方向为智能装备设计。

船位置坐标;无人船下位机用于接收工控机指令,控制各种电机与舵机运动;无线通信模块,用于向监控中心实时反馈无人船状态及水质检测数据,同时接收远程监控系统指令。远程监控系统,主要作为操作人员的指令下达平台,并负责实时存储无人船状态信息和采集到的水质数据,供监控和分析。



(a) 水质检测三体无人船



(b) 无人船控制系统组成

图1 无人船系统结构

1.2 无人船避障控制系统搭建

图2给出了无人船避障控制系统电路连接图。无人船工控机采用树莓派,下位机采用STM32单片机。激光雷达将扫描到的障碍物信息通过USB1端口发送给树莓派工控机,GPS实时获取的无人船位置坐标通过USB2端口发送给树莓派工控机;树莓派工控机在对无人船当前坐标和周围障碍物信息处理后,通过串口将控制信号发送给STM32F103ZET6型单片机,并实现无人船上左、右转向舵机和左、右推进电机等的控制,进而实现无人船的航行避障控制。

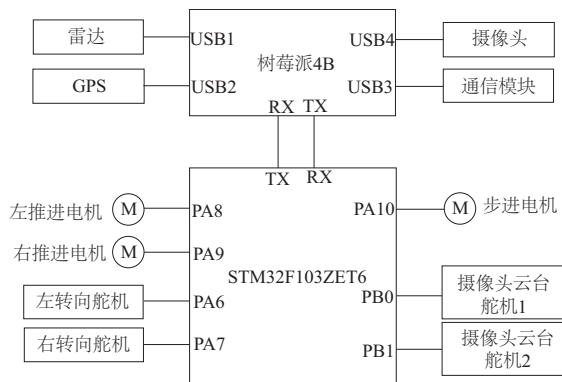


图2 避障控制系统电路连接图

1.3 激光雷达测距原理及数据获取

文中选用的思岚A3型激光雷达,采用如图3所示的斜射式激光三角法测距^[9]。雷达发射器以入射角度 γ 射出一束激光,照射到 O 处障碍物,并在障碍物表面发生反

射和散射。被物体反射的激光经过 B 处透镜汇聚成像,然后被透镜后方电荷耦合器件(线性CCD)采集。

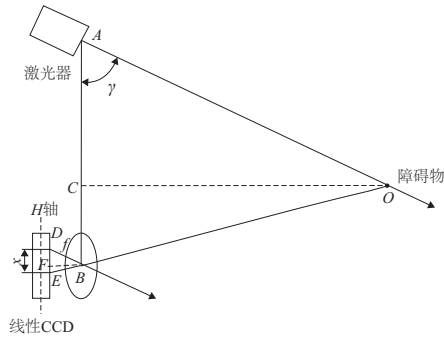


图3 斜射式激光三角法测距原理图

图3中: γ 为入射光 AO 与基线 AB 的夹角;透镜焦距为 f ; D 为被测物体的反射光线在CCD上成像的极限位置; x 为成像光斑 E 与极限位置 D 的距离。由三角形相似几何原理可知:

$$\begin{cases} \frac{AB}{DE} = \frac{OC}{BF} \\ AO = \frac{OC}{\sin\gamma} \end{cases} \Rightarrow AO = \frac{AB \cdot f}{x \cdot \sin\gamma} \quad (1)$$

在感光耦合器的中心作一条与基线 AB 平行的 H 轴,通过算法可以得到成像点的像素坐标 (P_x, P_y) ,则位移 x 为

$$x = C_{\text{cellSize}} \cdot P_x + D_{\text{eviationValue}} \quad (2)$$

式中: C_{cellSize} 为光敏单元上单个像素的尺寸值, $D_{\text{eviationValue}}$ 为通过像素点计算的投影距离与实际投影距离 x 的偏差量。

2 水面无人船避障控制算法设计

传统VFH+局部避障算法采用四级数据简化来计算机器人运动方向。避障时存在阈值敏感、避障路径曲折等不足。为此,文中通过增加阈值自调节环节,提出了新型自适应VFH+算法。该算法将根据无人船所航行的水域环境,调节最佳障碍物强度阈值,从而帮助无人船规避局部死区,且路径平滑地到达目标点。

2.1 VFH+算法的构建

VFH+算法是建立在以无人船为中心的极坐标上。将环境栅格化,通过计算每个栅格中障碍物强度得到机器人前进方向上的障碍物分布情况,然后利用阈值进行数据筛选得到候选方向,并对所有候选方向进行代价计算,从而得到最优避障路径。步骤如下:

步骤1 根据激光雷达扫描得到的环境数据,即障碍物距离与角度,建立以雷达为中心的极坐标环境。为了对无人船进行避障规划,需将此极坐标信息转化为全局环境下的直角坐标信息,如图4所示。

图4中 $A(x_1, y_1)$ 为直角坐标系下雷达的坐标; $B(x_2, y_2)$ 为直角坐标系下障碍物的坐标; d 为激光雷达探测到的障碍物距离; α 为无人船当前航向角; β 为雷达探测到的障碍物角度; θ 为极坐标系到直角坐标系的变换角。则

$$\theta = \alpha + \beta \quad (3)$$

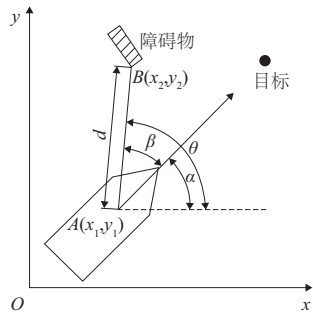


图4 水面无人艇坐标转换关系图

将激光雷达测到的障碍物信息变换到直角坐标系中,得到B点坐标:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + d \cdot \cos\theta \\ y_2 = y_1 + d \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

步骤2 以船载雷达几何中心为圆心,建立动态窗口 C_a ,其半径即为雷达探测距离 d_{max} 。按照激光雷达分辨率 f ,划分为 $n = 360^\circ / f$ 个扇区,并规定以雷达为中心,以与全局直角坐标系 x 轴方向平行的线为起止线,逆针对所有扇区从1到 n 进行编号。

步骤3 根据VFH+算法的向量化公式,计算每个区域内的障碍物强度值 m_n ,搭建向量场直方图。障碍物强度值 m_n 与障碍物距离 d_n 的关系为

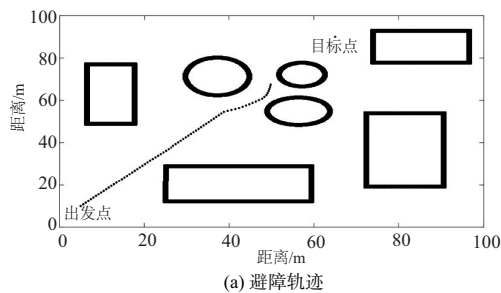
$$m_n = c_v^2(a - bd_n^2) \quad (5)$$

式中: c_v 、 a 、 b 均为常数, a 、 b 满足 $a = bd_{max}^2$ 。

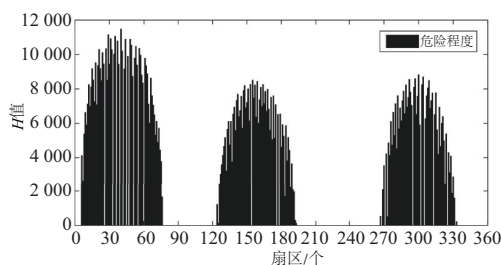
步骤4 通过实验设置合适的障碍物强度阈值 M ,对向量场直方图进行二值化处理得到二值化直方图,规则如式(6)所示。

$$\begin{aligned} H_n &= 1 & \text{if } m_n \geq M \\ H_n &= 0 & \text{if } m_n < M \end{aligned} \quad (6)$$

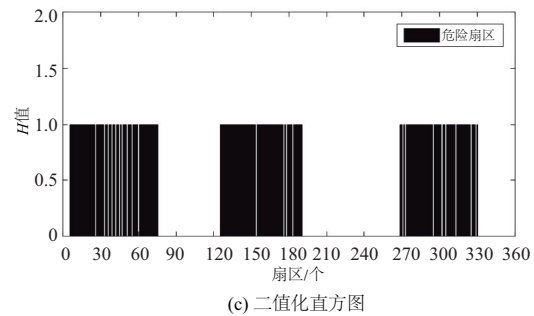
文中思岚A3激光雷达的探测半径 d_{max} 为8m,且分辨率为 1° ,因此圆周水域划分为 $n = 360$ 个扇区,编号从1到360。定义向量化公式中各常量参数: $c_v = 10$, $b = 2.5$,阈值强度设置为 $M = 6000$ 时,得到如图5所示的避障结果示意图、向量场直方图和二值化直方图。



(a) 避障轨迹



(b) 向量场直方图



(c) 二值化直方图

图5 VFH+算法直方图

步骤5 在二值化直方图中选取大于一定扇区宽度的扇区,取其中间方向作为无人船运动候选方向 k_i ,使用代价函数对所有候选方向 k_i 求取代价值,选择代价值最小的候选方向 k_i 作为运动方向 k_b 。 k_b 的初值为0,代价函数如式(7)所示。

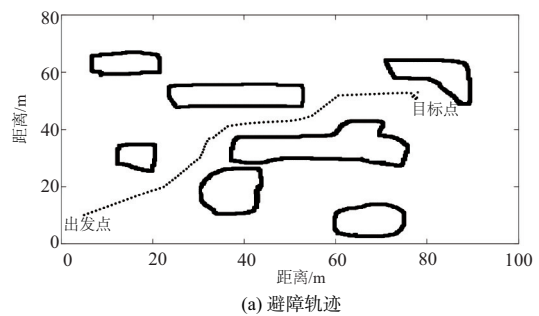
$$g(c) = \mu_1 \Delta(k_i, k_i) + \mu_2 \Delta(k_i, k_r) + \mu_3 \Delta(k_i, k_{i'}) \quad (7)$$

式中: μ_1 、 μ_2 、 μ_3 均为常数,且 $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$; $\Delta(k_i, k_i)$ 为候选方向与目标方向间的夹角; $\Delta(k_i, k_r)$ 为候选方向与无人船当前航行方向的夹角; $\Delta(k_i, k_{i'})$ 为候选方向与无人船上一次航向的夹角; k_i 为无人船当前航向; k_b 为无人船上一次航向。

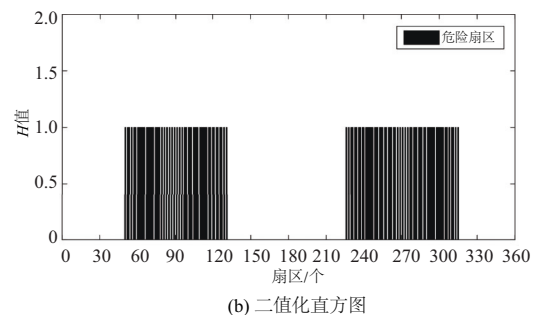
2.2 VFH+算法的缺陷

由上述可知,VFH+算法是通过设置合适的障碍物强度阈值 M 来筛选候选方向,再对候选方向进行代价计算从而确定航向,所以选择合适的障碍物强度阈值 M 就尤为重要。

如图6所示,当障碍物强度阈值设置较小时,无人船能够及时发现航向周围的障碍物和可通行扇区,但无人船过于“敏感”,其航行轨迹曲折,且难以到达处于半封闭处的目标点。



(a) 避障轨迹



(b) 二值化直方图

图6 $M = 3000$ 时避障结果示意图

如图7所示,当障碍物强度阈值设置过大时,无人船的可通行扇区变多,但无法及时发现下一秒前方的障碍物,不能够有效进行躲避。

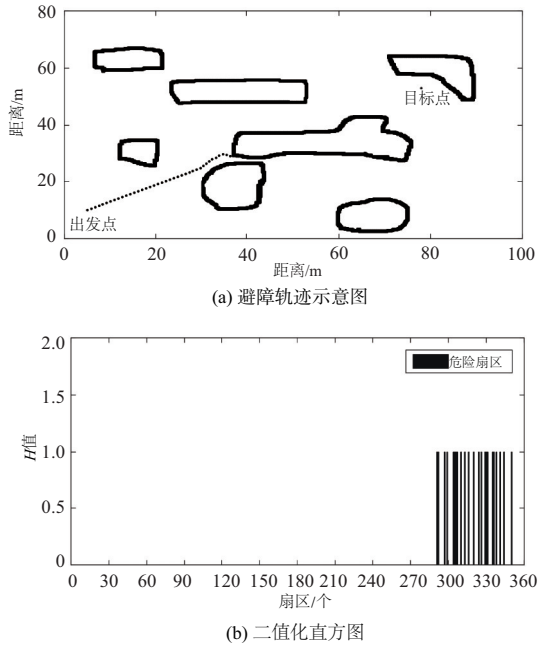


图7 $M=9\ 000$ 时二值化直方图

因此,选择合适的障碍物强度阈值是无人船能够有效避障的关键。

2.3 阈值自调节器

对于固定障碍物强度阈值造成的缺陷,文中提出了一种阈值自调节方法。根据无人船所处环境对障碍物阈值进行实时更新,从而改善无人船避障灵活性。

a) 确定阈值范围

1) 根据无人船的运动特性确定阈值最大值

为了保障无人船航行的安全性,有最小安全距离 d_{\min} 为

$$d_{\min} = \lambda_1 \cdot (S + R_u) \quad (\lambda_1 > 1) \quad (8)$$

式中: λ_1 为安全距离放大系数; R_u 为雷达中心到无人船边缘的距离; S 为减速距离。

$$S = -\frac{v_{\max}^2}{2a} \quad (9)$$

式中: v_{\max} 为无人船的最大航行速度; S 为无人船通过减速加速度 a 减速到静止状态所需距离。

将求得的无人船最小安全距离 d_{\min} 代入式(5)中,可得到障碍物强度阈值最大值 M_{\max} :

$$M_{\max} = c_v^2 (a - b d_{\min}^2) \quad (10)$$

2) 由雷达扫描特性确定阈值最小值

为了保障雷达的可靠性,取雷达探测半径 d_{\max} 为

$$d_{\max} = \lambda_2 \cdot L_{\max} \quad (0 < \lambda_2 < 1) \quad (11)$$

式中: λ_2 为探测距离缩小系数; L_{\max} 为雷达最大探测半径。

将雷达探测半径 d_{\max} 代入式(1)中,可求得障碍物强度阈值的最小值 M_{\min} :

$$M_{\min} = c_v^2 (a - b d_{\max}^2) \quad (12)$$

3) 障碍物强度阈值范围

通过步骤1)和步骤2),可以得到障碍物最佳强度阈值 M_{th} 的范围为

$$M_{\min} \leq M_{th} \leq M_{\max} \quad (13)$$

b) 求取最佳障碍物强度阈值

阈值自调节计算规则如下:

$$M_{thi} = \varphi_i \cdot M_{\max} + \eta_i \cdot M_{\min} \quad (14)$$

式中: $\varphi_i \cdot M_{\max}$ 为目标优先权重项; φ_i 为目标优先权重系数; $\eta_i \cdot M_{\min}$ 为安全优先权重项; η_i 为安全优先权重系数; M_{thi} 为此时所求得的最佳障碍物阈值。

目标优先权重系数 φ_i 、安全优先权重系数 η_i 的设置规则如下。

如图8所示,按照无人船、目标点和障碍物间的位置关系量,即:无人船当前位置与目标点之间距离 d_{ti} 、无人船当前位置与所测障碍物之间的距离 d_{oi} 、无人船与目标点连线和无人船与障碍物间连线的夹角 $\Delta\beta_i$ 的关系可以划分为图中所标出的4个区域:

1) 当障碍物处于无人船和目标点以外区域(即①号区域)和障碍物处于无人船后方安全区域(即④号区域)时,无人船遵循目标优先原则:

$$\varphi_i = 1, \eta_i = 0 \quad (15)$$

2) 当障碍物处于无人船和目标点间连线上(即②号区域),无人船遵循安全优先原则:

$$\varphi_i = 0, \eta_i = 1 \quad (16)$$

3) 当障碍物处于影响区域(即③号区域):

$$\varphi_i = \frac{\Delta\beta_i}{135}, \eta_i = 1 - \frac{\Delta\beta_i}{135} \quad (17)$$

式中: $\Delta\beta_i$ 为“无人船-目标点”连线与“无人船-障碍物”连线的夹角绝对值。

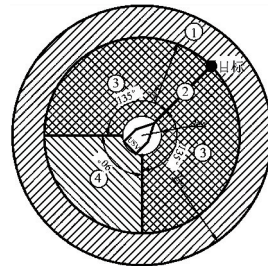


图8 阈值自调节区域划分图

3 实验结果与分析

3.1 仿真实验结果与分析

为了验证自调节增加后的无人船避障性能改善效果,在 Matlab 上搭建了无人船环境模型,将无人船分别置于开阔水域、狭长水道、连续 S 弯和 U 型死区 4 种典型水域环境进行避障测试,结果如图9所示。

仿真实验表明,采用基于自适应 VFH+算法水面无人艇在开阔水域、狭长水道和连续 S 弯 3 种典型环境下都能够航迹平滑到达目标点;并且对于目标点处于“U”型死区时无人船也能够顺利到达目标点,改善了传统 VFH+算法存在的阈值敏感问题。

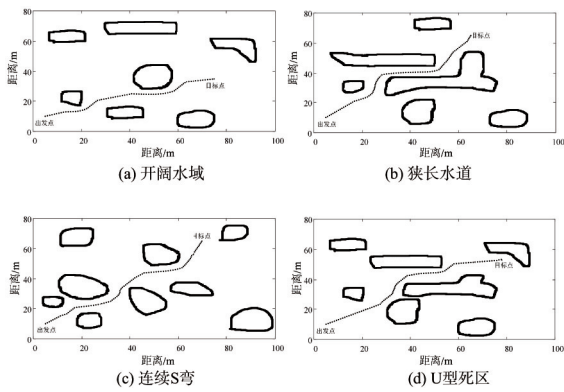


图9 避障结果

此外,在4种典型避障环境下,分别设置障碍物强度阈值 $M=2000$ 、 $M=4000$ 、 $M=6000$ 和采用阈值自调节进行避障仿真测试,得到无人船到达目标点所需路径点数如表1所示。

表1 无人船到达目标点所需路径点数对比表

阈值 M	场景				优化效率/%
	开阔水域	狭长水道	连续S弯	U型死区	
2 000	79	91	99	—	1.85
4 000	78	90	97	98	2.20
6 000	79	93	98	93	2.20
自调节	78	89	97	91	—

表1中“—”符号表示未能到达目标点。路径点数越少表示路径越短。由表1对比数据可以看出,无人船通过自调节环节后能够以较短的平滑路径到达目标点,且路径优化效率平均达到2.08%。

3.2 实验测试结果与分析

为了进一步验证文中算法的有效性,基于所设计的三体无人船进行了内河过桥避障控制实验。内河桥一共有6个桥墩,其避障过程如图10所示。无人船在与1号桥墩相遇时,遵循安全优先原则通过算法选择当前可航行方向,并右转弯避开1号桥墩;随后,无人船在直行过程中又与6号桥墩相遇,遵循安全优先原则计算出当前可航行方向,即左转规避6号桥墩;最后,遵循目标优先原则,无人船转向目标点方向直行,并最终安全到达目标点。无人船避开1号桥墩避障过程的部分雷达点云如图11所示,而无人船完整过桥避障结果如图12所示。



图10 无人船规避1号桥墩

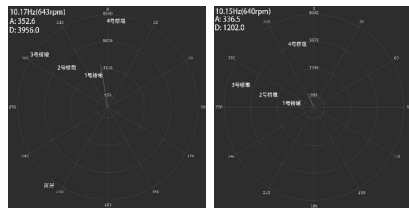


图11 无人船规避1号桥墩的部分雷达点云图



图12 水上过桥避障航行轨迹图

4 结语

为了实现水质检测无人船在复杂环境水域执行作业任务时的实时和高效避障,提出了基于自调节 VFH+的水面无人船激光雷达避障控制算法。通过仿真和实验测试可得出如下结论:

- 1) 使用激光雷达作为探测仪,相比超声波和视觉等传感器,具有扫描范围广、精度高和抗干扰能力强等优势;
- 2) 通过对水域环境进行栅格化处理,计算障碍物强度值,利用阈值进行数据筛选得到候选方向,进行代价计算,可得到无人船最优避障路径;
- 3) 增加阈值自调节环节,根据障碍物、无人船和目标点三者间的位置关系实时调整当前最佳阈值,改善了传统矢量场直方图算法中存在的阈值敏感问题。

参考文献:

- [1] 张树凯,刘正江,张显库,等. 无人船艇的发展及展望[J]. 世界海运,2015,38(9):29-36.
- [2] 孟祥杜. 无人船路径规划算法研究[D]. 天津:天津理工大学,2017.
- [3] 林政,吕霞付. 基于改进模糊算法的水面无人艇自主避障[J]. 计算机应用,2019,39(9):2523-2528.
- [4] BORENSTEIN J, KOREN Y. The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,1991,7(3):278-288.
- [5] ULRICH I, BORENSTEIN J. VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots [C]// Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146), Leuven,Belgium: IEEE,1998:1572-1577.
- [6] BORENSTEIN J, KOREN Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics,1989,19(5):1179-1187.
- [7] 贾卫平,盖欣桐,张祥,等. 基于ROS平台机器人导航避障系统设计及开发[J]. 机械工程师,2019(10):16-18.
- [8] 刘杰,闫清东,唐正华. 基于激光雷达的机器人避障规划仿真研究[J]. 计算机工程,2015,41(4):306-310.
- [9] 李现坤,李泷杲,李栋,等. 激光雷达测量精度实验分析[J]. 机械制造与自动化,2018,47(3):190-193.

收稿日期:2020-04-30