

基于三次 B 样条曲线与动态窗口算法的桁杆轨迹规划

戴 阳¹, 姚宇青^{1,2}, 郑汉丰¹, 韦 波^{1,2}, 杨昱皞^{1,3}, 王永进¹, 张 禹¹

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所/农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室, 上海 200090

2. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306

3. 大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023

摘要: 针对当前中国南极磷虾 (*Euphausia superba*) 捕捞自动化水平较低、人工观察探渔仪图像确定捕捞深度易产生误差等问题, 提出一种基于南极磷虾声呐设备元数据的动力桁杆轨迹规划方法。首先解析水声学仪器 EK80 科学回声探测仪传回的数据, 得到磷虾在不同深度下的目标强度, 用统计学方法确定磷虾在该深度下的资源量, 以此得到每个水平距离 (X) 对应的磷虾最密集的深度 (Y), 再利用三次 B 样条曲线和动态窗口算法分别进行全局和局部路径规划, 规划路线通过这些磷虾最密集的深度。结果显示, 规划路径全长 1 054 m, 总用时 614 s, 动态窗口算法跟踪的最大偏离距离仅为 3.3 m, 小于预计的最大偏移距离 (5 m)。所提出的方法具有以下优点: 1) 有效避免人工判断资源量深度产生误差而对捕捞量造成影响, 提高捕捞效率; 2) 实现自动规划捕捞效益最佳的桁杆前进路线。

关键词: 南极磷虾; 路径规划; 三次 B 样条曲线; 动态窗口算法

中图分类号: S 973.9

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Truss rod trajectory planning based on cubic B-spline curve and Dynamic Window Algorithm

DAI Yang¹, YAO Yuqing^{1,2}, ZHENG Hanfeng¹, WEI Bo^{1,2}, YANG Yuhao^{1,3}, WANG Yongjin¹, ZHANG Yu¹

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200090, China

2. College of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

3. College of Navigation and Ship Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Abstract: In order to solve the problems such as the current low level of automation in the fishing of Antarctic krills (*Euphausia superba*) in China, and the error in determining the fishing depth by manually observing the fish detector image, we proposed a dynamic truss trajectory planning method based on the metadata of Antarctic krill sonar equipment. First, we analyzed the data sent back by the underwater acoustic instrument EK80 scientific echo sounder, obtained the target intensity of krills at different depths, and used statistical methods to determine the krills resources at this depth, so as to get the densest depth (Y) of krills corresponding to each horizontal distance (X). Then we used cubic B-spline curve and Dynamic Window Algorithm to carry out the global path planning and local path planning. The planned route passed through the densest depth of these krills. The results show that the total length of the planned path was 1 054 m, and the total time was 614 s. The maximum deviation distance tracked by the Dynamic Window Algorithm was only 3.3 m, which was less than the expected maximum deviation distance of 5 m. The proposed method can: 1) Avoid the impact of artificial judgment of resource depth on the fishing volume effectively, and improve the fishing efficiency. 2) Realize the automatic planning of the truss forward route with the best fishing efficiency.

收稿日期: 2022-02-28; **修回日期:** 2022-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFD0901204); 上海市科学技术委员会科研计划项目 (18391900800)

通信作者: 戴 阳 (1969—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为渔业信息与遥感技术。E-mail: 13162787852@163.com

Keywords: *Euphausia superba*; Path planning; Cubic B-spline curve; Dynamic Window Algorithm

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 的商业化捕捞可追溯至 19 世纪 70 年代, 前苏联率先开捕后陆续有 20 多个国家加入^[1]。目前主要有单船有袖单囊拖网捕捞和连续泵吸桁杆拖网捕捞两种捕捞方式^[2-3]。南极磷虾具有水平和垂直两个方向的移动能力: 在水平方向上移动缓慢, 方向较为固定, 具有聚集性; 在垂直方向上的移动导致其栖息水层不固定。在捕捞过程中, 为了跟随磷虾深度的变化, 需要不断调节网口深度。单船有袖单囊拖网捕捞通过改变曳纲长度和拖速^[4], 调节网口所在水层, 需要不断地收、放网来采集渔获, 这一过程耗时久, 严重影响了捕捞效率; 采用连续泵吸桁杆拖网捕捞系统, 可以在不起网的情况下通过泵吸将渔获从网囊及时输运至加工车间, 实现持续捕捞, 显著提高了捕捞效率和渔获品质, 可以弥补单船有袖单囊拖网作业的不足。但这种捕捞方式需要在捕捞网的尾部安装吸鱼泵和液压管, 而渔获输送软管、吸渔泵动力输送系统等管线设备, 难以通过改变曳纲长度和拖速来调节网口所在水层, 导致不能根据磷虾聚集水层深度的变化快速调节网口深度。此外, 这两种方式均需要依靠人工观察探渔仪图像确定捕捞深度, 具有很强的主观性^[5-8]。王鲁民等^[9]为了能够灵活地调节桁杆所处深度, 在桁杆上安装了可以调节角度的升降板。桁杆在水中运动时, 调节升降板的角度的可以使其在竖直方向具有一定的运动能力, 构成动力桁杆 (图 1)。在动力桁杆的基础上, 本研究为使桁杆能够更好地通过磷虾丰度最大点, 对桁杆在水下的路径进行了规划。

轨迹规划在汽车自动驾驶、无人机导航等领域应用广泛, 对于提高工作效率、节省人力的贡献巨

大。目前的轨迹跟踪控制方法主要有 PID 算法、Pure Pursuit 纯跟踪算法和 Stanley 算法等^[10-13]。与后两者相比, PID 算法不需要明确控制量的具体求法, 只需要控制其收敛于目标值即可, 但是对于时变非线性系统而言, 不同时刻需要不同的 PID 控制参数, 缺乏灵活性。考虑到捕捞轨迹规划需要具备实时作业的能力, 水下环境复杂多变, 难以建立精确的动力学和运动学模型, 而规划轨迹时又需要兼顾路线全局和局部两个方面。将这些跟踪算法应用到桁杆的深度调节上, 很难使整个运行过程具有较好的效果。文献 [14-16] 使用动态窗口法对移动机器人的轨迹规划进行了改进, 实验结果表明该算法在移动机器人速度和转向角度规划上具有良好的实时性和有效性。基于以上考虑, 本文采用三次 B 样条曲线^[17-18]融合动态窗口算法对网口进行轨迹规划。

首先结合探渔仪图像分析磷虾群目标强度的特点, 确定每段水平距离的磷虾聚集水层深度, 得到位置坐标序列; 然后将得到的位置坐标序列用三次 B 样条曲线进行平滑处理, 得到平滑的路线; 最后使用动态窗口算法对路线进行跟踪。本研究提出的桁杆路径规划方法提供了一种确定磷虾捕捞深度的客观方式, 可以降低因人工观察探渔仪图像产生的误差对捕捞量造成的影响。该方法不仅可以用于南极磷虾的捕捞, 还可以用于任何其他需要根据声呐设备探测确定捕捞鱼类位置的渔业。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源: 数据的采集设备为水声学仪器 EK80 科学回声探测仪, 数据调查时间为 2016 年 12 月 24 日 21:25:58—22:21:53, 调查范围为 58°23.439'W—58°24.026'W, 63°05.811'S—63°06.646'S。

实验环境: 计算机操作系统为 Windows 10, 处理器为 IntelCore™ i7-6400 HQ, 主频率为 2.40 GHz, 内存为 16 G。

1.2 研究方法

1.2.1 数据预处理

目标强度计算采用 Echoview 等水声学处理工具软件使用的模型^[19-20]。

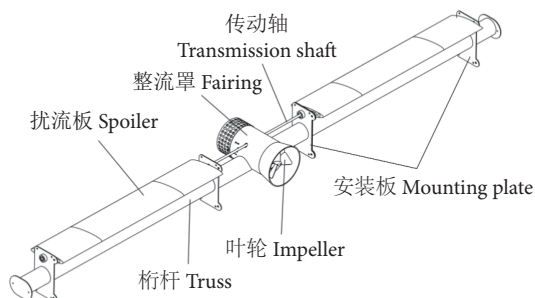


图1 桁杆结构图

Fig. 1 Structure of truss rod

$$\begin{cases} T_s(R, P_r) = P_r + \lg R + 2\alpha R - 10 \lg \left(\frac{P_t G_0^2 \lambda^2}{16\pi^2} \right) \\ R = r - \frac{ct}{4} \\ \lambda = \frac{v}{f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 表示校正范围 (m); P_r 表示接收功率 (W); P_t 表示发射功率 (W); α 表示吸收系数 ($\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$); G_0 表示传感器峰值增益 (1); λ 表示波长 (nm); r 表示未校正范围 (m); c 表示声速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); t 表示传输脉冲长度 (s); f 表示频率 (Hz)。

1.2.2 捕捞深度确定

由式 (1) 计算出各深度对应的目标强度, 捕捞作业只需要找到同一海域不同深度相对的虾群丰度

中心, 不需要计算目标资源量具体的值。因此, 本文仅通过统计符合磷虾目标强度点的数量比较“目标资源量”的多少。选取最佳捕捞深度主要基于以下两个原则: 1) 该深度下的目标资源量; 2) 该深度的邻域内目标资源总量。

图 2 展示了基于以上原则、通过分析一段水平距离全长 1 131 m 的回声探测仪数据而确定的最佳捕捞深度。可以看出该方法得到的深度值震荡过于尖锐和频繁, 究其原因可能是因为虾群分布整体较为集中, 但不排除局部会有分散的情况。受角速度和线速度等的限制, 无法控制网口在一定时间内通过这些点, 不利于跟踪, 需要进一步处理。

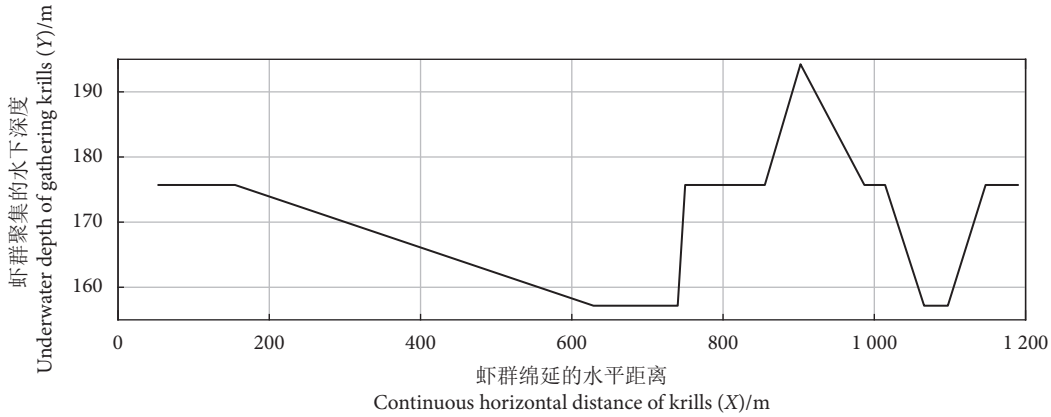


图2 磷虾目标深度

Fig. 2 Target depth of krills

为了解决以上问题, 设计了深度值筛选与插值算法, 遍历数据, 删除深度值为 NULL 的点。每隔一段距离选择一个深度值最多的深度, 将该深度作为这一段距离的最佳捕捞深度, 将这段距离里的其他深度更新为这个“最佳捕捞深度”。深度值相同的越多, 说明该深度的捕捞价值越高。遍历完成之后, 统计每个深度的数量, 将深度数量低于捕捞下限的深度点进一步剔除。算法流程图见图 3。

经过深度值筛选与插值算法处理后使用三次 B 样条曲线的规划路径见图 4。

1.2.3 B 样条曲线平滑算法

Gordon 和 Risenfeld^[21] 用 B 样条基函数替换了伯恩斯坦基函数, 拓展了 Bezier 曲线, 构成了 B 样条曲线。该曲线使用修改灵活, 部分节点的修改不会影响整条曲线。

B 样条曲线是分段曲线, $m+n+1$ 个顶点, 可以定义 $m+1$ 段 n 次样条曲线。其数学表达式为:

$$P_{i,n}(t) = \sum_{k=0}^n P_{i+k} \cdot F_{k,n}(t) \quad (2)$$

式中: $0 \leq t \leq 1$, $i = 0, 1, 2, \dots, m$ 。

$F_{k,n}(t)$ 为 B 样条基函数, 表达式为:

$$F_{k,n}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-k} (-1)^j \cdot C_{n+1}^j \cdot (t+n-k-j)^n \quad (3)$$

相邻 4 个顶点可以定义一段三次 B 样条曲线, n 个顶点可以组成 $n-3$ 段在连接处达到二阶连续的三次 B 样条曲线。三次 B 样条曲线基函数 $F_{k,n}(t)$ 定义为:

$$F_{k,n}(t) = [\underbrace{0 \dots 0}_{i-1} f_0(t) f_1(t) f_2(t) f_3(t) \underbrace{0 \dots 0}_{n-i-3}] \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} f_0(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ f_1(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ f_2(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ f_3(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (5)$$

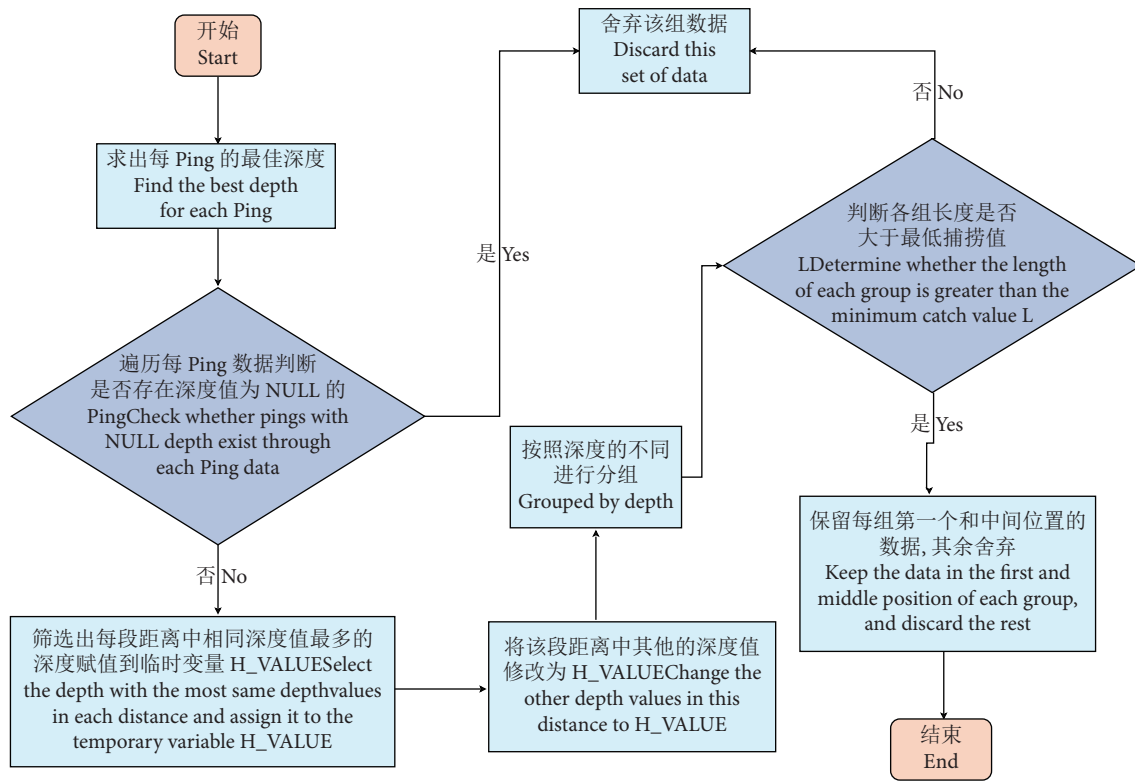


图3 深度值筛选与插值算法

Fig. 3 Depth value filtering and interpolation algorithm

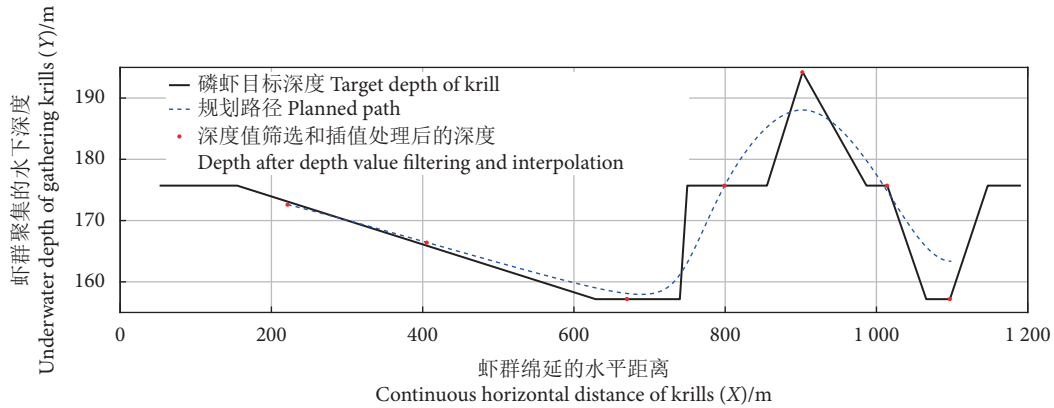


图4 磷虾目标深度与规划路径对比

Fig. 4 Comparison between target depth and planned path of krills

式中: $0 \leq t \leq 1$ 为从初始状态到目标状态的归一化时间。

B 样条曲线评价。桁杆轨迹 B 样条曲线 s 为平滑曲线, 假定其方程由参数方程给出:

$$\begin{cases} x = x(t), & \theta < t < \phi \\ y = y(t) \end{cases} \quad (6)$$

通过式 (6) 的一阶及二阶导数, 可以得出桁杆的速率向量 (v) 和加速率向量 (a):

$$v = \{x'(t_0), y'(t_0)\} \quad (7)$$

$$a = \{x''(t_0), y''(t_0)\} \quad (8)$$

切向加速率 a_t 和法向加速率 a_n 组成加速率 a 。

其中, 法向加速率 a_n 即向心加速率, 由牛顿第二定律, 向心加速率是由向心力产生的, 圆周运动中, 其与速率存在如下关系:

$$|a_n| = |v|^2 / r \quad (9)$$

式中: r 为圆周运动的半径; a_t 为 a 在 v 上的投影, 则:

$$|a_t| = (v \cdot a) / |v| \quad (10)$$

$$|a_n| = \sqrt{|a|^2 - (v \cdot a)^2 / |v|^2} \quad (11)$$

由式 (9)、(11) 计算出曲率半径:

$$r = |v|^2 / |a_n| = |v|^3 / \sqrt{|a|^2 |v|^2 - (v \cdot a)^2} \quad (12)$$

其中, $|v| = \sqrt{x'(t_0)^2 + y'(t_0)^2}$, $(v \cdot a) = x'(t_0)x''(t_0) + y'(t_0)y''(t_0)$

$y'(t_0)y''(t_0)$, $|a| = \sqrt{x''(t_0)^2 + y''(t_0)^2}$ 。如果符合 $r \geq r_{\min}$, 则认为符合桁杆转向限制条件。

1.2.4 动态窗口算法^[22]

动态窗口算法的主要思路是对所有可行轨迹进行评估, 得到一条最佳轨迹, 进而确定下一时刻的行进方向和速度。因此确定行进轨迹的模型非常重要, 本节所设计的模型主要是为了确定位置与速度、时间间隔等之间的关系。

1.2.4.1 位置以及方向角

桁杆只能向上或者向下调整前进方向, 假设桁杆在单位时间 Δt 内的速度可以用 (v_t, ω_t) 来表示, 桁杆的位置坐标用 (x_0, y_0) 来表示, 桁杆的方向角用 θ_t 来表示, 则桁杆的位置以及方向角的更新方程^[23] 为:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_x \Delta t \cos(\theta_t) - v_y \Delta t \sin(\theta_t) \\ y(t) = y_0 + v_x \Delta t \sin(\theta_t) + v_y \Delta t \cos(\theta_t) \\ \theta_{t+i} = \theta_t + \omega_t \Delta t \end{cases} \quad (13)$$

1.2.4.2 速度采样及最优轨迹选取

受设备自身物理特性约束和机器内部的发动工具力矩的限制, 速度采样有两个限制条件:

1) 最大速度、最小速度和最大转向、最小转向限制。用集合的方式表示为:

$$v_m = \{v \in [v_{\min}, v_{\max}], w \in [w_{\min}, w_{\max}]\} \quad (14)$$

$$(v_n, w_n) = \{v \in [v_n - v' \cdot t, v_n + v' \cdot t] \wedge w \in [w_n - w' \cdot t, w_n + w' \cdot t]\} \quad (15)$$

这一限制条件确定了采样时的速度和转向范围。

2) 最大加速度限制, 用于限制在下一个时间间隔内设备所能达到的实际速度。用集合的方式表示为:

$$(v_n, w_n) = \{v \in [v_n - v' \cdot t, v_n + v' \cdot t] \wedge w \in [w_n - w' \cdot t, w_n + w' \cdot t]\} \quad (16)$$

式中: v_n 与 w_n 分别表示当前位置的速度和角速度值; v' 与 w' 分别表示在 t 时间内加速度和角加速度值; (v_n, w_n) 表示设备的实际速度。

根据这两个约束条件采用遍历的方式逐个代入位置和方向角的更新方程, 依此可以得到多组速度组成的动态窗口。

接着使用评价函数对每组采样速度进行评价, 从而得到最优速度解, 这个最优速度所对应的轨迹即为下一时刻的运动轨迹。在该轨迹下桁杆可以以最小的代价通过规划路径。

评价函数 G 表达式为:

$$G = \alpha \cdot h + \beta \cdot d + \gamma \cdot v + \delta \cdot E_{\text{dev}} \quad (17)$$

式中: G 表示总的评价函数值; α 、 β 、 γ 、 δ 为各项

的权重系数; $h = 180 - \theta$, θ 为桁杆的航向角与目标点方向之间的夹角, 该分量的物理意义是使桁杆朝向目标行进所需要的角度; d 为当前轨迹上每个点与规划路径之间的最大距离, 在原动态窗口^[9] 算法中, d 为距离障碍物的最小安全距离; v 为桁杆速度, 在确保安全的前提下, 期望桁杆能够更快地达到目标点; E_{dev} 用于评估当前轨迹与从全局规划获得的轨迹之间的偏差。

防止某一个评价指标过大而影响整体的评价效果, 需要对评价函数各项的值进行了归一化操作。归一化方式为:

$$h_n(i) = \frac{h(i)}{\sum_{i=1}^n h(i)} \quad (18)$$

$$d_n(i) = \frac{d(i)}{\sum_{i=1}^n d(i)} \quad (19)$$

$$v_n(i) = \frac{v(i)}{\sum_{i=1}^n v(i)} \quad (20)$$

$$E_{\text{dev},n}(i) = \frac{E_{\text{dev}}(i)}{\sum_{i=1}^n E_{\text{dev}}(i)} \quad (21)$$

修改动态窗口跟踪连续节点。传统的动态窗口算法只有起点和终点的指引, 只能规划已知两点之间的路径, 本文为了使动态窗口算法能够跟踪连续的节点, 对算法进行了修改。在修改后的算法中, 起点和终点分别为第一个目标点和最后一个目标点, 中间其余的点为虚拟目标点^[24]。为了保持较高的速度, 在到达最后一个目标点之前, 最大的缓冲距离都为 0。直到下一个目标点为终点时再计算缓冲距离。算法的修改流程见图 5 和图 6。

2 结果

为了验证在不同水流速度下, 升降板角度变化对桁杆深度的影响。2021 年 6 月在上海海洋大学动水槽开展了桁杆动力试验。在 4 种不同水流速度下 (0.5 、 0.6 、 0.7 、 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 设置 6 个不同升降板角度 (0° 、 8.8° 、 17.7° 、 26.5° 、 35.3° 、 44.2°), 观察了桁杆深度变化。根据实验的结果、桁杆自身物理特性和发动模块力矩等因素, 对桁杆的仿真参数进行了设置。具体参数设置见表 1。

初始状态设置为: 坐标 $[200, 170]$, 角度 0 , 速度 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 角速度 $0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据各项仿真参数的设置, 搭建了仿真平台, 验证动态窗口算法对规划路径的跟踪情况。执行结果见图 7。

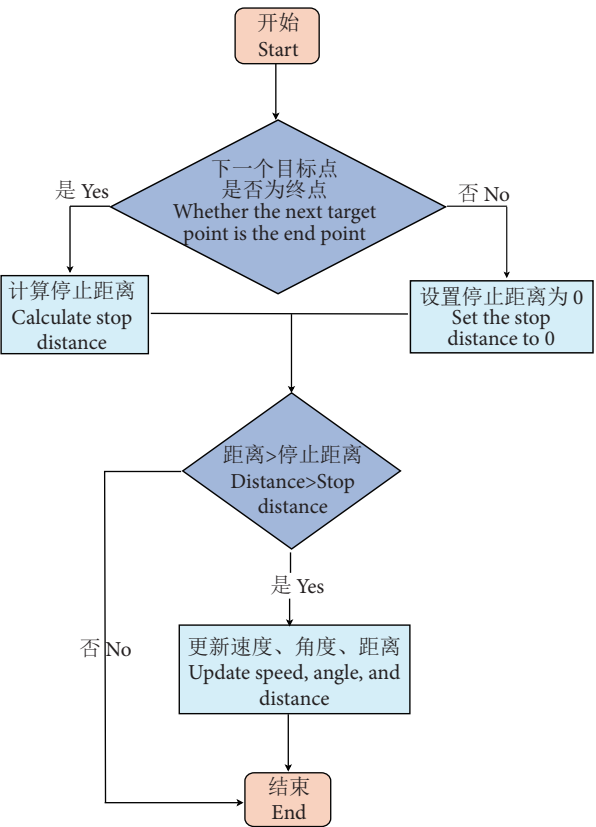


图5 修改动态窗口为可跟踪连续节点
Fig. 5 Change of dynamic window to trackable continuous nodes

仿真时网口高度设定为 20 m，网口中心位置距离网口上下边缘 10 m，则偏移距离小于 10 m，就能保证网口通过该段路径时覆盖预规划的最佳捕捞深度。结果表明，受桁杆转弯性能、曳钢长度等的影响动态窗口算法实际规划的路径长度为 1 054 m，其水平距离也略小于实验数据长度 1 131 m，规划总用时 614 s，从图 8 和图 9 的仿真结果可以看出，偏离规划路径的最大距离为 3.3 m，小于 10 m，说明跟踪的路线通过了所计算的磷虾丰度中

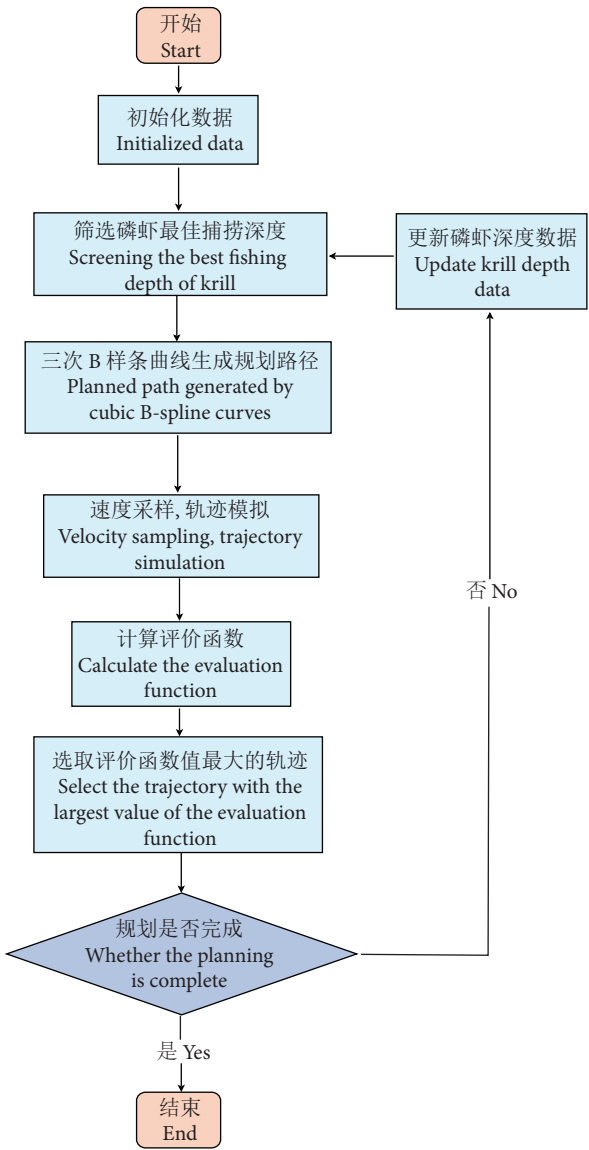


图6 算法整体执行流程
Fig. 6 Overall algorithm execution flow

心，表明该算法可以控制桁杆较好地跟踪规划好的路径，可以有效避免因人工判断资源量深度产

表1 仿真参数的设置
Table 1 Simulation parameter settings

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
最大速度 Maximum speed	$1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	最大角速度 Maximum angular velocity	$0.7 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
最小速度 Minimum speed	$0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	最小角速度 Minimum angular velocity	$0 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
速度加速度 Velocity acceleration	$0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	速度分辨率 Velocity resolution	$0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
角速度加速度 Angular velocity acceleration	$0.2 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$	角速度分辨率 Angular velocity resolution	$0.1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$
间隔时间 Interval time	0.1 s	向前模拟轨迹的时间 Time of forward simulation track	3 s
评价函数权重 α Evaluation function weight α	0.4	评价函数权重 γ Evaluation function weight γ	0.1
评价函数权重 β Evaluation function weight β	0.4	评价函数权重 δ Evaluation function weight δ	0.1

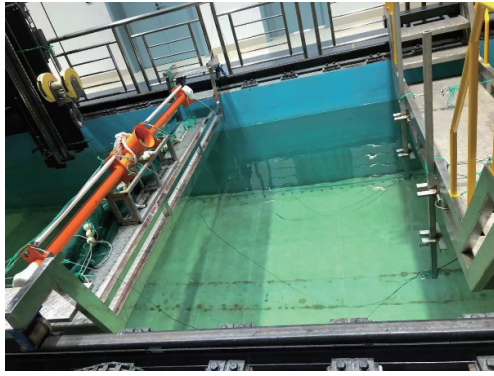


图7 桁杆实验

Fig. 7 Truss test

生误差而对捕捞量造成影响,有利于提高捕捞效率。

3 讨论

本研究提出了一种桁杆路径规划方法,可以利用一段时间内的声呐设备元数据快速规划桁杆的移动路径。该方法不仅可以用于南极磷虾的捕捞,还可以用于任何需要根据声呐设备探测确定捕捞鱼类

位置的渔业。

磷虾的分布与向西流动的海岸洋流和环南极洲洋流相关^[25-26],海上气候条件多变,渔船和桁杆的速度不可避免地会受到洋流、风浪等的影响。但是洋流是具有一定规模水体沿着某方向有规律的运动,本文讨论的捕捞作业一般在洋流内部开展,不在洋流边缘,在进行仿真实验时,涉及的船速、桁杆速度等都是相对于水体的速度,因此不用考虑洋流水体的运动速度的影响。

本文所使用的 B 样条方法,由 Gordon 和 Riesenfeld^[21]在 1972 年提出,在工业制造、车辆路径规划、飞机航迹规划等方面都有广泛的应用^[27-29]。该方法不仅克服了 Bezier 曲线或曲面不能局部修改和拼接繁杂的缺点,还保留了 Bezier 曲线或曲面的所有优点^[30-31]。桁杆只能沿直线或曲线实现波浪形的上下运动,并且不能持续性的向上或者向下实时改变运动轨迹。因此,为了保证桁杆能够连续地沿着路径点序列前进,根据影响其升降性能的 3 个主

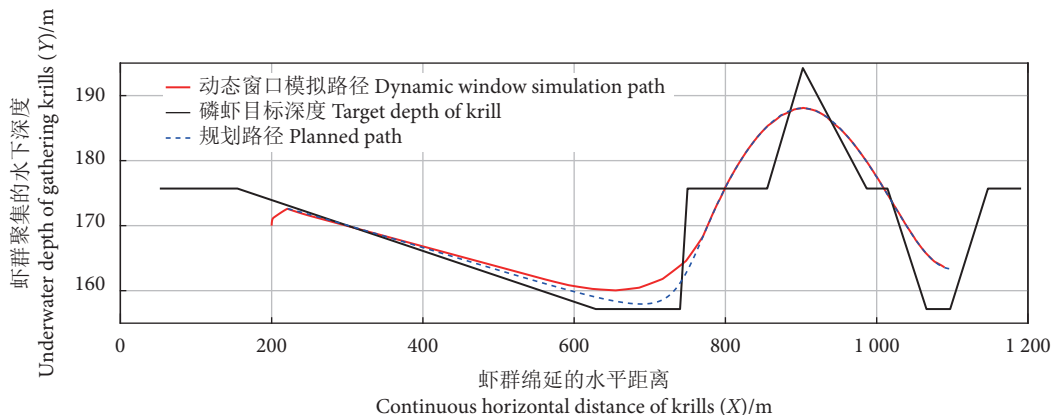


图8 动态窗口算法对规划路径的跟踪情况

Fig. 8 Dynamic window algorithm tracking planned path

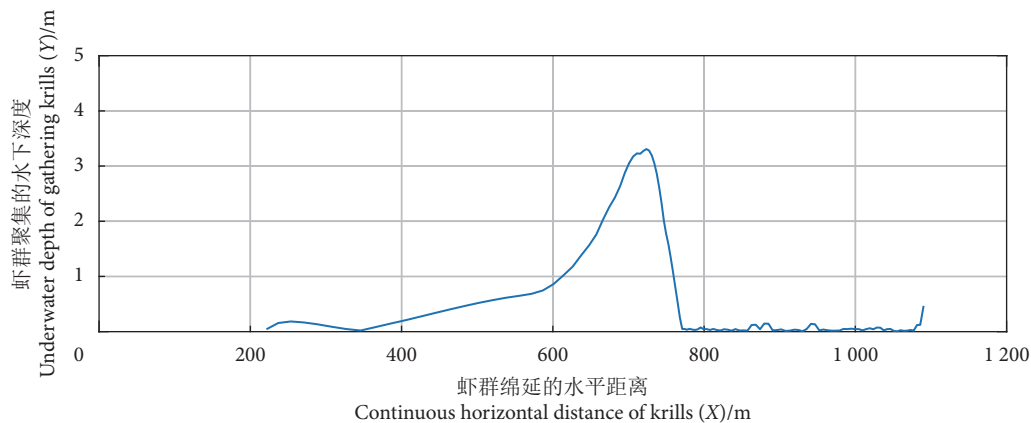


图9 偏离最优航线距离

Fig. 9 Distance from optimal route

要方面——最小步长、最大爬坡角和极限转弯半径来平滑桁杆的路径曲线^[32]。

动态窗口算法是针对车辆自动驾驶问题而提出, 该算法具有模型简单、执行效率高等优点, 虽然不适合解决复杂路况下的路径规划问题, 但是海洋捕捞的路径复杂度相较于地面交通简单许多, 恰好可以充分利用其优点。常规的动态窗口算法进行规划时, 只有目标方向的指引, 中间的具体路径只能通过躲避障碍物实时规划。本文通过将第一个目标点和最后一个目标点作为动态窗口算法的起点和终点, 其余的点作为虚拟目标点, 实现在全局路径规划的同时, 对路径点进行连续跟踪。通过模拟试验, 证明了该方法是行之有效的, 能够迅速地规划出一条可行的路线。

参考文献:

- [1] 王荣, 孙松. 南极磷虾渔业现状与展望 [J]. 海洋科学, 1995(4): 28-32.
- [2] 王万勇, 刘怡锦, 谢宁. 南极磷虾捕捞加工船及装备发展现状和趋势 [J]. 船舶工程, 2020, 42(7): 33-39.
- [3] 徐国栋, 陈雪忠, 黄洪亮, 等. 南极磷虾捕捞技术探讨 [J]. 湖南农业科学, 2011(19): 122-124.
- [4] 苏志鹏, 许柳雄, 朱国平, 等. 拖速和曳纲长度对南极磷虾中层拖网网位的影响 [J]. 中国水产科学, 2017, 24(4): 884-892.
- [5] 刘健, 黄洪亮, 李灵智, 等. 南极磷虾连续捕捞技术发展状况 [J]. 渔业现代化, 2013, 40(4): 51-54.
- [6] 湛志新, 王志勇, 欧阳杰. 我国南极磷虾捕捞与加工装备科技发展研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 48-52.
- [7] 王新良, 赵宪勇, 左涛, 等. 黄海太平洋磷虾回波映像识别与资源密度评估 [J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1080-1088.
- [8] 张吉昌, 赵宪勇, 王新良, 等. 商用探鱼仪南极磷虾声学图像的数值化处理 [J]. 渔业科学进展, 2012, 33(4): 64-71.
- [9] 王鲁民, 王永进, 齐广瑞, 等. 南极磷虾桁杆拖网升潜自供能调节装备: 212488059U[P]. 2021-02-09.
- [10] 吕文杰, 马戎, 李岁芳, 等. 基于纯追踪模型的路径跟踪改进算法 [J]. 测控技术, 2011, 30(7): 93-96, 100.
- [11] 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21-26.
- [12] 张智刚, 罗潜文, 赵祥喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 6-12.
- [13] 敖邦乾, 杨莎, 叶振环. 改进蚁群算法水面无人艇平滑路径规划 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1006-1014.
- [14] 王洪斌, 尹鹏衡, 郑维, 等. 基于改进的 A*算法与动态窗口法的移动机器人路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42(3): 346-353.
- [15] 槐创锋, 郭龙, 贾雪艳, 等. 改进 A*算法与动态窗口法的机器人动态路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(8): 5.
- [16] 田晃. 基于改进 A*算法与改进 DWA 算法的无人驾驶汽车路径规划研究 [D]. 海口: 海南大学, 2021: 5-12.
- [17] 曾德全, 余卓平, 张培志, 等. 三次 B 样条曲线的无人车避障轨迹规划 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2019, 47(S1): 159-163.
- [18] 张瑜, 宋荆洲, 张琪祁. 基于改进动态窗口法的户外清扫机器人局部路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42(5): 617-625.
- [19] PALERMINO A, FELICE A D, CANDUCI G, et al. First target strength measurement of *Trachurus mediterraneus* and *Scomber colias* in the Mediterranean Sea [J]. Fish Res, 2021, 240: 105973.
- [20] BASSETT C, LAVERY A C, STANTON T K. Broadband measurements of the acoustic target strength of mesopelagic fishes [J]. J Acoust Soc Am, 2019, 146(4): 2772.
- [21] GORDON W J, RIESENFELD R F. B-spline curves and surfaces [J]. Comput Aided Geom Des, 1974, 23(91): 95-126.
- [22] FOX D, BURGARD W, THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. IEEE Robot Autom Mag, 2002, 4(1): 23-33.
- [23] 王畅. 基于水下滑翔机的路径规划研究和可视化平台设计 [D]. 天津: 天津大学, 2020: 20-25.
- [24] 杨周, 刘海滨. 基于改进蚁群与动态窗口法的 AGV 动态路径规划 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(6): 287-295.
- [25] 李莹春. 环境因子对南极半岛北部南极磷虾渔场时空分布影响研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2012: 5-7.
- [26] ICHI T. Distribution of Antarctic krill concentrations exploited by Japanese krill trawlers and minke whales (Eleventh Symposium on Polar Biology) [C]. Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology, 1990: 36-56.
- [27] 吕恩利, 林伟加, 刘妍华, 等. 基于 B 样条曲线的智能叉车托盘拾取路径规划研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 394-402.
- [28] 朱振强. 飞行器航路规划与评价研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 30-37.
- [29] 李红, 王文军, 李富强. 基于 B 样条理论的平行泊车路径规划 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 143-151.
- [30] 冯峰. 基于三次 B 样条曲线的一些算法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021: 23-27.
- [31] 肖轶军, 丁明跃, 彭嘉雄. 基于迭代最近点的 B 样条曲线拟合方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2000(7): 49-52.
- [32] 胡中华, 许昕, 陈中. 无人机三维航迹非均匀三次 B 样条平滑算法 [J]. 控制工程, 2020, 27(7): 1259-1266.