

基于蒙特卡罗算法的水上移动漂浮物定位方法

游正泉[†]

(南海救助局湛江救助基地, 广东 湛江 524000)

摘要: 在水上复杂多变的环境中, 由于漂浮物吃铅量过大, 容易受到水流波动、风浪扰动等诸多干扰因素的影响, 导致定位精度不足。为满足高精度定位的需求, 提出了一种基于蒙特卡罗算法的水上移动漂浮物定位方法, 实时采集海洋环境数据, 包括风、水流以及波浪。构建风、水流以及波浪影响机制下的漂浮物运动模型。基于漂浮物的运动模型以及环境因素的随机变化, 利用蒙特卡罗算法模拟漂浮物在水面上的可能运动轨迹, 在迭代过程中, 粒子群逐渐收敛于漂浮物的真实位置, 从而实现对水上移动漂浮物的精确定位。结果表明: 无论是在 x 向还是 y 向, 所研究方法应用下, 定位误差都保持在一个相对稳定的低水平范围内, 由此证明所研究方法定位方法的准确性。

关键词: 蒙特卡罗算法; 水上移动漂浮物; 环境变量; 运动模型; 定位方法

中图分类号: TP28.77

文献标识码: A

A Method for Locating Floating Objects on Water Based on Monte Carlo Algorithm

YOU Zhengquan[†]

(Zhanjiang Rescue Station Base of the South Sea Rescue Bureau, Zhanjiang, Guangdong 524000, China)

Abstract: In the complex and ever-changing environment of water, due to the large amount of lead consumed by floating floats, they are easily affected by various interference factors such as water flow fluctuations and wind and wave disturbances, resulting in insufficient positioning accuracy. To meet the demand for high-precision positioning, a Monte Carlo algorithm based floating objects positioning method is proposed to collect real-time marine environmental data, including wind, water flow, and waves. Construct a floating object motion model under the influence of wind, water flow, and wave mechanisms. Based on the motion model of floating objects and the random changes of environmental factors, Monte Carlo algorithm is used to simulate the possible motion trajectory of floating objects on the water surface. During the iteration process, the particle swarm gradually converges to the true position of floating objects, thus achieving accurate positioning of floating objects moving on water. The results indicate that, regardless of whether in the x or y direction, the positioning error of the studied method remains within a relatively stable low level range, thus proving the accuracy of the positioning method studied.

Key words: Monte Carlo algorithm; floating objects moving on water; environmental parameters; motion model; positioning method

近年来,海上事故频发,包括船舶沉没、人员落水、货物漂流等,这些事件往往伴随着漂浮物的产生。这些漂浮物可能包括人员、货物残骸、油污等,它们的准确位置对于后续的搜救、清理和处置工作至关重要^[1]。然而,由于海洋环境的复杂性,包括海风、海流、波浪等多种因素的影响,漂浮物的位置会随时间发生显著变化,这给定位工作带来了极大的挑战^[2]。因此,随着海洋活动的日益频繁,如何准确、快速地定位水上移动漂浮物,成了一个亟待解决的实际问题。

为此,很多专家和学者就目标定位问题进行了广泛研究。例如,付诗文等^[3]首先使用 YOLOv5 算法对视频序列进行目标检测,得到每一帧中目标对象的位置和大小信息。然后使用 DeepSORT 算法对检测到的目标对象进行跟踪。在跟踪过程中,DeepSORT 利用 YOLOv5 提取的特征向量和外观描述符来进行目标关联和轨迹更新,从而实现准确的目标跟踪定位。海浪和水流导致目标对象的运动轨迹变得不规则,增加了跟踪的难度,导致 YOLOv5-DeepSORT 无法准确定位到目标对象的运动轨迹。邢博闻等^[4]通过深度强化学习进行目标搜索,智能体根据当前状态(即提取的特征信息)和奖励函数来选择最优动作,然后这些动作会引导智能体在环境中进行搜索,直到找到目标位置。在搜索过程中,智能体会不断根据新获取的状态信息和奖励来更新其策略,以逐步逼近最优解。海上目标搜索任务中的环境复杂多变,增加了深度强化学习算法在训练过程中的不稳定性,导致模型性能波动较大,影响了定位结果的准确性。宋子壮等^[5]利用目标物体发出的红外辐射进行成像,然后采用神经网络预测目标物体的中心点、宽度、高度等信息,从而得到目标物体的边界框,完成对目标物体的准确定位。在面对不同形状和大小的物体时,无锚框无法准确瞄准,导致目标定位跟踪的失败或误差增大。Li 等^[6]利用双目视觉系统捕捉目标物体的图像,并计算其三维坐标。同时,激光发射器向目标物体发射激光,通过接收反射回来的激光信号,进一步精确确定目标物体的位置。水下环境的复杂性和多变性导致水下目标的形状、纹理、运动等特性难以确定,增加了水下目标检测和跟踪的难度,使得双目视觉系统难以准确捕捉目标物体的图像并计算其三维坐标。

因此,开发一种基于蒙特卡罗算法的水上移动

漂浮物定位方法。通过该研究以期对水上移动漂浮物的定位问题提供解决方案,提高定位的准确性和实时性,为海上搜救、环境保护及海洋科学研究等领域提供更加可靠的技术支持。

1 漂浮物运动模型构建

考虑到漂浮物自身的运动特性和海洋环境对漂浮物位置的影响,为了使本文方法具有更高的准确性和实用性,分析对水上漂浮物移动产生影响的环境变量,主要包括三个:风、水流以及波浪。

1)风:风是推动漂浮物移动的重要因素之一。风速的大小和方向会直接影响漂浮物的漂移速度和方向。

2)水流:水流的方向和速度对漂浮物的漂移轨迹有着决定性的影响。特别是在河流或海洋中,水流的变化可能导致漂浮物发生显著的偏移^[7-9]。

3)波浪:波浪的存在会增加漂浮物在水面上的不稳定性,使其轨迹更加难以预测。波浪的高度、周期和方向都是重要的影响因素^[10]。

针对目标区域内风、水流以及波浪三个影响变量,水上环境信息监控模型如图 1 所示。

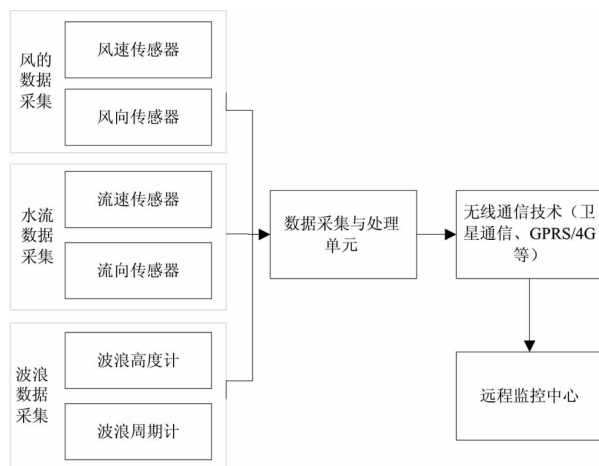


图 1 水上环境信息监控模型

在水上移动漂浮物定位中,该算法需要模拟漂浮物的运动轨迹。运动模型的构建为这一模拟过程提供了必要的数学和物理基础^[11,12]。通过定义漂浮物的运动规律,模型能够分析风、水流以及波浪因素对漂浮物运动的影响,生成符合实际情况的漂浮物运动轨迹^[13]。

(1)风的影响机制

假设风对漂浮物产生一个与风速成正比的推

力,这个推力可以分解为水平方向和垂直方向的两个分量。但是,在大多数情况下,主要关注水平方向上的推力,因为它直接影响漂浮物的水平位移。由此,风对水上漂浮物的影响机制如式(1)所示。

$$Q_w = \frac{\rho_{\text{air}} C_d A (V_w - V_{\text{漂浮物}})^2 \cos \theta_w}{2} \quad (1)$$

式中, Q_w 是风在水平方向上对漂浮物产生的推力; ρ_{air} 是空气的密度; C_d 是阻力系数,它取决于漂浮物的形状和表面特性; A 是漂浮物正对风向的投影面积; V_w 是采集到的水上风速; θ_w 是采集到的风向与漂浮物运动方向之间的夹角(以漂浮物运动方向为基准,风向顺时针旋转为正); $V_{\text{漂浮物}}$ 是漂浮物的速度。

(2) 水流的影响机制

水流对漂浮物的影响通常通过水流拖拽力来描述。水流拖拽力的表示如式(2)所示。

$$Q_r = \frac{\rho_r D_d \dot{A} (V_r - V_{\text{漂浮物}})^2}{2} \quad (2)$$

式中, Q_r 是拖拽力,即水流对漂浮物的作用力; ρ_r 是流体的密度(对于水,大约是 1000 kg/m^3); D_d 是拖曳系数,它取决于漂浮物的形状和流体的性质; $\dot{A}$ 是漂浮物面对水流方向的投影面积; V_r 是水流的速度。

(3) 波浪的影响机制

波浪对漂浮物的影响比较复杂,通常涉及波浪的周期、振幅、漂浮物的质量和阻尼等因素。为了简化,假设波浪使漂浮物产生一个周期性的上下颠簸运动,但不影响其水平位移。计算波浪对漂浮物的作用力及作用力在两个垂直方向上的分量,如下式所示。

$$Q_s = \frac{\rho_r g (W_1 + W_2)}{2N} \quad (3)$$

$$W_1 = V_0 e^{-\alpha \beta} \cos(45^\circ - \alpha \beta) \quad (4)$$

$$W_2 = V_0 e^{-\alpha \beta} \sin(45^\circ - \alpha \beta) \quad (5)$$

式中, Q_s 是波浪对漂浮物的作用力; g 是漂浮物重力加速度; V_0 是波浪的初始速度; α 是衰减系数,表示波浪高度随距离衰减的速率; β 是距离波浪源的距离; W_1 、 W_2 分别表示波浪作用力在两个垂直方向上的分量,这两个方向是通过与波浪传播方向成 45° 角来定义的; N 是波浪周期。

Q_w 、 Q_r 、 Q_s 的合力决定了漂浮物在海洋中的漂移运动轨迹。这些力作用在漂浮物上,导致其产生加速度和速度的变化,从而改变其运动轨迹。因此,漂浮物的运动可以看作是在各种力的作用下进

行的。牛顿第二定律是描述物体运动状态变化的基本定律,它表明物体的加速度与作用在其上的合外力成正比,与物体的质量成反比。对于漂浮物在海洋中的运动,使用牛顿第二定律来描述其运动,如式(6)所示。

$$Q_{\text{合}} = Q_w + Q_r + Q_s = G \cdot u \quad (6)$$

式中, $Q_{\text{合}}$ 是 Q_w 、 Q_r 、 Q_s 的合力; G 是漂浮物的质量; u 是漂浮物的加速度

有了加速度 u ,就可以通过积分来求解漂浮物的速度和位置随时间的变化,从而得到其运动轨迹。

1.1 水上移动漂浮物定位

蒙特卡罗算法通过模拟大量随机事件来预测漂浮物的漂移轨迹,而这些随机事件的发生概率和结果都依赖于输入的环境变量^[14],动态地完成水上移动漂浮物定位。

具体过程如下:

步骤 1:确定搜索区域和粒子数量。

步骤 2:设定漂浮物的初始位置、速度、加速度等变量,并定义模拟的时间步长和总时长。

步骤 3:生成粒子集合。在蒙特卡罗定位方法中,水上移动漂浮物被抽象成一组相互独立的粒子集合。每个粒子代表漂浮物可能的一个位置或状态^[15]。

步骤 4:在搜索区域内初始化均匀散布这些粒子,计算每个粒子的初始权重,如式(7)所示。

$$w_0^i = \frac{1}{n} \quad (7)$$

式中, w_0^i 是第 i 个粒子的初始权重; n 是粒子数量。

步骤 5:状态转移。根据漂浮物的运动模型和海洋环境(如风、流等)的影响,对每个粒子进行状态转移,预测其新的位置。首先,根据漂浮物的加速度来更新其速度,如下式所示。

$$\begin{cases} v_{t+1}^i(x) = v_t^i(x) + u \cdot \Delta t + Q_{\text{合}} \\ v_{t+1}^i(y) = v_t^i(y) + u \cdot \Delta t + Q_{\text{合}} \end{cases} \quad (8)$$

$$u = \frac{Q_{\text{合}}}{m} \quad (9)$$

式中, $v_{t+1}^i(x)$ 和 $v_{t+1}^i(y)$ 分别是第 i 个粒子在下一时刻 $t+1$ 的 x 和 y 方向上的速度; $v_t^i(x)$ 和 $v_t^i(y)$ 分别是第 i 个粒子在当前时刻 t 的 x 和 y 方向上的速度; Δt 是时间间隔。

有了更新后的速度,就可以通过积分(在这里

是简单的离散时间步长乘速度)来更新漂浮物的位置,如式(10)所示。

$$\begin{cases} x_{t+1}^i = x_t^i + v_{t+1}^i(x) \cdot \Delta t \\ y_{t+1}^i = y_t^i + v_{t+1}^i(y) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

式中, x_{t+1}^i 和 y_{t+1}^i 分别是第 i 个粒子在下一时刻 $t+1$ 的 x 和 y 方向上的坐标; x_t^i 和 y_t^i 分别是第 i 个粒子在当前时刻 t 的 x 和 y 方向上的坐标。

步骤 6:观测。通过传感器获取漂浮物的观测数据。

步骤 7:更新。根据观测数据更新每个粒子的权重,如式(11)所示。

$$w_{t+1}^i = w_t^i \cdot p(y_{t+1}^i | x_{t+1}^i) \quad (11)$$

式中, w_{t+1}^i 是第 i 个粒子在时间点 $t+1$ 的权重; $p(y_{t+1}^i | x_{t+1}^i)$ 是给定粒子状态下观测到数据的概率。

步骤 8:粒子重采样。根据粒子的权重进行重采样,保留权重较大的粒子,丢弃权重较小的粒子。重采样的目的是使粒子群更加集中于真实状态附近,提高定位的精度。

步骤 9:重复迭代。在时间步长内重复上述过程,直到达到模拟的总时长 $t = T$ 。

步骤 10:统计所有粒子的位置分布,得到漂浮物的移动位置轨迹。

蒙特卡罗算法以其独特的随机模拟和统计特性,在多个领域得到了广泛应用。在水上移动漂浮物的定位问题中,蒙特卡罗算法通过模拟漂浮物在海洋环境中的运动轨迹,结合实时的海洋环境数据(如风速、流向、流速等),实现对漂浮物位置的预测和定位。

2 仿真算例

以一艘无人操作的试验船作为水上移动漂浮物,在一个 $1200\text{ m} \times 800\text{ m}$ 水域上进行水上移动漂浮物定位模拟研究,水上移动漂浮物如图 2 所示。该移动漂浮物的基本变量如表 1 所示。

分别采用 EL15-1A 型杯式风速风向传感器、MW-WS-S0 型水流传感器和 SBY1-1 型压力式波浪仪,以每 10 min 采集一次的频率,采集 $1000\text{ m} \times 800\text{ m}$ 水域风、水流以及波浪三个环境变量的数据,其中,EL15-1A 型杯式风速风向传感器的风速测量精度可达 $\pm 0.1\text{ m/s}$,风向角度测量精度可达 $\pm 0.05^\circ$,MW-WS-S0 型水流传感器的流速测量精

度为 $\pm 0.05\text{ m/s}$,流向角度测量精度达为 $\pm 2^\circ$,SBY1-1 型压力式波浪仪的波浪高度测量精度为 $\pm 0.05\text{ m}$,波浪周期测量精度为 $\pm 0.1\text{ s}$ 。得到的环境变量数据如表 2 所示。



图 2 水上移动漂浮物

表 1 移动漂浮物的基本变量

名称	变量
长度	200 cm
宽度	100 cm
高度(含天线)	50 cm
材质	高强度轻质复合材料 (防水、耐腐蚀)
重量	50 kg(满载,含电池和载荷)

表 2 环境变量表

时间/ min	风速/ (m/s)	风向/ ($^\circ$)	流速/ (m/s)	流向/ ($^\circ$)	波浪高 度/m	波浪周 期/s
0	2.25	136.71	0.87	278.90	0.31	2.72
10	3.61	165.42	0.73	118.43	0.32	2.22
20	3.94	190.12	0.85	310.21	0.27	2.37
30	4.56	178.90	0.90	145.64	0.45	2.34
40	3.72	182.30	0.82	185.67	0.37	2.28
50	3.29	130.43	0.84	167.39	0.39	2.87
60	1.42	110.38	0.43	135.28	0.18	4.32
70	1.84	190.34	0.73	130.45	0.28	5.66
80	1.12	165.78	0.58	189.32	0.12	6.28
90	3.09	145.37	0.85	205.31	0.26	3.44
100	3.74	270.42	0.81	180.47	0.17	3.75
110	2.53	105.43	0.83	172.24	0.17	3.32
120	3.91	195.37	0.92	145.69	0.12	3.65

以表 2 中变量为依据,进行定位分析。

在表 2 环境变量下,计算风、水流以及波浪的影响合力,如图 3 所示。

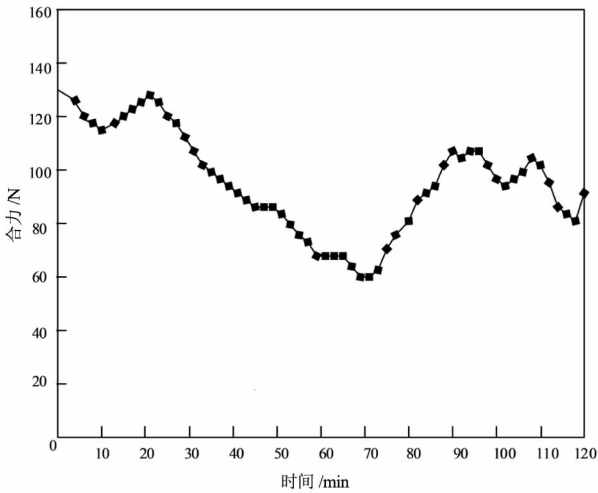


图 3 影响合力变化曲线

图 3 中,在环境变量变化的影响下,合力随着时间呈现为一种复杂的波形,存在两个高峰和一个低谷,说明在模拟时间段内,环境变量的变化对水上移动漂浮物会产生不同程度的影响。

设置时间长度 $T=120\text{ min}$,利用蒙特卡罗算法对水上漂浮物进行状态转移,预测其位置,得到漂浮物移动位置变化曲线,如图 4 所示。

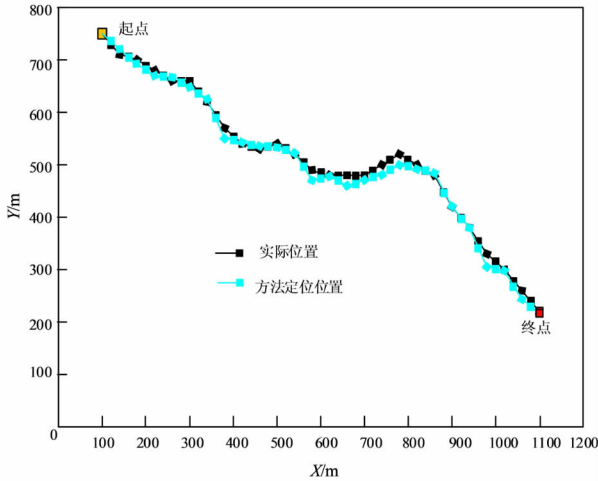


图 4 漂浮物移动位置变化曲线

图 4 中,所研究方法实现了对水上移动漂浮物的定位,且定位曲线与漂浮物实际位置曲线之间的重叠度较高,证明了所研究方法的有效性和准确性。

在相同实验条件下,以当前主流方法,如基于图神经网络的方法和基于深度强化学习的方法,以及传统方法,如基于 YOLOv5-DeepSORT 融合的

方法、基于无锚框的方法为对比方法,利用五种方法进行水上移动漂浮物定位。然后,计算与漂浮物实际位置之间的 5 次累积平均误差并进行对比,如下式所示。

$$\Delta \bar{x}(t) = \frac{\sum_{k=1}^5 [x_k(t) - \tilde{x}_k(t)]}{5} \tag{12}$$

$$\Delta \bar{y}(t) = \frac{\sum_{k=1}^5 [y_k(t) - \tilde{y}_k(t)]}{5} \tag{13}$$

式中, $\Delta \bar{x}(t)$ 、 $\Delta \bar{y}(t)$ 是 x 向、 y 向 5 次累积平均误差; $x_k(t)$ 、 $y_k(t)$ 是 t 时刻第 k 次 x 向、 y 向位置; $\tilde{x}_k(t)$ 、 $\tilde{y}_k(t)$ 是 t 时刻第 k 次 x 向、 y 向实际位置。

对比结果如图 5 所示。

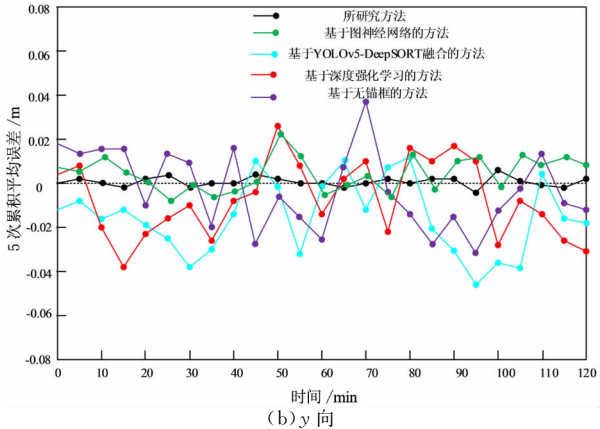
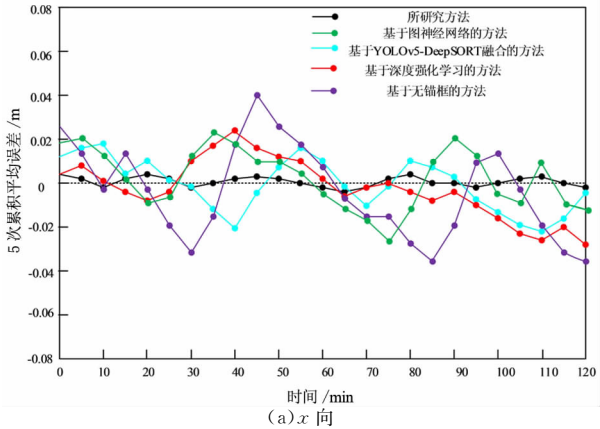


图 5 定位误差对比图

图 5 中,在 x 向的对比中,所研究方法的定位误差明显低于四种对比方法,表明其在 x 方向上的定位精度更高,误差更小。同样地,在 y 向的对比中,所研究方法的定位误差也呈现出相似的优势,即误差值相对较低,进一步验证了该方法在定位精度上的优越性。