

基于相对测量的水下机器人主动定位方法研究

冀大雄¹, 方文巍¹, 朱 华², 李 硕³, 唐元贵³, 田 宇³, 姚 倩⁴

(1. 浙江大学海洋学院海洋电子与智能系统研究所, 浙江舟山 316000; 2. 鹏城实验室, 广东深圳 518057;
3. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110169; 4. 舟山精卫智能科技有限公司, 浙江舟山 316000)

摘 要: 水下机器人的自主快速精确定位是完成海洋资源勘探、目标探测定位与追踪等水下作业任务的前提. 论文研究基于相对测量的水下机器人主动定位方法, 解决存在大的初始定位偏差情况下多水下机器人的快速定位问题. 论文提出包括测量、估计和控制三个模块的多水下机器人快速主动定位框架, 降低相对测量误差、初始偏差带来的定位不确定性, 同时使多机器人定位具有良好的可扩展性. 提出的主动接近信标策略优势在于: 被定位机器人与信标的相对几何位置收敛过程中, 机器人的定位估计快速指数收敛. 利用受噪声干扰的相对测距信息, 论文采用强化学习方法实现提出的主动接近信标机动策略. 开展的数值仿真实验结果表明: 相对于基于圆形轨迹、梳状形轨迹机动策略的定位方法, 论文所提方法使得水下机器人定位过程具有更好的快速性和鲁棒性.

关键词: 自主水下机器人; 主动定位; 运动规划; 初始定位偏差; 目标追踪; 强化学习

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021) 07-1249-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200632

Active Localization of Autonomous Underwater Vehicle Using Noisy Relative Measurement

Ji Da-xiong¹, Fang Wen-wei¹, Zhu Hua², Li Shuo³, Tang Yuan-gui³, Tian Yu³, Yao Qian⁴

(1. The Institute of Marine Electronics and Intelligent Systems, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316000, China;

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518057, China;

3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110169, China;

4. Zhoushan Jingwei Intelligent Technology Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

Abstract: Rapid localization of autonomous underwater vehicles (AUVs) plays an important role in target pursuit tasks. We study active localization method for AUVs using noisy relative measurement, which achieves the precise position estimate of AUVs as quickly as possible under inaccurate initial estimates. A framework for active localization of AUVs with excellent scalability is proposed, which is composed of measurement module, control module and estimation module. In control module we design the motion strategy for AUV, which makes simultaneous convergence of position estimate and the relative geometric location between AUV and beacon. Using noisy relative measurement, a method based on reinforcement learning is adopted to achieve the motion strategy. The numerical simulation results show that the proposed framework and motion strategy has better rapidity and robustness than the traditional localization method.

Key words: autonomous underwater vehicles; active localization; motion plan; unactuated initial estimates; target pursuit; reinforcement learning

1 引言

随着水下机器人朝着小型化、智能化、集群化方向发展, 携带低成本惯性导航系统(INS)和声学多普勒计程仪(DVL)的小型化自主水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)在海洋资源勘探、目标探测定

位与追踪等任务中发挥了重要作用^[1,2]. 而多水下机器人的快速精确定位是完成各项复杂水下作业任务的前提. 大量理论与实验研究^[3-7]表明, 借助于水面定位机器人(无人艇、智能浮标等), 利用相对测距信息实现对AUV位置信息的校准, 消除自身惯导系统带来的累积

误差,是一种行之有效的实现小型化 AUV 长期精确导航定位的方式. 该问题可看作基于单信标(移动或者静止的)的水下机器人定位问题. 现有文献对该问题的研究可概括为两类:

一类为被动定位法. 采用状态估计算法来提高水下机器人自身定位精度. 文献[8]通过单个移动信标测距来定位小型机器鱼, 比较了滚动时域估计(MHE)算法与扩展卡尔曼滤波(EKF)算法的定位效果. 文献[9]考虑了有效声速对测距的影响, 提出用变时间间隔的 EKF 算法来定位, 使得定位效果有显著的增强. 文献[5]研究了基于水面机动无人艇相对测距信息实现水下 AUV 在线实时定位算法, 对粒子滤波、非线性最小二乘法优化、EKF 三种状态估计算法的定位性能进行了定量分析. 文献[10]提出 AUV 利用对移动信标的状态估计信息, 设计非线性模型预测控制器(NMPC), 实现对其跟踪. 当移动信标的状态估计信息存在大初始偏差时, 该控制器的调控性能将受到影响, 甚至失效. 综上, 这类方法对初始状态的估计精度要求较高, 否则状态估计精度将显著下降甚至发散, 而实际应用中初始位置的估计精度难以保证.

另一类为主动定位法. 利用水下机器人的机动轨迹, 再结合滤波算法来提高水下机器人定位精度. 信标与水下机器人之间的时空关系显著地影响着水下机器人定位估计性能^[11,12], 主动定位的理念在于寻找水下机器人与信标之间的相对运动轨迹或者路径, 最大化从传感器处获取定位信息(费希尔信息矩阵常用于衡量这一性能, Fisher Information Matrix), 提高机器人状态信息的可观测性, 进而改善水下机器人定位性能^[13-15]. 文献[16]从提高水下机器人定位稳态误差方面研究了一种基于采样的路径规划算法为水面无人艇生成机动轨迹, 为水下两台执行任务的 AUV 提供定位服务, 降低基于相对距离的定位信息的不确定性. 文献[17]使用一个主动移动信标作为水下机器人的辅助导航定位工具, 使用动态规划和马尔可夫决策过程理论实现移动信标的路径规划, 水下机器人跟随梳状轨迹完成搜索扫描任务过程中实现自定位. 所采用方案利用移动信标或无人艇良好的机动能力, 通常由其主动产生机动轨迹实现水下一台或者两台 AUV 的定位. 然而, 随着水下机器人数量的增加, 移动信标所需的机动时间和计算复杂度快速增大, 这种模式难以支持大规模的机器人定位需求, 对完成水下非合作目标定位、追踪等实时性要求高的任务, 存在天然缺陷.

鉴于存在的问题, 本文提出一种基于相对测量的主动定位方案, 解决存在大的初始定位误差情况下, 多水下机器人的快速定位问题. 贡献主要体现在:(1)提出由被定位机器人主动产生机动轨迹实现定位性能优

化的方法, 使得基于单信标的多机器人定位方法具有快速性、可扩展性的特点;(2)提出了被定位机器人主动接近信标的运动策略, 采用该策略可使 AUV 定位估计快速指数收敛;(3)利用受噪声干扰的相对测距信息, 提出了基于强化学习的 AUV 航向角调整策略, 实现大初始定位误差和相对测量信息受干扰情况下, 接近信标的主动运动.

2 问题描述

基于相对测量的多水下机器人定位系统如图 1, 被定位机器人依次被标记为 AUV-1 至 AUV- n , 搭载声信标换能器的水面定位机器人记为 R_B . 根据水下机器人的动力学特性和定位场景, 对 AUV 定位过程做如下假设:

(1) AUV 航行于固定水平面以完成定位使命, 同时为避免多 AUV 之间的碰撞, 各 AUV 航行于不同的深度, 即 $z_i \neq z_j$, 其中, $i \neq j$;

(2) 各 AUV 与信标之间时钟同步, 信标间隔固定时间 T 向各 AUV 广播自身位置信息及发送水声脉冲信号. 基于水声信号传播时间与平均水声声速(约为 1500m/s), 可得信标与各 AUV 之间的相对距离 $l_i = \sqrt{(x_B - x_i)^2 + (y_B - y_i)^2 + (h_B - h_i)^2}$;

(3) 各 AUV 携带 DVL、罗盘、深度计等传感器, 可实时测得自身速度 v_i 、航向 θ_i 、深度信息 h_i , 且侧向速度极小可忽略不计.

基于以上假设, 水平面内用于描述 AUV- i 运动过程及观测过程的状态方程、观测方程具有如下离散形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i(k+1) &= \begin{pmatrix} x_i(k+1) \\ y_i(k+1) \end{pmatrix} \\ &= f(\mathbf{X}_i(k), \mathbf{u}_i(k)) \\ &= \mathbf{X}_i(k) + v_i(k) \begin{pmatrix} \cos\theta_i(k) \cdot T \\ \sin\theta_i(k) \cdot T \end{pmatrix} + \mathbf{W}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

$$z_i(k) = d_i(k) = \sqrt{(x_B - x_i(k))^2 + (y_B - y_i(k))^2} + V(k) \quad (2)$$

式(1)中, $\mathbf{X}_i(k) = (x_i(k), y_i(k))^T$ 为 k 时刻 AUV- i 在水平面内的位置, $v_i(k)$ 为 AUV- i 的纵向速度, $\theta_i(k)$ 为航向角, T 为时间间隔. $\mathbf{W}(k)$ 是过程噪声序列, 服从白噪声分布, 方差为 \mathbf{Q} . $V(k)$ 是单信标测距的量测噪声序列, 服从白噪声分布, 其方差为 R . 结合式(1)和式(2), 经典的非线性状态估计器 EKF 利用一组不完全观测信息序列 $(d_i(0), \dots, d_i(k))$, 可以递推地获取 AUV- i 位置信息的估计值 $(\hat{x}_i(k), \hat{y}_i(k))^T$.

需要指出:(1)EKF 状态估计算法的收敛性与快速

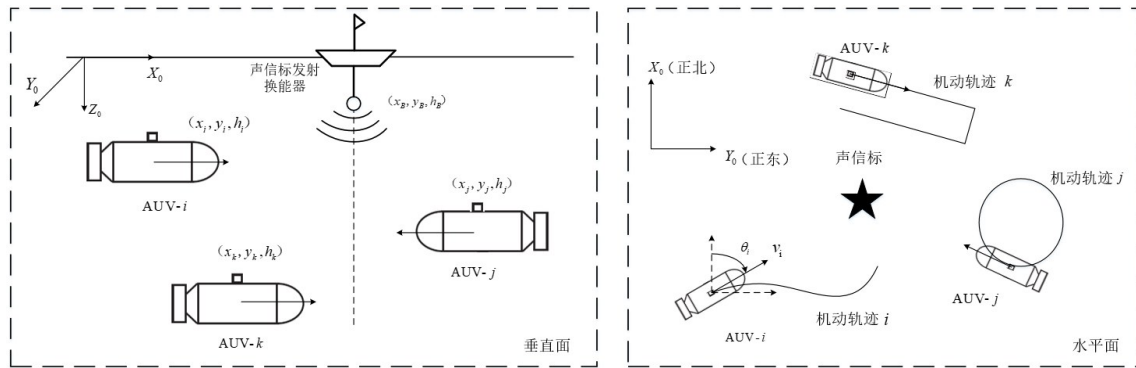


图1 基于单信标的水下多机器人定位示意图

性依赖于状态估计初值相对于真值的偏差^[18]; (2)对于水下机器人控制系统,合理地选择控制量 $u_i(k) = (v_i(k), \theta_i(k))^T$,使机器人机动运动,产生机动轨迹(如图1),有助于改善系统的观测性能,提高机器人定位精度.

多个小型化AUV在水下长时间执行使命任务过程中,其位置信息往往发生大的偏差,利用单信标定位系统实现对AUV位置信息的快速校准,是实现小型化AUV持续执行使命任务的有效方法.因而本论文要解决的问题是:存在大初始定位误差情况下,多水下机器人与信标怎样机动,实现快速定位?

3 提出的方法

从框架、策略和执行三个方面详细描述论文中所提出的解决方案.

3.1 多水下机器人主动定位框架

如引言所述,实现水下多机器人的位置信息校准,移动信标(无人艇或智能浮标)主动产生机动轨迹的方案有诸多不足.各AUV定位的不确定性影响着移动信标机动轨迹的产生,信标的机动进而影响各AUV的定位过程,因而这种方案中,各AUV的定位过程是相互关联的、耦合的,是个有待研究的问题.与移动信标产生机动轨迹实现AUV主动定位不同,本文采取水下AUV自主生成机动轨迹的方式实现快速主动定位(详见图2),各AUV的定位过程是独立的,互不关联的.

主动定位框架包括相对测量、控制、定位三大模块.本文的研究集中于在大初始偏差 $(\hat{x}_i(0), \hat{y}_i(0))^T$ 情况下,采用何种主动定位运动控制策略以及怎样实现该种策略,保证AUV位置估计信息快速收敛.不失一般性,后续研究中不考虑信标运动对AUV定位的影响,取 $(x_B, y_B)^T = (0, 0)^T$.

3.2 主动接近信标的运动策略有效性分析

采用预编程控制的方式,常见的运动策略不依赖

相对测量信息,直接产生圆形或者梳状形机动轨迹(见图1)实现AUV位置信息校准,此方法工程实现便捷.然而AUV位置估计收敛过程缓慢.本文提出主动接近信标的运动策略,即AUV-i跟踪连续机动轨迹:

$$S(x_i(t), y_i(t)) = \left\{ (x_i(t), y_i(t)) \mid \sqrt{x_i^2(t) + y_i^2(t)} < \sqrt{x_i^2(t-1) + y_i^2(t-1)} \right\} \quad (3)$$

根据文献[19,20],对于确定性离散非线性系统:

$$\begin{cases} X_i(k+1) = f(X_i(k)), A_k = \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{X}_i(k/k)) \\ z_i(k) = h(X_i(k)), C_k = \frac{\partial h}{\partial x}(\hat{X}_i(k/k)) \end{cases}$$

若 $\|A_k\| < 1$,则对该系统状态进行估计的EKF为指数观测器,状态估计值 $\hat{X}_i(k/k)$ 快速收敛,且不受初始估计偏差影响.显而易见,满足式(3)的AUV接近信标运动符合条件 $\|A_k\| < 1$,该策略有效性得证.

3.3 主动接近信标机动策略的实现

从控制的角度,研究AUV主动接近信标的运动策略生成方法.如图2所示,控制模块所使用的反馈输入信息可以是相对测量信息 $d_i(k)$ 或者机器人状态估计信息 $(\hat{x}_i(k), \hat{y}_i(k))^T$ (图中虚线箭头所示).由于初始定位过程中,机器人状态估计信息有较大的不确定性,因而本文中利用受噪声干扰的相对测量信息 $d_i(k)$,采用强化学习方法,实现AUV主动接近信标的运动策略.定位过程中,取控制变量 $v_i(k)$ 为常数,即仅调节航向角 $\theta_i(k)$ 实现机动策略.

强化学习^[21,22]是建立在离散有限型完全能观的马尔科夫过程(MDP)基础上的,而获取相对测量信息时,AUV所处的环境是连续的且部分能观的.因而后续将从以下几方面描述航向角调整策略的生成以及实现过程.

3.3.1 AUV状态空间S的表示方法

根据AUV在机动过程中到信标的距离,将特征空间 Φ 划分为AUV左转后(即 $\beta_1 > \beta_2$)距离信标很远、次

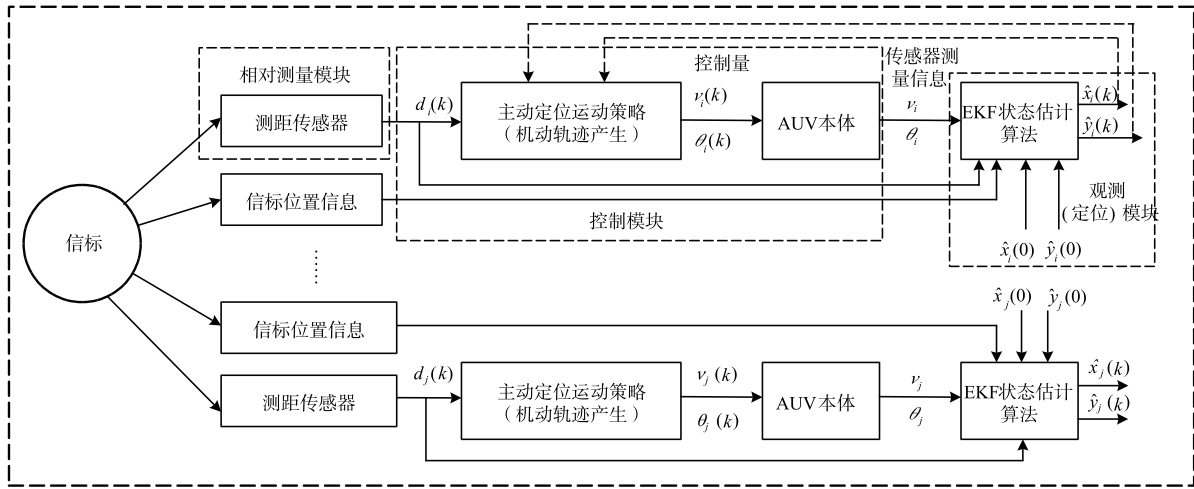


图2 多水下机器人主动定位框架

远、次远、次近、很近和AUV直行或右转后(即 $\beta_1 \leq \beta_2$)距离信标很远、次远、次近、很近,分别对应特征空间 $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ 和 $\Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8$ 。用包含8个离散特征的特征空间 Φ 表示不完备信息条件下AUV所处的状态空间 S 。包含相对测量等信息的环境特征与特征空间 Φ 映射关系如表1。这8个特征空间依次由表1中的8个环境特征公式进行定义。

表1 环境特征与特征空间映射关系

特征空间 Φ	环境特征
Φ_1	$d_i(k+1) > d_i(k) + l_i(k)/2, \beta_1 > \beta_2$
Φ_2	$d_i(k) < d_i(k+1) \leq d_i(k) + l_i(k)/2, \beta_1 > \beta_2$
Φ_3	$d_i(k) - l_i(k)/2 < d_i(k+1) \leq d_i(k), \beta_1 > \beta_2$
Φ_4	$d_i(k+1) \leq d_i(k) - l_i(k)/2, \beta_1 > \beta_2$
Φ_5	$d_i(k+1) > d_i(k) + l_i(k)/2, \beta_1 \leq \beta_2$
Φ_6	$d_i(k) < d_i(k+1) \leq d_i(k) + l_i(k)/2, \beta_1 \leq \beta_2$
Φ_7	$d_i(k) - l_i(k)/2 < d_i(k+1) \leq d_i(k), \beta_1 \leq \beta_2$
Φ_8	$d_i(k+1) \leq d_i(k) - l_i(k)/2, \beta_1 \leq \beta_2$

环境特征由两个三角形表征,如图3(a), $d_i(k-1), d_i(k), d_i(k+1)$ 为机器人在 $t = k-1, k, k+1$ 三个观测时刻获取的相对测量信息, $l_i(k-1), l_i(k)$ 为两个时刻之间机器人的位移,可由机载传感器获取, β_1, β_2 为两三角形对应内角。 $\Delta\theta(k)$ 为 $t = k-1, k$ 时刻机器人航向角偏差。选取两个三角形而不是单个三角形表征环境特征的原因在于:单个三角形信息不能完备地表述AUV所处的状态空间(如图3(b)),存在感知混淆现象,基于该信息AUV不能合理地做出决策。

3.3.2 AUV动作空间A的表示方法

考虑AUV运动能力的限制,AUV所处的状态空间A由16个动作组成,每个动作对应航向角的调整量,相应关系如下:

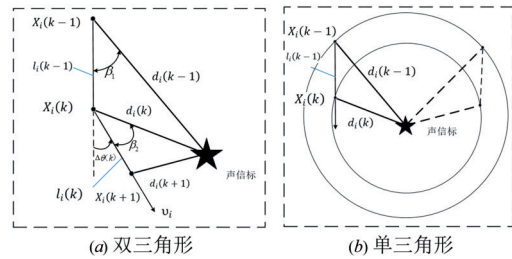


图3 两种方式表征的特征空间

$$A = \{a_i, i = 1, 2, 3, \dots, 16\} = \{-120^\circ, \dots, -15^\circ, 15^\circ, \dots, 120^\circ\}$$

3.3.3 航向角调整策略的学习及实现

该过程目的在于经过足够多次学习后,找到上述状态空间S和动作空间A之间合理的映射关系及对应的回报函数表(见表2,其中 $R(\Phi, a)$ 为 Φ 特征下执行动作action获得奖励值的平均值),使得AUV在实际运动过程中将相对测量等信息归类为 Φ 特征后,智能地从动作空间A选择动作action,使得AUV能以较快速度接近信标,实现3.2提出的机动策略。

表2 回报函数表

$R(\Phi, a)$	a_1	a_2	.....	a_{16}
Φ_1	$R(\Phi_1, a_1)$	$R(\Phi_1, a_2)$	.....	$R(\Phi_1, a_{16})$
Φ_2	$R(\Phi_2, a_1)$	$R(\Phi_2, a_2)$	.....	$R(\Phi_2, a_{16})$
Φ_3	$R(\Phi_3, a_1)$	$R(\Phi_3, a_2)$	.....	$R(\Phi_3, a_{16})$
Φ_4	$R(\Phi_4, a_1)$	$R(\Phi_4, a_2)$	.....	$R(\Phi_4, a_{16})$
Φ_5	$R(\Phi_5, a_1)$	$R(\Phi_5, a_2)$	.....	$R(\Phi_5, a_{16})$
Φ_6	$R(\Phi_6, a_1)$	$R(\Phi_6, a_2)$	.....	$R(\Phi_6, a_{16})$
Φ_7	$R(\Phi_7, a_1)$	$R(\Phi_7, a_2)$	.....	$R(\Phi_7, a_{16})$
Φ_8	$R(\Phi_8, a_1)$	$R(\Phi_8, a_2)$	.....	$R(\Phi_8, a_{16})$

论文采用基于平均奖励值的蒙特卡洛算法进行策略学习(如图4),一次训练过程如下:

(a) $t = k$ 时刻,通过传感器AUV从环境中获得距离 $d_i(k)$ 、位移 $l_i(k-1)$ 和航向角信息 $\theta_i(k)$ 。

(b) 判断当前状态是否满足直行条件:AUV到信标距离 $d_i(k)$ 持续减小,距离 $d_i(k)$ 方向与航向角方向夹角小于 45° ,保持直行. 否则,进入航向角调整环节.

(c) AUV先逆时针旋转 5° (即图3中 $\Delta\theta(k)$,该人为动作在策略训练过程中采用,AUV实际机动过程中不采用该动作),直线航行一个周期获取距离 $d_i(k+1)$ 、位移 $l_i(k)$ 和航向角 $\theta_i(k+1)$. AUV结合三个时刻信息,根据表1归类特征 Φ ,并以 ε -greedy的随机策略从动作空间 A 选择动作 action,即

$$a = \begin{cases} \arg \max_{a \in A} R(\Phi, a), & \text{以 } 1 - \varepsilon \text{ 概率} \\ \text{random}, & \text{以 } \varepsilon \text{ 概率} \end{cases}$$

(d) 执行动作计算即时奖励更新回报函数表计算方法如下:

$$r = \begin{cases} 1, & d_i(k+2) < d_i(k+1) \\ -1, & d_i(k+2) \geq d_i(k+1) \end{cases}$$

$$N(\Phi, a) = N(\Phi, a) + 1$$

$$R(\Phi, a) = \frac{R(\Phi, a)(N(\Phi, a) - 1) + r}{N(\Phi, a)}$$

其中, $N(\Phi, a)$ 表示一次训练中 Φ 特征下执行动作 action 的次数.

(e) 若 AUV 到信标距离小于终止距离 D 或达到最大步数,结束该次训练,否则继续步骤(a).

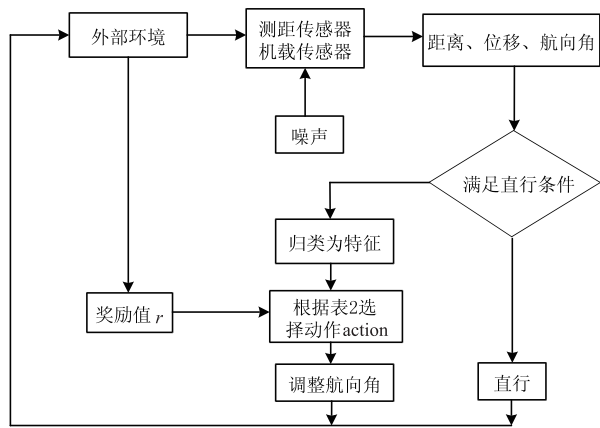


图4 策略学习过程

需要指出的是:

(1) 在接近信标运动策略学习过程中,系统状态方程(1)和测量方程(2)中均加入了方差为 Q 和 R 的高斯白噪声,即声学测距、机载传感器测得航速和航向角信息均有量测误差. 本论文策略学习过程中, $Q =$

$$\begin{bmatrix} 1\text{m}^2\text{s}^{-2} & 0 \\ 0 & 1\text{rad}^2 \end{bmatrix}, R = 1\text{m}^2.$$

(2) 为了扩充训练集的差异性,本文采用逆时针旋转的动作,提高强化学习在不同条件下的策略生成性能. 考虑到训练样本的数量和计算量,转向角度的间隔

选择 5° (即步骤3).

经过多次训练后,保留回报函数表 $R(\Phi, a)$, AUV 实时在线定位过程中(见图2),利用训练好的航向角调整策略,执行主动接近信标的机动策略,实现大的初始定位误差情况下, AUV 定位状态估计的快速收敛.

4 仿真实验

水下机器人在被定位过程中通常采用圆形机动轨迹^[23],梳状形机动轨迹^[24]. 为验证论文所提解决方案的有效性,采用 MATLAB2017a 开展仿真实验,对比分析论文提出方案与常见的圆形、梳状机动策略的优劣性. 开展了 AUV 不同实际初始位置、不同初始估计位置情况下的定位仿真实验. 仿真实验相关情况如下.

实验基本设置 水平面内 AUV 速度 $v = 2\text{m/s}$, 时间间隔 $T = 1\text{s}$. 信标位置 $(0\text{m}, 0\text{m})^T$, AUV 实际初始位置1为 $(400\text{m}, -300\text{m})^T$, AUV 实际初始位置2为 $(800\text{m}, -600\text{m})^T$. 基于 EKF 方法的 AUV 初始位置估计 $1(\hat{x}_i(0), \hat{y}_i(0))^T = (200\text{m}, -100\text{m})^T$, 基于 EKF 方法的 AUV 初始估计位置 $2(\hat{x}_i(0), \hat{y}_i(0))^T = (200\text{m}, -100\text{m})^T$, 相对测量噪声方差 $N=1\text{m}^2$. 航向角调整策略学习过程中,训练次数 500 次, 单次训练最大步数 1000 步, ε -greedy 的随机策略系数 $\varepsilon = 0.1$, 终止距离 $D=2\text{m}$.

实验效果评价标准 以收敛时间和定位精度两个量化指标对不同方法下的 AUV 定位性能进行评价,收敛时间定义为当位置误差较小,且稳定在一定范围时,第一次达到最小值的时间. 定位精度用 DRMS (Distance Root Mean Square) 来衡量.

实验结果分析 进行了主动接近信标机动策略、圆形轨迹机动策略、梳状形轨迹机动策略下 AUV 定位实验, 单次仿真实验结果见图5、图6. 不同机动策略下 AUV 位置估计误差比较结果见图7, 针对定位性能分析进行的统计实验结果见表3.

分析比较仿真结果,可得出以下结论:

(1) 在相同初始定位偏差情况下,与采用圆形轨迹机动策略、梳状形轨迹机动策略相比,采用主动接近信标机动策略的 AUV 定位过程有更快的收敛速度和更好的稳态误差,如图7所示.

(2) 与采用圆形轨迹机动策略、梳状形轨迹机动策略相比, AUV 定位过程中,采用主动接近信标机动策略的 AUV 状态估计收敛速度受初始定位偏差影响小,如表3所示. 当初始估计误差增大时(从初始估计位置1变为初始估计位置2),其 AUV 位置估计收敛时间从 357s 增加到 383s,增幅较小,而采用圆形轨迹机动策略、梳状形轨迹机动策略的定位估计收敛时间,分别从 1000s 增加到 1749s,从 879s 增加到 1618s,有较大幅度

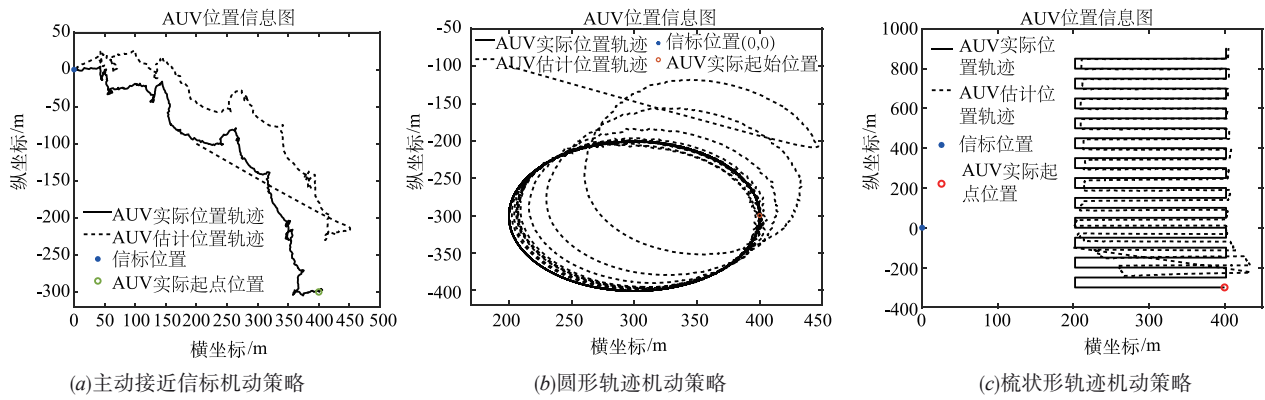


图 5 不同机动策略下 AUV 位置估计

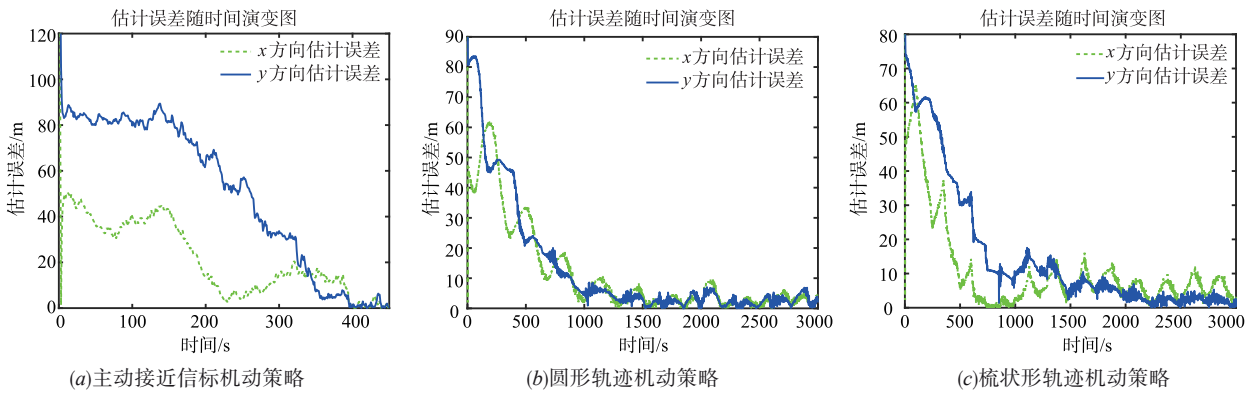


图 6 不同机动策略下 AUV 位置估计误差

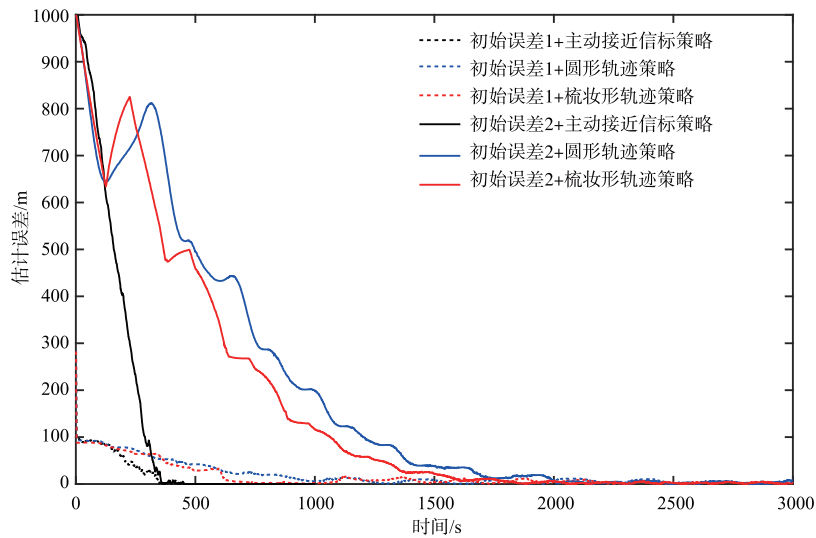


图 7 不同机动策略下 AUV 位置估计误差比较

的增加。

(3) 不论 AUV 实际初始位置与信标远还是近,位置估计误差在 AUV 实际轨迹与估计轨迹都接近信标位置时会迅速收敛,说明收敛速度与 AUV 到达信标位置附近的时间有关,数值仿真结果说明:采用主动接近信标策略仍比圆形、梳状机动策略定位估计收敛速度快。

(4) 由以上三项分析可知,本文提出的主动接近信标的 AUV 定位方案,从收敛速度和受初始偏差影响两个方面分析,都优于现有方案,进一步验证了 3.2 节的理论分析结果;同时仿真实验结果也表明在相对测距信息受噪声干扰的情况下,利用强化学习方法实现 AUV 主动接近信标运动策略的有效性。

表 3 AUV 定位性能分析结果

机动策略	初始位置估计	(200m, - 100m) ^T		(- 400m, 300m) ^T	
	实际初始位置	收敛时间(s)	定位精度(m)	收敛时间(s)	定位精度(m)
主动接近信标	(400m, - 300m) ^T	357	2.73	383	2.79
	(800m, - 600m) ^T	751	2.67	776	2.74
圆形轨迹	(400m, - 300m) ^T	1000	6.36	1749	5.87
	(800m, - 600m) ^T	1845	18.27	2899	45
梳状形轨迹	(400m, - 300m) ^T	879	5.15	1618	5.93
	(800m, - 600m) ^T	1800	19.28	3000	135

5 结论

论文提出了一种基于相对测距信息的主动定位方案,解决存在大的初始定位误差情况下,多水下机器人的快速定位问题.通过被定位机器人主动产生机动轨迹实现定位性能优化,将基于单信标的多 AUV 定位过程转化为相互独立的过程.与现有方案相比,单 AUV 定位过程中采用提出的主动接近信标机动策略,具有更快的收敛速度,同时受初始偏差影响更小.利用受干扰的相对测距信息,基于强化学习方法获取 AUV 运动控制律,实现了主动接近信标机动策略.开展的仿真实验验证了所提定位方案的正确性和可行性.后续计划开展实物实验,验证所提方法在实际中的有效性.

参考文献

- [1] WYNN R B, HUVENNE V A I, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. *Marine Geology*, 2014, 352(1): 451 - 468.
- [2] CHEUNG M Y. Underwater Multi-vehicle Co-operative Target-Tracking [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2019.
- [3] FISCHHELL E M, RYPKEMA N R, SCHMIDT H. Relative autonomy and navigation for command and control of low-cost autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 1800 - 1806.
- [4] VASILJEVIC A, et al. Coordinated navigation of surface and underwater marine robotic vehicles for ocean sampling and environmental monitoring [J]. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(3): 1174 - 1184.
- [5] FALLON M F, et al. Cooperative AUV navigation using a single maneuvering surface craft[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(12): 1461 - 1474.
- [6] QURASHI A, et al. A flexible navigation support system for a team of underwater robots [A]. 2019 International Symposium on Multi-robot and Multi-agent Systems [C]. USA: Rutgers University, 2019. 70 - 75.
- [7] 刘健, 冀大雄. 用固定单信标修正水下机器人导航误差 [J]. *控制与决策*, 2010, 25(9): 1354 - 1358.
- [8] LIU Jian, JI Da-xiong. Navigation error amendment for underwater robot using single beacon [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(9): 1354 - 1358. (in Chinese)
- [9] WANG S, CHEN L, Hu H, et al. Single beacon based localization of AUVs using moving horizon estimation [A]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots Systems* [C]. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 885 - 890.
- [10] ZHU Z, HU S J. Model and algorithm improvement on single beacon underwater tracking [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(4): 1143 - 1160.
- [11] JAIN R P, ALESSANDRETTI A, AGUIAR A P, et al. A nonlinear model predictive control for an AUV to track and estimate a moving target using range measurements [A]. *Third Iberian Robotics Conference* [C]. Germany: Springer, 2017. 161 - 170.
- [12] BISHOP A N, FIDAN B, et al. Optimality analysis of sensor-target localization geometries [J]. *Automatica*, 2010, 46(3): 479 - 492.
- [13] BINGHAM B. Predicting the navigation performance of underwater vehicles [A]. 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. USA: IEEE, 2009. 261 - 266.
- [14] BAJCSY R, ALOIMONOS Y, TSOTSOS J K. Revisiting active perception [J]. *Autonomous Robots*, 2018, 42(2): 177 - 196.
- [15] HOOK J V, TOKEKAR P, ISLER V. Algorithms for cooperative active localization of static targets with mobile bearing sensors under communication constraints [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(4): 864 - 876.
- [16] ENGIN S, ISLER V. Active Localization of Multiple Targets Using Noisy Relative Measurements [DB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2002.09850>.
- [17] WILLNERS J S, TOOHEY L, PETILLOT Y. Sampling-based path planning for cooperative autonomous maritime vehicles to reduce uncertainty in range-only localization [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4

- (4): 3987 – 3994.
- [17] TAN Y T, GAO R, CHITRE M. Cooperative path planning for range-only localization using a single moving beacon[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2): 371 – 385.
- [18] REIF U. The extended Kalman filter as an exponential observer for nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(8): 2324 – 2328.
- [19] 曹俊. 基于单信标测距的水下载体定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [20] JI D, DENG Z, LI S, et al. A novel case of practical exponential observer using extended Kalman filter [J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 58004 – 58011.
- [21] CARLUCHO I, MARIANO D P, WANG S, et al. AUV position tracking control using end-to-end deep reinforcement learning [A]. OCEANS [C]. Charleston: MTS/IEEE, 2018. 1 – 8.
- [22] RICHARD S S, ANDREW G B. Reinforcement Learning: An Introduction [M]. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [23] MASMITJA I, GOMARIZ S, et al. Optimal path shape for range-only underwater target localization using a wave glider[J]. The International Journal of Robotics Research, 2018, 37(12): 1447 – 1462.
- [24] XU C L, XU C H, WU C D, et al. A novel self-adapting filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 1 – 12.

作者简介



冀大雄 男, 1981年生于湖北襄阳. 现为浙江大学海洋学院副教授. 主要研究方向为海洋机器人、机器学习和智能控制.
E-mail: jidaxiong@zju.edu.cn



唐元贵 男, 1980年生于山东德州. 现为中国科学院沈阳自动化研究所研究员、硕士生导师. 主要研究方向为水下机器人技术.
E-mail: tyg@sia.cn



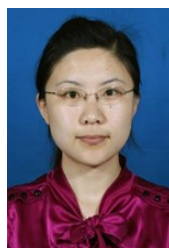
方文巍 男, 1996年生于浙江绍兴. 浙江大学海洋学院硕士研究生. 研究方向为海洋机器人技术、人工智能理论在海洋机器人中的应用.
E-mail: 532141411@qq.com



田宇 男, 1982年生于辽宁鞍山. 现为中国科学院沈阳自动化研究所研究员. 主要研究方向为水下机器人技术.
E-mail: tianyu@sia.cn



朱华(通信作者) 男, 1989年生于江西赣州. 现为鹏城实验室助理研究员. 主要研究方向为多机器人定位、运动控制、行为协调与控制.
E-mail: zhuh@pcl.ac.cn



姚倩 女, 1981年生于辽宁丹东. 现为舟山精卫智能科技有限公司总经理. 主要研究方向为人工智能技术在海洋经济活动中的应用.
E-mail: yaoqian929@sina.com



李硕 男, 1970年生于重庆. 为中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师. 主要研究方向为水下机器人技术.
E-mail: shuoli@sia.cn