

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.02.006

# 一种基于超短基线定位的便携式 AUV 回坞导航方法

裘天佑<sup>1,2,3</sup>, 李一平<sup>1,2\*</sup>

(1.中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室,辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院,辽宁 沈阳 110016; 3.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**自主水下机器人(AUV)对接技术是目前水下机器人的研究热点,精确可靠的 AUV 的回坞导航是实现对接的关键技术。对于追求轻便的便携式 AUV 的对接系统,考虑到便携式 AUV 的搭载能力有限又需要足够的定位精度用于对接,提出了一种基于超短基线(USBL)定位的回坞导航方法,该方法让 AUV 只需装载电子罗盘和水声应答器就能完成精确的回坞定位。根据导航方法的特点,设计了一种改进的扩展卡尔曼滤波算法,其优点是能在处理滞后的 USBL 数据的同时动态估算海流、更新状态方程以消除海流造成的定位误差。通过湖试和大量仿真实验,验证了定位算法在海流影响下的定位性能。

**关键词:**自主水下机器人;AUV 对接;USBL 定位;回坞导航

**中图分类号:**TP242; TN967.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2019)02-0036-07

自主水下机器人(AUV)应用广泛,可自主地执行多种水下任务,包括海洋学调查、排雷、海底或湖底测深数据采集等<sup>[1]</sup>。但是目前的电池技术限制了 AUV 在水下的工作时间,同时水声通信速率较低使得 AUV 难以及时回传收集到的数据。而水下对接技术能很好地解决上述问题,因为 AUV 通过完成对接,能进行充电、数据回放和新使命任务的下载<sup>[2]</sup>。目前水下对接技术已成为水下机器人技术中的一个研究热点。

导航定位是水下对接过程中的关键技术,完成精确的水下对接需要高精度的位置和姿态信息。目前各国科学家针对不同的对接系统,已成功研制出多种回坞导航方法。麻省理工学院利用电磁场引导 Odyssey AUV 进入对接站<sup>[3]</sup>;Stocky, Allen 等<sup>[4]</sup>为 REMUS AUV 研制的对接系统采用的是超短基线(USBL)定位,REMUS 上安装的特制的 4 个水听器提供了非常高的定位精度,近距离的测距精度在几

厘米以内,姿态精度在 1°以内。Lee, Jeon 等<sup>[5]</sup>为 IsiMi AUV 研制的对接系统在最后对接阶段采用的是单目视觉定位方法,通过在对接入口安装多个指示灯,仅利用 1 个摄像头即可计算出对接站的距离和朝向。

常规的 USBL 定位在用于 AUV 精确对接时,会存在姿态解算不足,信号更新慢,定位数据滞后的问题。通过集成声学通信,提高声学处理速度可增强 USBL 定位能力<sup>[6]</sup>。在无法提升 USBL 硬件能力的情况下,常用滤波和组合导航。吴利红等<sup>[7]</sup>采用常规超短基线结合单目视觉的互补方法,结合声源坐标和光源坐标的相对位置,辅助解算光源的空间坐标和 AUV 与对接站的相对姿态。郑翠娥<sup>[8]</sup>在对接站上安装 4 个应答器阵列,4 个应答器同时使用可冗余解算对接站的相对位置和姿态。Ridao P 等<sup>[9]</sup>为解决 USBL 定位延时的问题,利用了即时定位与地图构建(SLAM)里面的轨迹平滑技术,结合多普勒计程仪(DVL)和航姿参考系统(AHRS),使用扩充状态的

收稿日期:2019-01-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0305901);中国科学院战略先导专项(A类)资助项目(XDA13030205)

作者简介:裘天佑(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为自主水下机器人导航与控制。E-mail:qiutianyou@sia.cn

通讯作者:李一平(1963-),女,硕士,研究员,主要研究方向为多水下机器人系统、自主水下机器人控制系统、自主控制方法等。

E-mail:lyp@sia.cn

扩展卡尔曼滤波(EKF)估计最近的运动路径。

然而,追求轻便的 AUV 无法搭载太多的传感器,又需要足够的对接定位精度。基于以上考虑,本文提出的对接导航方法采用 USBL 定位结合运动模型估算的方法计算 AUV 相对于对接站的位置和姿态,滤波算法采用的是改进的 EKF 算法,该算法考虑了 USBL 定位数据滞后和海流的影响,在处理滞后后的 USBL 数据的同时动态估计海流,以获得足够高的定位精度。该方法的优势在于只需要 AUV 上搭载水声通信机、深度计和电子罗盘,适用于便携式 AUV 对接系统。通过湖试和大量的仿真实验,统计了定位算法的性能,验证了导航方法的可行性。

## 1 基于 USBL 的对接导航方法

对接站布置在海底,对接站的入口采用导向罩式设计。采用的 AUV 原型是便携式 AUV “探索 100”<sup>[10]</sup>。对接站上安装有电子罗盘、深度计和 USBL 的收发器(transceiver),AUV 上安装有电子罗盘、深度计和 USBL 的应答器(transponder)。对接站周期性地通过水声通信向 AUV 发送 USBL 定位信息和对接站的姿态和深度信息。

多数基于 USBL 的对接系统是将 USBL 的收发器安装在 AUV 上,比如浙江大学研发的“海豚二号”对接系统<sup>[11]</sup>。考虑到收发器体积较大,本文选择将应答器安装在 AUV 上,以最大程度地减小 AUV 所需体积。但这种方案有一显著缺点:AUV 不能直接获得 USBL 定位数据,这会显著增加 USBL 定位延时时间。为了尽可能减少 AUV 的体积,文中提出的导航方法没有使用 DVL 和惯导设备。

本文将对接回坞过程分为远距离和近距离两个阶段,远距离阶段是 AUV 从进入 USBL 信号覆盖范围到距离对接站 200 m,近距离阶段是 AUV 从距离对接站 200 m 到驶入对接站入口。远距离阶段,AUV 以朝向 USBL 信号的方向接近对接站,这个阶段不需很高的定位精度,仅利用 USBL 的定位数据即可。在进入近距离阶段前,AUV 需航行到与对接站入口同一深度处,并在之后的对接过程中保持定深航行。

在近距离阶段,USBL 的定位精度虽然足够高,但 USBL 定位数据更新时间间隔较长且定位数据有滞后性,不适合直接使用 USBL 数据进行近距离的引导和精准对接,这个阶段导航系统将 USBL 定位

信息与电子罗盘信息和模型估算位置信息相融合,采用一种改进的扩展卡尔曼滤波算法以提高定位的稳定性和实时性。

## 2 近距离回坞定位算法

由于 AUV 的深度和对接站的深度直接由各自的深度计得到,本文只研究水平面的定位方法。由于没用测速设备,为估算 AUV 速度,定位算法利用了载体的水动力模型,根据输入的方向舵角大小估算 AUV 的加速度。定位算法采用了扩展卡尔曼滤波算法进行 USBL 定位数据、电子罗盘数据和模型估计状态的融合。由于存在未知海流的干扰,且 USBL 定位数据的滞后时间较长,常规 EKF 算法难以实现足够的定位精度,文中提出了一种改进的扩展卡尔曼滤波算法,能在处理 USBL 滞后数据的同时动态估算海流,更新状态方程以消除海流造成的定位误差。

### 2.1 系统模型

AUV 在近距离(<200m)的回坞过程中做定深运动,俯仰角约为零,且不做横滚运动,为增加对接成功率,以一不变的低速  $U$  航行。系统的状态变量  $\vec{x}=[x \ y \ \psi \ u \ v \ r]$ ,坐标系定义见图 1,对接站位置为坐标原点, $y$  为北向, $x$  为南向。AUV 离散运动数学模型可用下式表示。

$$\vec{x}_{k+1}=f_k(\vec{x}_k,\delta_k,\vec{n}_k) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{k+1}=x_k+\sin(\psi_k)(u_k\Delta t+\frac{1}{2}\Delta t^2n_{u_k})+ \\ \cos(\psi_k)(v_k\Delta t+\frac{1}{2}\Delta t^2n_{v_k})+n_{x_k}\Delta t \\ y_{k+1}=y_k+\cos(\psi_k)(u_k\Delta t+\frac{1}{2}\Delta t^2n_{u_k})- \\ \sin(\psi_k)(v_k\Delta t+\frac{1}{2}\Delta t^2n_{v_k})+n_{y_k}\Delta t \\ \psi_{k+1}=\psi_k+r_k\Delta t+\frac{1}{2}\Delta t^2n_{r_k} \\ u_{k+1}=u_k+(\dot{u}_k+n_{u_k})\Delta t \\ v_{k+1}=v_k+(\dot{v}_k+n_{v_k})\Delta t \\ r_{k+1}=r_k+(\dot{r}_k+n_{r_k})\Delta t \end{cases}$$

其中, $\vec{n}=[n_x,n_y,n_\psi,n_u,n_v,n_r]^T$ 是高斯的过程噪声,其协方差矩阵  $Q$  由经验估计得到。此模型的特殊之处在于引入了输入量  $\delta$ ,它是 AUV 的方向舵角(舵机可反馈方向舵角,如果是 X 形舵,4 个舵角可映射

得到方向舵角)。由于系统不使用 DVL 和惯导设备,速度 $[u_{k+1} \ v_{k+1} \ r_{k+1}]^T$ 是通过在 U 点对加速度积分算得,加速度 $[\dot{u}_k \ \dot{v}_k \ \dot{r}_k]^T$ 是利用 AUV 的水动力模型并根据输入量  $\delta$  推算得到。

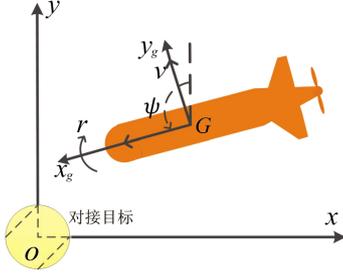


图 1 坐标系定义

Fig.1 Coordinate definition

AUV 受到的水动力可以用下式表示:

$$[X \ Y \ N]^T = g(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \quad (2)$$

式中:  $X, Y, N$  分别表示 AUV 受到水动力在对应动坐标系轴上的分力和分力矩。 $g()$  是简化后近似的水动力模型方程,它是状态量的多元多项式。 $g()$  中的参数通过动力学模型推导和模型参数辨识得到<sup>[2]</sup>。

推力由尾部推进器提供,在近距离回坞阶段推进器转速恒定,推力近似不变。将水动力方程代入 AUV 水平面运动方程,可得 AUV 加速度估算公式:

$$[\dot{u}_k \ \dot{v}_k \ \dot{r}_k]^T = l(u_k, v_k, r_k, \delta_k) \quad (3)$$

将加速度方程  $l()$  代入式(1)即为系统完整的离散水平面运动模型:

$$\vec{x}_{k+1} = f_{C_i}(\vec{x}_k, l(u_k, v_k, r_k, \delta_k), \vec{n}_k) \quad (4)$$

通过水下实验可调整模型的参数,主要是  $g()$  中参数的调整。调整参数的方法如下:令  $\vec{n} = 0$ , 模型的输入序列与实航中方向舵角变化相同,调整水动力参数使得在不同的输入序列下,模型的状态量与实航状态量的偏差都尽可能地小。

## 2.2 滤波算法设计

用滤波算法将推算的状态与对接传感器数据融合,可消减测量噪声。模型是非线性的,常用的非线性滤波算法有扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波和粒子滤波。由于 AUV 在近距离对接引导过程中不需要快速变化速度和角速度,所以系统的非线性并不严重,而且计算该系统的雅可比矩阵并不难,所以文中采用的是扩展卡尔曼滤波算法。

在采用此定位算法前,AUV 采用纯方位跟踪算法向对接站匀速直线前进,即  $\hat{u}_0 = U, \hat{v}_0 = 0, \hat{r}_0 = 0$ , 此时

测得的航向角即为初始航向角估计值,收到的超短基线的定位数据为初始位置估计值。

对式(1)计算偏微分矩阵可得雅可比矩阵:

$$F_k = \frac{\partial f_k}{\partial \vec{x}_k} \Big|_{\vec{x}_k} \quad (5)$$

$$N_k = \frac{\partial f_k}{\partial \vec{n}_k} \Big|_{\vec{n}_k} \quad (6)$$

AUV 上的电子罗盘可测得 AUV 的航向角  $\psi_c$ , 对接站上 USBL 测得的 AUV 在 USBL 坐标系下的坐标数据  $[x_U \ y_U \ z_U]^T$  和电子罗盘测得的对接站的姿态角  $\psi_D, \theta_D, \varphi_D$ , 通过水声通信发送给 AUV, 经过下式计算可得到 AUV 在静坐标系中的坐标的测量值  $x_{D_i}, y_{D_i}$ :

$$\begin{bmatrix} x_{D_i} \\ y_{D_i} \end{bmatrix} = R_U^D \begin{bmatrix} x_U \\ y_U \\ z_U \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_U^D = \begin{bmatrix} c\psi_D c\theta_D & c\psi_D s\theta_D s\varphi_D - s\psi_D c\varphi_D & c\psi_D s\theta_D c\varphi_D + s\psi_D s\varphi_D \\ s\psi_D c\theta_D & s\psi_D s\theta_D s\varphi_D + c\psi_D c\varphi_D & s\psi_D s\theta_D c\varphi_D - c\psi_D s\varphi_D \end{bmatrix}$$

易得系统的测量方程如式(8)所示:

$$\vec{y}_k = \begin{bmatrix} x_{D_i} \\ y_{D_i} \\ \psi_{c_i} \end{bmatrix} = H \vec{x}_k + \vec{s}_k$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \vec{x}_k + \begin{bmatrix} s_{x_k} \\ s_{y_k} \\ s_{\psi_k} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\vec{s}_k$  为测量高斯噪声,其协方差矩阵  $R$  通过实验得到。USBL 数据获取的时间间隔较长且不固定,在无 USBL 数据时  $H(1,1)=H(2,2)=0$ 。

根据标准的 EKF 算法,  $t=k\Delta t$  时的估计误差协方差矩阵和卡尔曼增益矩阵计算公式如下:

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + L_k Q L_k^T \quad (9)$$

$$K = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (10)$$

利用模型进行状态估计,再利用电子罗盘数据和 USBL 数据进行状态估计的量测更新即可得到滤波后的位置信息。

由于 USBL 存在通信延迟和定位延迟,AUV 收到的 USBL 定位信息不是实时的。此外,模型估算得到的速度是 AUV 相对于海流的速度,不考虑海流的影响会使模型估算误差较大,从而影响定位精度。为提升算法的定位精度和实时性,本文对常规

的 EKF 算法进行了改进。

### 2.3 改进的 EKF 算法

利用 USBL 定位时,测量的有效时间和可用测量时间之间存在固有的延迟。这对导航状态估计器提出了一个有趣的挑战:如何有效地融合延迟的测量数据和当前的状态估计<sup>[13]</sup>。AUV 收到对接站发来的位置数据实际反映的是一段之前 AUV 的位置,如图 2 所示。

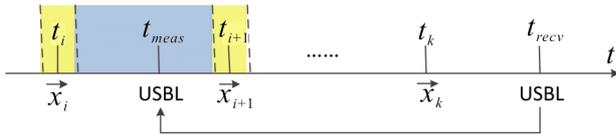


图 2 USBL 定位数据时间线

Fig.2 USBL positioning data timeline

此外,在 AUV 没有收到 USBL 数据的时间段,定位系统中只能利用电子罗盘进行量测更新,若不考虑海流的影响,就会产生较大的误差,如图 3 所示,图中  $V_c$  表示海流。

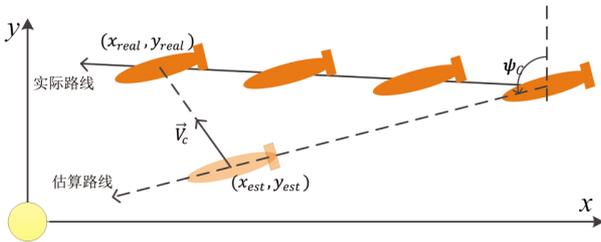


图 3 在海流影响下载体的轨迹

Fig.3 The trajectory of the vehicle in the current

本文提出的解决方法如下:

首先在进行 USBL 定位之前,对接站和 AUV 上的声通设备需完成时间同步。USBL 进行声学定位时,记录测量时间  $t_{meas}$ ,完成定位时将测量时间与位置数据打包在一起发送给 AUV,AUV 在  $t_{recv}$  时收到这个数据包,即可知道该定位数据滞后的时间长度。

用一个先入先出的缓存区保存 AUV 之前的状态信息,长度为  $N$ ,满足  $N \times \Delta t > \max(t_{delayed})$ ,  $\max(t_{delayed})$  是实验中测得的最大 USBL 数据滞后时间。缓存区每个节点包含时间、AUV 状态  $\vec{x}$ ,测量数据和输入数据以及用于滤波的雅可比矩阵和估计误差协方差矩阵。当没收到 USBL 数据时,每 0.5 s 利用电子罗盘的航向角数据和方向舵角数据进行 EKF 滤波,向缓存区加入最新的定位数据并删除最老的数据。

当 AUV 收到 USBL 定位信息时,若定位数据的测量时间位于图 2 中黄色区域,即  $|t_{meas} - t_{i+1}| < \Delta t / 10$  时,在  $t_{i+1}$  节点上利用 USBL 的数据,重新进行量测

更新,得到  $t_{i+1}$  时新的状态估计。

若 USBL 数据测量时间位于图 2 中蓝色区域,则在  $t_i$  节点与  $t_{i+1}$  节点插入新节点  $t_{meas}$  点。利用缓存队列中  $t_i$  节点的数据,进行滤波算法得到  $t_{meas}$  时的定位数据,此时由于无航向角数据,  $H(3,5)=0$ ,且时间间隔为  $t_{meas} - t_i$ 。

在  $t_{recv}$  时 AUV 收到 USBL 测得的在  $t_{meas}$  时刻的位置,与估算的  $t_{meas}$  时刻位置会有一定的偏差,这个偏差的主要来源是海流的作用。对这个偏差进行滤波可估算海流大小。第  $n$  次获得 USBL 定位数据时,海流流速  $V_{c_n}$  通过式(11)估算得到:

$$V_{c_n} = \begin{bmatrix} u_{c_n} \\ v_{c_n} \end{bmatrix} = \alpha_0 V_{c_{n-m}} + \dots + \alpha_{m-1} V_{c_{n-1}} + \alpha_m \left( V_{c_{n-1}} + K_C \frac{\begin{bmatrix} x_{U_n} & y_{U_n} \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \hat{x}_{t_n} & \hat{y}_{t_n} \end{bmatrix}^T}{t_n - t_{n-1}} \right) \quad (11)$$

$$(\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_m = 1; \alpha_i > 0, i=0, \dots, m)$$

式中:  $K_C$  为  $t_{meas}$  时刻卡尔曼增益矩阵关于  $x, y$  的子矩阵。  $\alpha = [\alpha_0, \dots, \alpha_m]$  为滤波系数,  $m$  越大估算越精确,  $\alpha_m$  越大  $V_{c_n}$  跟随海流变化的速度越快。初始的海流估计值为 0。

估算得到  $t_{meas}$  时刻的海流后,将海流造成的位置漂移添加到原状态方程  $\hat{f}_k$  中去:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = x_k + (\sin(\psi_k)u_k + \cos(\psi_k)v_k + u_c)\Delta t \\ \hat{y}_{k+1} = y_k + (\cos(\psi_k)u_k - \sin(\psi_k)v_k + v_c)\Delta t \end{cases} \quad (12)$$

每获得一次 USBL 定位数据就估算一次海流,并更新状态方程,并在后续的滤波中使用该状态方程,直到下一次获得 USBL 数据。

本文的海流估计方法与 Teo 等<sup>[14]</sup>采用的海流估计方法类似,都利用了估算位置与 USBL 定位的偏差,不同的是本文的方法是对这个偏差进行滤波,并在对接过程中会一直对海流估计进行更新,以防止对接过程中海流发生明显变化。

完成  $t_{meas}$  时刻的量测更新并更新状态方程后,继续更新缓冲区下一节点的定位数据,直到完成最近时间点的状态估计更新。由于 EKF 算法计算量较小,所以在短时间内完成多次 EKF 算法是可行的。

## 3 实验与仿真

为验证文中提出的定位算法的性能,利用便携式 AUV 在棋盘山水库进行了航行实验,完成了系

统模型参数的调整。利用实验数据和模型,对定位算法进行了大量的离线仿真实验。

### 3.1 运动模型的湖试验证

便携式 AUV 上搭载了 DVL 和 GPS, 在短距离航行中, 可将航位推算得到的位置看作是实际位置。以实际方向舵角作为系统水平面运动模型的输入量, 初始状态已知, 可推算状态量的变化。采用 2.1 节提出的参数调整方法, 利用多次实航的数据调整水动力参数, 使系统模型尽可能精确。图 4 是完成参数调整后, 一次实航的轨迹和估算轨迹的对比。模型估算得到的速度和航向角见图 5。

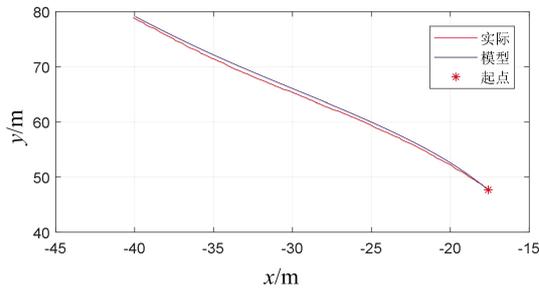


图 4 实际轨迹与估算轨迹

Fig.4 Actual trajectory and estimated trajectory

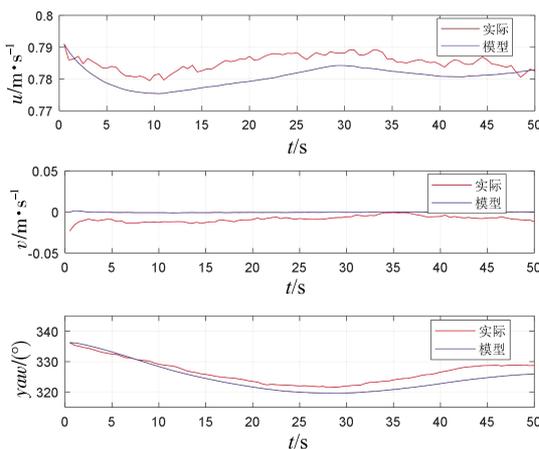


图 5 实际状态与估计状态

Fig.5 Actual state and estimated state

可以看出,短时间内模型估计出的位置误差较小,估计出的速度角度等状态虽然有一定误差(存在噪声和水流,无法避免),但变化趋势与实际状态一致。说明此水平面运动模型较为精确。准确的状态方程可使 EKF 算法更加精确。

### 3.2 定位算法的仿真验证

在上述模型的基础上加入过程噪声和水流的影响,可模拟真实环境中 AUV 的航行情况。AUV 绕着对接站以一固定的方向舵角做近似圆周运动,利用本文提出的定位算法进行定位,计算与模型中实

际位置的偏差以分析算法的定位性能。仿真中的状态量  $x, y, \psi$  加上合理的测量噪声当作传感器测得的数据。设定对接站发送 USBL 定位数据的时间间隔为 5 s, USBL 数据滞后的时间与 AUV 与对接站的距离呈线性关系, USBL 的测距精度已知。电子罗盘的测量噪声和 USBL 的定位协方差矩阵已通过实验得到。

首先让 AUV 在距离对接站 40 m 处绕着对接站航行 300 s, 期间海流方向发生变化, 观察定位算法在海流变化时的定位性能。海流的大小为  $V_c=0.5$  m/s, AUV 的速度为 0.8 m/s, 从 120 s 到 130 s, 海流方向变化了 90°。图 6 是使用未改进的 EKF 定位算法得到的定位误差曲线, 图 7 是改进的 EKF 算法的定位误差曲线。

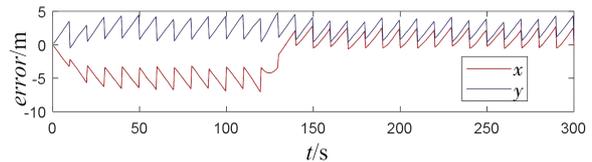


图 6 常规 EKF 定位误差曲线

Fig.6 Regular EKF positioning error curve

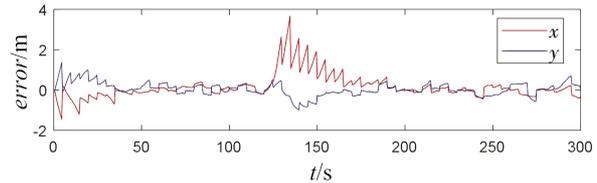


图 7 改进 EKF 定位误差曲线

Fig.7 Modified EKF positioning error curve

可以看出,若使用常规的 EKF 算法,定位误差会很大,而改进的 EKF 算法的定位误差相对就小很多。在定位开始和海流突然变化时,由于估算海流与实际海流偏差较大,所以定位误差较大,但随后误差能快速下降并趋于一个较小的范围之内。

为统计定位算法的整体定性能,在仿真实验中让 AUV 在不同的距离做近似圆周运动 6 000 s, 期间海流不变,计算定位误差的均值和方差,具体数值见表 1。

表 1 定位算法仿真误差

Tab.1 Simulation error of the positioning algorithm				
距离/m	200	100	40	12
算法定位误差均值 /m	0.353 0	0.285 0	0.101 1	0.060 3
算法定位误差方差 /m <sup>2</sup>	0.028 6	0.021 5	0.004 5	0.003 2
USBL 定位误差方差 /m <sup>2</sup>	0.231 1	0.114 9	0.004 6	0.000 045

定位算法的精度主要取决于 USBL 的定位精度和 AUV 与对接站的距离,距离越近,算法的定位误差越小。当 AUV 距离对接站 40~200 m 时,文中提出的算法能一定程度地去除 USBL 的测量噪声,使定位误差的方差减小,同时定位误差也能保持在一个较小的范围内。当 AUV 距离对接站非常近(<30 m)时,定位平均误差可小于 10 cm。

通过仿真实验,证明了本文的定位算法在只使用电子罗盘和 USBL 的情况下,理论上能为对回坞引导提供足够的定位精度。

本算法的定位性能在实际应用中非常依赖 USBL 的定位精度,而 USBL 定位受环境的影响很大,要达到仿真结果的定位性能,需实地完成 USBL 设备的校准和调试。

由于在进行湖试时,对接装置还没研制完成,所以没能进行完整的对接实验,计划在下次的湖试

中使用本文的导航方法进行对接实验。

## 4 结 论

本文提出了一种用于便携式 AUV 自主回坞的导航方法,该方法包括一种基于 USBL 定位的 EKF 定位算法,定位算法可以进行海流估算并解决 USBL 数据滞后的问题。该定位算法的优势是只需要 AUV 上搭载电子罗盘和水声换能器,就能在有未知海流的干扰下获得足够的定位精度。为验证本文提出的算法,进行了湖试,验证了 AUV 系统模型的精确性,同时完成了大量的仿真实验,统计了定位性能,证明了算法理论上的定位精度足够高,可满足精确对接要求。未来计划在湖试和海试中进行对接实验,以证明导航方法的实用性。

### 参考文献:

- [1] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: A review [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [2] 燕奎臣, 吴利红. AUV 水下对接关键技术研究[J]. 机器人, 2007, 29(3):267-273.  
Yan K C, Wu L H. A survey on the key technologies for underwater AUV docking[J]. Robot, 2007, 29(3):267-273.
- [3] Feezor M D, Sorrell F Y, Blankinship P R, et al. Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance[J]. Oceanic Engineering IEEE Journal of, 2001, 26(4):515-521.
- [4] Allen, Austin, Forrester, et al. Autonomous docking demonstrations with enhanced REMUS technology[C]// Oceans, IEEE, 2006.
- [5] Lee P M, Jeon B H, Kim S M. Visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle with one camera[C]// Oceans, IEEE, 2004.
- [6] Freitag L. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms [J]. OCEANS, 2005: 1086-1092.
- [7] 吴利红, 许文海, 王利鹏. AUV 水下终端对接目标识别与定位技术研究[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(2):81-85.  
Wu L H, Xu H M, Wang L P. Dock position and pose estimation algorithm for AUV underwater terminal docking [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(2):81-85.
- [8] 郑翠娥. 超短基线定位技术在水下潜器对接中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008.  
Zheng C E. Application of USBL positioning technology on underwater submersible interfacing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [9] Ridao P, Ribas D, Emili Hern á ndez, et al. USBL/DVL navigation through delayed position fixes [C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2011.
- [10] 曾俊宝, 李硕, 李一平, 等. 便携式自主水下机器人控制系统研究与应用[J]. 机器人, 2016, 38(1):91-97.  
Zeng J B, Li S, Li Y P, et al. Research and application of the control system for a portable autonomous underwater vehicle [J]. Robot, 2016, 38(1):91-97.
- [11] Li D J, Chen Y H, Shi J G, et al. Autonomous underwater vehicle docking system for cabled ocean observatory network [J]. Ocean Engineering, 2015, 109:127-134.
- [12] 曾俊宝, 李硕, 刘鑫宇, 等. 便携式自主水下机器人动力学建模方法研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 32(06):153-156.  
Zeng J B, Li S, Liu X Y, et al. Research on dynamic modeling of portable autonomous underwater vehicle [J]. Application Research of Computers, 2018, 32(06):153-156.

- [13] Stanway M J. Delayed-state sigma point Kalman filters for underwater navigation [C]// IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), IEEE, 2010.
- [14] Teo K , An E , Beaujean P J . A robust fuzzy autonomous underwater vehicle (AUV) docking approach for unknown current disturbances[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(2):143–155.

## A USBL-Based Navigation Method for Portable AUV Homing

QIU Tian-you<sup>1,2,3</sup>, LI Yi-ping<sup>1,2</sup>

1. *State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning Province, China;*
2. *Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning Province, China;*
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract:** The autonomous underwater vehicle (AUV) docking technology is currently the research hotspot in the field of underwater vehicles. The accurate and reliable AUV homing guidance is the key technology for docking. For the docking system of portable AUV, considering the limit space of portable AUV and the requirement for high-precision location, this paper presents a USBL-based navigation method for portable AUV homing, which allows AUV to need compass and transponder only to achieve accurate location. According to the feature of this navigation method, an improved extended Kalman filter algorithm is designed. The advantage is that it can handle delayed USBL data while dynamically estimating the current and updating state equation to eliminate the positioning error caused by the current. Through the lake trial and a large number of simulation experiments, the positioning performance of the localization algorithm is verified under the influence of currents.

**Key words:** Autonomous Underwater Vehicle (AUV); AUV docking; USBL; homing navigation