

文章编号: 1001-0920(2011)11-1632-05

洋流影响下基于运动矢径的 AUV 协同定位方法

刘明雍, 张加全, 张立川

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对水下自主航行器(AUV)协同定位受水下未知定常洋流影响的问题, 给出一种洋流影响下基于运动矢径的 AUV 协同定位方法. 利用 AUV 的运动学方程和基于运动矢径的量测方程, 建立 AUV 的导航模型; 通过扩展的卡尔曼滤波, 设计了协同定位滤波算法; 利用该算法对洋流速度进行估计, 以补偿 AUV 定位误差. 仿真结果表明, 该算法能有效估计未知定常洋流速度的大小, 并对 AUV 定位误差进行实时补偿, 显著提高了 AUV 的定位精度.

关键词: 洋流; 水下自主航行器; 运动矢径; 协同定位; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

AUV Cooperative localization method based on motion radius vector in the presence of unknown currents

LIU Ming-yong, ZHANG Jia-quan, ZHANG Li-chuan

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: LIU Ming-yong, E-mail: liumingyong@nwpu.edu.cn)

Abstract: In view of the influence of underwater unknown constant currents in autonomous underwater vehicle(AUV) cooperative localization, an AUV cooperative localization method based on motion radius vector in the presence of currents is presented. The model of the system is established by using the AUV kinematic equation and the motion radius vector measurement equation. A cooperative localization filtering algorithm is designed by using extended Kalman filtering(EKF), which is used to estimate the currents speed and compensate the AUV position error. The simulation result shows that the unknown currents speed can be estimated and the localization accuracy is improved effectively.

Key words: current; autonomous underwater vehicle; motion radius vector; cooperative localization; extended Kalman filter

1 引言

AUV 导航定位方法一直是相关领域学者研究的热点问题之一, 它不仅受 AUV 自身体积和导航设备的限制, 而且水下环境的特殊性也给 AUV 导航定位带来诸多的制约瓶颈, 例如水下未知洋流、水声通讯受限等. 目前水下导航定位方法主要有惯性导航和水声导航: 惯性导航短航程时定位精度高, 但长航程会出现累积误差, 使定位精度降低; 水声导航精度较高, 主要有长基线(LBL), 短基线(SBL)和超短基线(USBL)方法, 但水声导航方法需在载体上安装多个水听器, 在水底布放基阵, 技术操作较为复杂^[1].

为降低水声导航工程实施难度, 研究者提出了基于固定单信标导航的定位方法, 如 Larsen^[2]提出的虚拟长基线(SLBL)方法; Lee 团队^[3-4]利用固定单信标

测距和 IMU/DVL 组合的方法设计了 AUV 导航系统, 并取得了很好的定位效果, 但这些研究都未考虑洋流对 AUV 定位影响的情况. 针对该问题, Gadre 等人^[5-8]引入洋流影响, 建立了 AUV 的运动学方程和距离量测方程, 并对该导航系统的可观测性和洋流估计进行了深入研究. Baccou 等人^[9-10]提出结合 AUV 自身的机动来解决单信标测距求解条件不充分的问题, 并对未知定常洋流进行了估计. 为摆脱信标固定的限制, Vaganay 等人^[11]提出了移动长基线(MLBL)的导航方案, 通过多个移动的 AUV 作为领航者(主 AUV)对跟随的 AUV(从 AUV)进行协同导航定位, 并应用于 CADRE^[11]系统. Anibal 等人^[12]对双领航者协同定位方法进行了仿真研究, 采用多个领航者配置时, 跟随 AUV 需与多个领航者通讯, 对通讯的同步、识别以及

收稿日期: 2010-06-21; 修回日期: 2011-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979093, 51179156, 51109179); 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-06-0877).

作者简介: 刘明雍(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 从事水下航行器导航与控制的研究; 张加全(1985—), 男, 硕士生, 从事水下航行器协同导航与控制的研究.

时序要求较高,在复杂水声环境条件下会导致“通讯混乱”。

为进一步简化系统,同时提高 AUV 导航定位的灵活性,研究人员尝试采用单移动领航者。比如麻省理工学院的 Bahr 等人^[13-14]提出了一种基于 Kullback-Leibler 距离的 AUV 协同导航定位方法,并进行了大量试验;德国的 Engel 等人^[15]引入航位推算信息,给出了一种基于三边测量技术的 EKF 协同导航定位方法,并分析了系统的可观测性问题,Zhang 等人^[16-18]对基于 EKF 的协同导航方法进行了研究。但是,以上研究都未考虑洋流影响的情况。

在测距和通讯技术方面,Woods Hole 海洋研究院的 Freitag 等人^[19]和 Singh 等人^[20]提出一种 OWTT 测距技术,克服了传统 TWTT 方式中通讯率与 AUV 数量成反比的瓶颈,解决了单距导航中的测距与通讯问题,为基于单领航者的协同定位方法提供了更可靠的技术支持。

本文针对基于单移动领航者仅依靠距离量测的 AUV 协同定位方法,并考虑水下未知定常洋流的影响,在文献[15-17]的基础上给出了一种基于运动矢径的主从式 AUV 协同定位方法。利用 EKF 设计 AUV 协同定位滤波算法,利用该算法估计未知定常洋流速度,补偿 AUV 定位误差。仿真结果表明,该算法能有效估计未知定常洋流速度,并对 AUV 定位误差进行实时补偿,与单纯采用航位推算方法定位相比,明显提高了 AUV 的定位精度。

2 基于运动矢径的协同定位模型

基于运动矢径的主从式 AUVs 协同定位原理如图 1 所示,其中 AUV_master 和 AUV_slaver 分别为主、从 AUV。主 AUV 为单领航者,装备高精度的导航设备;从 AUV 为跟随者,装备低精度的航位推算系统。主、从 AUV 间利用水声 Modem 进行 OWTT 测距和通讯。

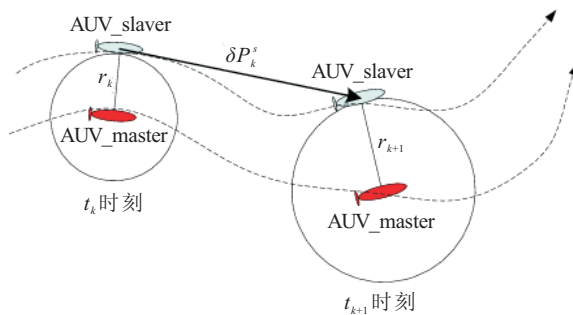


图 1 基于运动矢径的 AUV 协同定位示意图

定义领航者 AUV_master 在 t_k 和 t_{k+1} 时刻的位置分别为 (x_k^M, y_k^M, z_k^M) 和 $(x_{k+1}^M, y_{k+1}^M, z_{k+1}^M)$, 跟随者 AUV_slaver 在 t_k 时刻的位置为 (x_k^S, y_k^S, z_k^S) , 在 t_k 和 t_{k+1} 时刻主、从 AUV 间的距离分别为 r_k 和 r_{k+1} 。图 1

中,连接 t_k 和 t_{k+1} 时刻,从 AUV 的曲线是从 AUV 的运动轨迹,表示其运动轨迹大小和方向的直线称为“运动矢径”,即图 1 中的 $\delta P_k^S = (\delta x_k^S, \delta y_k^S, \delta z_k^S)$, 其值由从 AUV 自身传感器通过航位推算方法得到,具体如下:

$$\begin{cases} \delta x_k^S = \sum_{i=k}^{N+k} \frac{\delta t}{N} V_i^S \cos \theta_i^S, \\ \delta y_k^S = \sum_{i=k}^{N+k} \frac{\delta t}{N} V_i^S \sin \theta_i^S. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $N = \delta t / \Delta t$; δt 为协同定位的更新时间,即 t_k 和 t_{k+1} 时刻的时间间隔; Δt 为航位推算的时间间隔; V_i^S 为从 AUV 在 t_i 时刻前向速度; θ_i^S 为从 AUV 在 t_i 时刻的偏航角。

由于 AUV 的深度信息可由深度传感器获得,简化起见,在讨论中将模型投影到二维水平面进行分析,其中从 AUV 的运动学方程如下:

$$\begin{cases} x_{k+1}^S = x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k, \\ y_{k+1}^S = y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k, \\ U x_{k+1} = U x_k, \\ U y_{k+1} = U y_k. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $U x_k$ 和 $U y_k$ 为 t_k 时刻的未知定常洋流水平方向速度。定义

$$X_{k+1}^S = [x_{k+1}^S, y_{k+1}^S, U x_{k+1}, U y_{k+1}]^T$$

为 t_{k+1} 时刻的状态量。

为全面考虑各项状态量对系统造成的影响,提高滤波的可靠性,定义

$$\omega_k = [x_k^S, y_k^S, \delta x_k^S, \delta y_k^S, U x_k, U y_k]^T$$

为状态方程含噪声的项,并假设噪声为相互独立的高斯白噪声。 $\hat{\omega}_k = [\hat{x}_k^S, \hat{y}_k^S, \hat{\delta x}_k^S, \hat{\delta y}_k^S, \hat{U} x_k, \hat{U} y_k]^T$ 为 ω_k 的估计值, $Q_k^S = E[\omega_k - \hat{\omega}_k][\omega_k - \hat{\omega}_k]^T$ 为假定已知的系统噪声方差阵。

t_k 和 t_{k+1} 时刻从 AUV 通过航位推算方法求取运动矢径,并利用 OWTT 测距和水声通讯分别获取主、从 AUV 间的距离信息 (r_k, r_{k+1}) 和主 AUV 的坐标位置信息 $((x_k^M, y_k^M, z_k^M), (x_{k+1}^M, y_{k+1}^M, z_{k+1}^M))$ 。由以上信息可得主、从 AUV 的坐标位置关系为

$$\begin{cases} r_k^2 = (x_k^S - x_k^M)^2 + (y_k^S - y_k^M)^2, \\ r_{k+1}^2 = (x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M)^2 + (y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M)^2. \end{cases} \quad (3)$$

其中: 定义 $Z_{k+1}^S = [r_k^2, r_{k+1}^2]^T$ 为 t_{k+1} 时刻的量测量, 定义 $\nu_k = [x_k^S, y_k^S, x_k^M, y_k^M, x_{k+1}^M, y_{k+1}^M, \delta x_k^S, \delta y_k^S, U x_k, U y_k]^T$ 为量测方程含噪声的项, $\hat{\nu}_k = [\hat{x}_k^S, \hat{y}_k^S, \hat{x}_k^M, \hat{y}_k^M, \hat{x}_{k+1}^M, \hat{y}_{k+1}^M, \hat{\delta x}_k^S, \hat{\delta y}_k^S, \hat{U} x_k, \hat{U} y_k]^T$ 为 ν_k 的估计值, $R_k^S = E[\nu_k - \hat{\nu}_k][\nu_k - \hat{\nu}_k]^T$ 为假定已知的系统量测噪声方差阵。

3 基于 EKF 的协同定位滤波算法

考虑到系统状态方程和量测方程的非线性, 采用 EKF 进行协同定位算法设计. 系统状态方程和量测方程简写如下:

$$\begin{cases} X_{k+1}^S = f(X_k^S, \omega_k), \\ Z_{k+1}^S = h(X_k^S, \nu_k). \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)定义状态转移矩阵、量测矩阵、系统噪声驱动矩阵和量测噪声驱动矩阵分别如下:

$$F_{k+1,k} = \left. \frac{\partial f(X_k^S, \omega_k)}{\partial X_k^S} \right|_{X_k^S = \hat{X}_k^S, \omega_k = \hat{\omega}_k}, \quad (5)$$

$$W_{k+1,k} = \left. \frac{\partial f(X_k^S, \omega_k)}{\partial \omega_k^S} \right|_{X_k^S = \hat{X}_k^S, \omega_k = \hat{\omega}_k}, \quad (6)$$

$$H_{k+1,k} = \left. \frac{\partial h(X_k^S, \nu_k)}{\partial X_k^S} \right|_{X_k^S = X_{k+1|k}^S, \nu_k = \hat{\nu}_k}, \quad (7)$$

$$V_{k+1,k} = \left. \frac{\partial h(X_k^S, \nu_k)}{\partial \nu_k^S} \right|_{X_k^S = X_{k+1|k}^S, \nu_k = \hat{\nu}_k}. \quad (8)$$

式中: \hat{X}_k^S 为状态估计值, $X_{k+1|k}^S$ 为状态一步预测值. 状态转移矩阵、量测矩阵、系统噪声驱动矩阵和量测噪声驱动矩阵具体如下:

$$F_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$W_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$H_{k+1,k} = \begin{bmatrix} H(1,1) & H(1,2) & 0 & 0 \\ H(2,1) & H(2,2) & H(2,3) & H(2,4) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$V_{k+1,k} = \begin{bmatrix} V(1,1) & V(1,2) & V(1,3) & V(1,4) & 0 \\ V(2,1) & V(2,2) & 0 & 0 & V(2,5) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V(2,6) & V(2,7) & V(2,8) & V(2,9) & V(2,10) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} H(1,1) &= 2(x_k^S - x_k^M), \\ H(1,2) &= 2(y_k^S - y_k^M), \\ H(2,1) &= 2(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M), \\ H(2,2) &= 2(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M), \\ H(2,3) &= 2\delta t(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M), \\ H(2,4) &= 2\delta t(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M); \\ V(1,1) &= 2(x_k^S - x_k^M), V(1,2) = 2(y_k^S - y_k^M), \end{aligned}$$

$$V(1,3) = 2(x_k^M - x_k^S), V(1,4) = 2(y_k^M - y_k^S),$$

$$V(2,1) = 2(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M),$$

$$V(2,2) = 2(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M),$$

$$V(2,5) = -2(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M),$$

$$V(2,6) = -2(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M),$$

$$V(2,7) = 2(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M),$$

$$V(2,8) = 2(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M),$$

$$V(2,9) = 2\delta t(x_k^S + \delta x_k^S + \delta t U x_k - x_{k+1}^M),$$

$$V(2,10) = 2\delta t(y_k^S + \delta y_k^S + \delta t U y_k - y_{k+1}^M).$$

根据 EKF 滤波原理^[21], 设计协同定位滤波算法如下:

状态一步预测方程

$$X_{k+1|k}^S = f(\hat{X}_k^S, \hat{\omega}_k); \quad (13)$$

状态预测方差阵

$$P_{k+1|k} = F_{k+1,k} P_k F_{k+1,k}^T + W_{k+1,k} Q_k^S W_{k+1,k}^T; \quad (14)$$

量测值预测

$$Z_{k+1|k}^S = h(\hat{X}_k^S, \hat{\nu}_k); \quad (15)$$

滤波增益

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1,k}^T (V_{k+1,k} R_k^S V_{k+1,k}^T + H_{k+1,k} P_{k+1,k} H_{k+1,k}^T)^{-1}; \quad (16)$$

状态估计方差阵

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1,k}) P_{k+1|k}; \quad (17)$$

状态估计

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1}^S &= \\ X_{k+1|k}^S &+ K_{k+1} (Z_{k+1}^S - Z_{k+1|k}^S). \end{aligned} \quad (18)$$

4 仿真研究

为验证算法的有效性, 根据 AUV 的运动学模型, 设定主、从 AUV 的航行轨迹, 对算法进行仿真分析研究. 在仿真中, 主、从 AUV 以 2 m/s 的速度航行, 航行时间为 2500 s, 航行深度为 -10 m, 如图 2 所示. $\Delta t = 1$ s, $\delta t = 8$ s, $U x_k = 0.5$ m/s, $U y_k = 0.5$ m/s. 滤波初值的选取参考文献[22], 如果在滤波初始时刻对被估价量的统计特性缺乏了解, 选取滤波初值盲目, 则选取的状态初值可能严重偏离真值, 此时状态量的方差阵 P_1 应取较大值, 系统噪声方差阵 Q_1^S 和量测噪声方差阵 R_1^S 的选取应根据实际系统确定. 仿真所用滤波初值如下:

$$\hat{X}_1^S = [10 \text{ m}, -100 \text{ m}, 0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}]^T;$$

$$P_1 = \text{blkdiag}(10^8, 10^8, 10^7, 10^7);$$

$$Q_1^S = \text{blkdiag}((10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (2\text{ m})^2, (2\text{ m})^2, (0.05\text{ m})^2, (0.05\text{ m})^2);$$

$$R_1^S = \text{blkdiag}((10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (10\text{ m})^2, (2\text{ m})^2, (2\text{ m})^2, (0.05\text{ m})^2, (0.05\text{ m})^2).$$

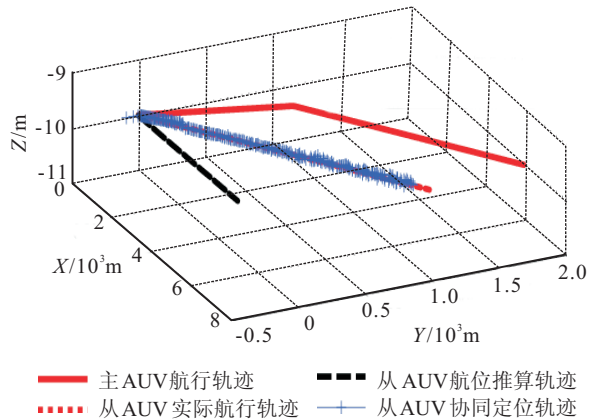
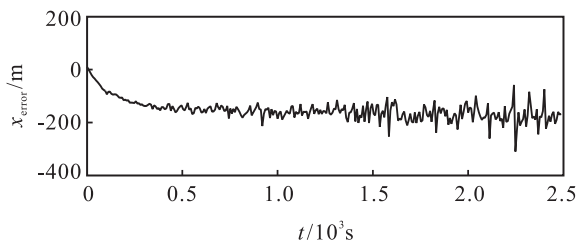
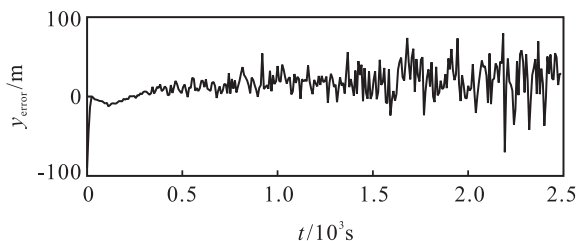


图 2 协同定位仿真轨迹

AUV 协同定位仿真结果如图 2 所示, 图中分别给出了主、从 AUV 的实际航行轨迹, 从 AUV 协同定位轨迹和航位推算轨迹. 从图 2 可以看出: 在未知定常洋流干扰的情况下, 从 AUV 航位推算定位会出现很大的偏差, 而利用本文的协同定位方法则能有效估计水平方向未知定常洋流速度, 为从 AUV 提供实时的定位补偿, 显著提高了从 AUV 定位精度. 图 3 给出了 x, y 方向的协同定位估计误差, 图中从 AUV 在 x 方向出现了 -150 m 的定位偏差. 结合图 4 洋流估计误差可以看出, 这主要是由 $0 \sim 500\text{ s}$ 内洋流初始估计误差造成的. 图 5 给出了洋流速度的实时估计值. 由仿真结果可以看出, 该协同定位方法能很好地估计未知定常洋流大小, 具有较好的收敛性.

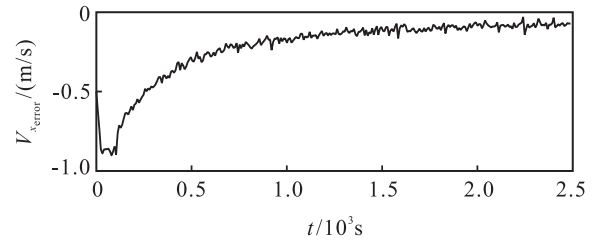


(a) 从 AUV 在 x 轴方向协同定位误差

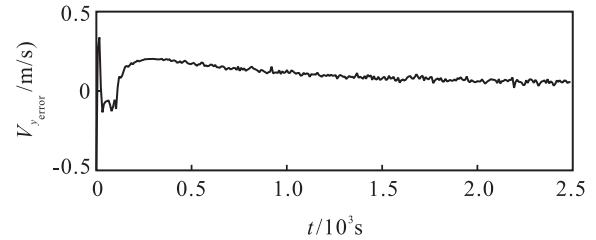


(b) 从 AUV 在 y 轴方向协同定位误差

图 3 AUV 协同定位估计误差

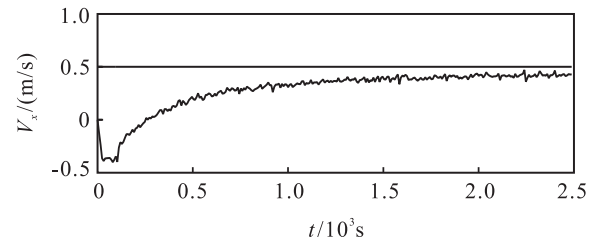


(a) 洋流 x 轴方向速度估计方差

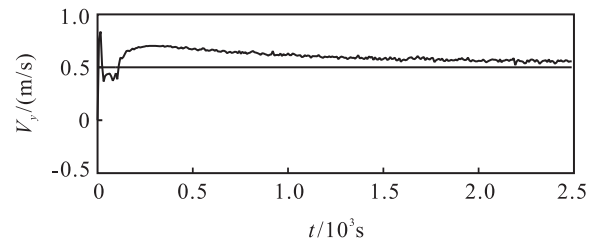


(b) 洋流 y 轴方向速度估计方差

图 4 洋流速度估计误差



(a) 洋流在 x 轴速度



(b) 洋流在 y 轴速度

图 5 洋流速度估计值

5 结 论

本文针对 AUV 协同定位受水下未知定常洋流影响的情况, 给出了一种洋流影响下基于运动矢径的 AUV 协同定位方法. 引入未知定常洋流, 结合 AUV 运动学方程建立 AUV 协同定位的状态方程, 利用运动矢径建立 AUV 量测方程, 采用 EKF 设计了 AUV 协同定位滤波算法, 并仿真验证了算法的有效性. 在洋流干扰的情况下, 该算法对未知定常洋流速度能进行有效估计, 并以此补偿 AUV 定位误差, 相对于单纯的航位推算方法, 显著提高了 AUV 的定位精度.

参考文献(References)

- [1] James C Kinsey, Ryan M Eustice, Louis L Whitcomb. A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges[C]. The 7th Conf on Maneuv Control Mar Craft. Lisbon, 2006: 1-5.

- [2] Larsen M B. Synthetic long baseline navigation of under water vehicles[C]. Oceans 2000-MTS/IEEE Conf and Exhibition. Providence, 2000: 2043-2050.
- [3] Lee P, Jun B, Kim K, et al. Simulation of an inertial acoustic navigation system with range aiding for an autonomous underwater vehicle[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 2007, 32(2): 392-345.
- [4] Lee P M, Jun B H, Lim Y K. Review on underwater navigation system based on range measurements from one reference[C]. Oceans 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. Kobe, 2008: 1-5.
- [5] Gadre A S, Stilwell D J. Toward underwater navigation based on range measurements from a single location[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, 2004: 4472-4477.
- [6] Gadre A S, Stilwell D J. Underwater navigation in the presence of unknown currents based on range measurements from a single location[C]. American Control Conf. Portland, 2005: 656-661.
- [7] Gadre A S, Stilwell D J. A complete solution to underwater navigation in the presence of unknown currents based on range measurements from a single location[C]. IEEE Incremental Refining Spatial Joins Int Conf Intell Robots Systems. Portland, 2005: 1420-1425.
- [8] Gadre A S, Maczka D K. Cooperative localization of an acoustic source using towed hydrophone arrays[C]. Autonomous Underwater Vehicles, 2008 IEEE/OES. Woods Hole, 2008: 1-8.
- [9] Baccou P, Jouvencel B. Homing and navigation using one transponder for AUV, post-processing comparisons results with long base-line navigation[C]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington, 2002, 4: 4004-4009.
- [10] Baccou P, Jouvencel B. Simulation results, post-processing experimentations and comparisons results for navigation, homing and multiple vehicles operations with a new positioning method using on transponder[C]. Proc of 2003 IEEE/RSJ Int Conf. Las Vegas, 2003, 1: 811-817.
- [11] Vaganay J, Leonard J, Curcio J, et al. AOFNC-experimental validation of the moving long base line navigation concept[C]. Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES. Sebasco Harbor Resorts, 2004: 59-65.
- [12] Matos A, Cruz N. AUV navigation and guidance in a moving acoustic network[C]. Oceans 2005-Europe. Brest, 2005: 680-685.
- [13] Bahr A, John Leonard J. Cooperative localization for autonomous underwater vehicles[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2008, 39(6): 387-395.
- [14] Bahr A. Cooperative localization for autonomous underwater vehicles[D]. Woods Hole Oceanographic Institution, MIT, 2008: 51-87.
- [15] Engel R, Kalwa J. Relative positioning of multiple underwater vehicles in the GREX project[C]. Oceans 2009-Europe. Bremen: IEEE, 2009: 1-7.
- [16] Zhang Lichuan, Liu Mingyong, Xu Demin, et al. Cooperative localization for underwater vehicles[C]. IEEE Conf on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, 2009: 2524-2527.
- [17] 张立川, 刘明雍, 徐德民. 基于水声传播延迟的主从式多无人水下航行器协同导航定位研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1674-1678.
(Zhang L C, Liu M Y, Xu D M. Cooperative localization for multi-UUVs based on time-of-flight of acoustic signal[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(12): 1674-1678.)
- [18] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于移动长基线的多AUV协同导航[J]. 机器人, 2009, 31(6): 581-585.
(Zhang L C, Xu D M, Liu M Y, et al. Cooperative navigation of multiple AUVs using moving long baseline[J]. Robot, 2009, 31(6): 581-585.)
- [19] Freitag L, Grund M, Singh S, et al. The whoi micro-modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms[C]. IEEE/MTS Oceans Conf. Washington, 2005: 1086-1092.
- [20] Singh S, Grund M, Bingham B R, et al. Underwater acoustic navigation with the WHOI micro-modem[C]. Oceans 2006. Boston, 2006: 1-4.
- [21] Kalman R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Trans of the ASME-Journal of Basic Engineering, 1960, 82(4): 35-45.
- [22] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 41-42.
(Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filter and principle of intergrated navigation[M]. Xi'an: Press of Northwest Industry University, 1998: 41-42.)