

一种改进的多 AUV 协同导航数学模型

王伟平¹ 杨 苗² 赵玉新³

(昆明理工大学城市学院 昆明 650093)¹ (云南省产品质量监督检验研究院 昆明 650223)²
(哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150000)³

摘要 自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)代表了未来水下航行器发展的方向,多 AUV 协同导航系统通过信息的共享,可以获得单 AUV 导航系统无法具备的优势。分析了多 AUV 协同导航基本原理和两种网络结构的优缺点,提出了一种新的改进的多 AUV 协同导航网络结构,并推导出了其运动模型和量测模型,为后续协同导航算法的研究打下了基础。

关键词 自主式水下航行器,协同导航,运动模型,量测模型

中图分类号 TB568 **文献标识码** A

Improved Mathematical Model for Cooperative Navigation of Multi-AUVs

WANG Wei-ping¹ YANG Miao² ZHAO Yu-xin³

(College of City, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)¹
(Yunnan Testing Institute of Product Quality Supervision, Kunming 650223, China)²
(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China)³

Abstract AUV represents the future development direction of underwater vehicle. Through sharing of information, cooperative navigation system of multi-AUVs has more advantages than the single AUV navigation system. This paper analyzed the basic principles of cooperative navigation of Multi-AUVs, and advantages and disadvantages of its two kinds of network structure, then proposed an improved structure of cooperative navigation of multi-AUVs, and deduced the motion model and measurement model, to create the conditions for subsequent research on cooperative navigation algorithm.

Keywords AUV, Cooperative navigation, Motion model, Measurement model

作为人类探索海洋的助力器,自主式水下航行器(AUV)被越来越多地用于进行各种水下作业。但是受限于水下的特殊环境,传统的 GPS 导航无法应用,这使得 AUV 的水下导航异常困难。同时近年来随着多机器人系统研究热潮的掀起,多 AUV 系统由于其相对于单平台的系统具有诸多优势而受到越来越多的重视。本文研究了多 AUV 协同导航的网络结构特征,提出了一种改进的网络结构,并推导出其数学模型^[9]。

1 多 AUV 协同导航基本原理

多 AUV 协同导航是指在协同导航系统中的 AUV 通过水声通信技术利用来自外界的导航信息,如信标或其他 AUV 的导航信息,通过信息融合技术来提高自身定位精度的导航方法。与移动长基线法相似,在多 AUV 协同导航系统中,当某个 AUV 需要定位时,其他 AUV 作为移动信标,待定位的 AUV 或通过询问应答方式,或通过接收其他 AUV 广播信号的方式获取其他 AUV 的导航信息,同时进行自身到对应

AUV 的距离或方位测量,然后结合自身本体传感器的相应量测信息,通过三角形的几何关系解算出自身的位置信息^[1]。

如图 1 所示,当采用询问应答方式时,待定位 AUV 先对外广播其请求定位信号;其他 AUV 收到该请求信号后,依次等待一个预先设定的特殊等待时间,然后回发响应信号,响应信号中包含该 AUV 的导航信息、标识号和等待时间,待定位 AUV 利用发送请求信号到接收到响应信号的时间差 Δt_{2-1} 、等待时间 t_2^{TAT} 算出声波信号在水中的单程传播时间:

$$t^{out} = \frac{\Delta t_{2-1} - t_2^{TAT}}{2} \quad (1)$$

再利用声波在海水中的传播速率 v_{water} 即可解算出待定位 AUV 与发送响应信号 AUV 之间的距离:

$$d = v_{water} \cdot t^{out} \quad (2)$$

假设收、发信号 AUV 处于同一水平面上,则利用发送响应信号 AUV 的位置信息即可确定一个圆,待定位 AUV 必定在该圆上(若不在同一水平面,则需要将距离投影到同一平面);若同时接收到两个或者以上不同 AUV 的应答信号则可

本文受云南省教育厅面上项目:基于 RFID 与 GPRS 技术的灾难救援系统开发研究(KKJA201025051),云南省软件工程重点实验室开放基金资助项目面上基金项目:嵌入式系统软件的演化研究(2012SE308),国家自然科学基金:提高锡、钨、金等金属回收率的摇床分带图像分割法研究(51204077)资助。

王伟平(1977—),男,硕士,讲师,主要研究方向为信息处理, E-mail: 22674657@qq.com; 杨 苗(1979—),女,硕士,工程师,主要研究方向为信息处理(通信作者); 赵玉新(1981—),男,博士,教授,主要研究方向为导航制导。

确定多个圆,这些圆的交点即为待定位 AUV 的位置。

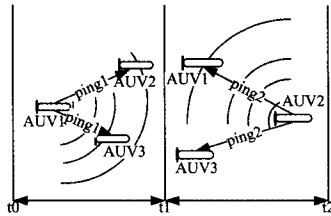


图 1 AUV 的询问应答式协同定位

当采用广播方式时,原理类似,系统中的每个 AUV 按照预先设定次序,在指定的时刻轮流地对外广播自身的导航信息或由系统中某一高精度的 AUV 周期性地对外广播导航信息,其余 AUV 接收该广播信息并结合前一时刻接受的广播信息解算出自身的导航信息,这里由于接收到导航信息时是在不同时刻广播的,因此需要把不同时刻接收的广播信息根据待定位 AUV 自身的航位推算系统平移到相同的某一时刻,然后再通过几何位置关系解算出该时刻待定位 AUV 的位置^[2,3],如图 2 所示。

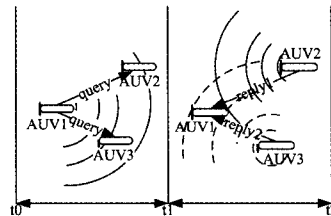


图 2 AUV 的广播式协同定位

2 多 AUV 协同导航的网络结构特征

按照 AUV 在协同系统中的重要性,多 AUV 协同导航系统可分为主从式和平行式,其中主从式又包括单主、双主和多主等结构。主从式结构中主 AUV 通常配备高性能的导航系统,并可以依靠自身的传感器测量进行有界误差定位。而从 AUV 通常配备价格低廉的导航系统,如航位推算设备、GPS 和水声通信设备等。主 AUV 通过与从 AUV 的水声通信实现自己高精度的导航信息在整个 AUV 群体中的共享;而从 AUV 用该导航信息并通过相对位置测量计算自己的位置估计。通过这种方式可以提高整个 AUV 群体的定位准确度和精度,如图 3 所示。

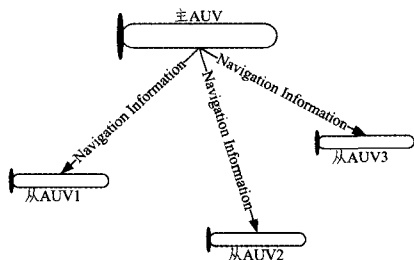


图 3 AUV 的主从式结构

平行式结构中,每个 AUV 配备相同或精度相当的导航系统和水声通信设备,通过接收来自信标的声波信号修正自己的误差。同时各 AUV 之间通过相互广播自己的导航信息实现导航信息的共享,并结合相互的方位测量来更新自身的位置,如图 4 所示。

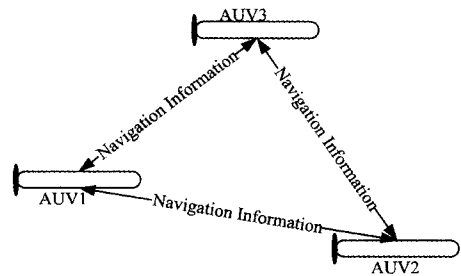


图 4 AUV 的平行式结构

3 多 AUV 协同导航网络结构的改进

主从式结构中,虽然通过共享主 AUV 的导航信息能较大地提高整个 AUV 群的定位精度,但一旦主 AUV 出现故障,整个协同导航系统都将瘫痪,整个 AUV 群的导航精度也将立即下降,因此系统的抗损伤能力较差。平行式结构中,虽然某台 AUV 发生故障并不会对整个 AUV 群的定位精度有太大的影响,但整体的导航性能提升效果并不理想,且它要求在协同导航系统中每个 AUV 配备相同的导航系统,这在某些实际情况中是难以满足的。在通常情况下,某一个 AUV 群中,可能某些 AUV 配备高性能的导航设备,导航性能与主从式结构中的主 AUV 相当,某些 AUV 配备着廉价的导航设备,导航性能与主从式结构中的从 AUV 相当,还有些 AUV 的导航性能不及主 AUV 但又远比从 AUV 的导航性能好,对这种多 AUV 群体,无论采用主从式结构还是平行式结构都不太适合。因此我们提出了一种多 AUV 协同导航的分层式结构,将多 AUV 群体中导航性能相当的 AUV 归为一层,将各层按导航性能的高低进行排序,导航信息只能从较高层的 AUV 流向较低的层的 AUV,同一层内的 AUV 之间可以相互通信共享导航信息,其结构如图 5 所示。

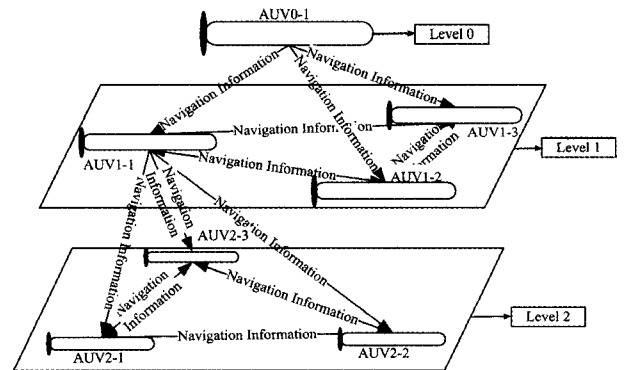


图 5 AUV 的分层式结构

在分层式结构中,若处于较高层的某台 AUV 出现故障,位于同一层的其他 AUV 能够工作,因此对整个协同导航系统的影响并不大;即使是某一层的全部 AUV 均出现故障,只要位于该层上面的 AUV 仍能够工作,整个协同导航系统就仍能够工作,且对系统整体定位精度的影响也不会太大,因此分层式系统具有较高的抗损伤能力和鲁棒性。与传统的平行式结构相比,分层式结构不需要协同系统中的每一个 AUV 都具有相同或相近的导航精度,通过将导航精度差别较大的 AUV 分别分配到不同的层,而将导航精度相当的 AUV 归为同一层,不仅能够使高精度的导航信息得到充分的利用,而且使得系统在构建时具有更高的灵活性。

4 多 AUV 协同导航的数学模型

4.1 多 AUV 协同导航的运动模型

通常对运载体进行导航定位就是通过利用载体上各种传感器所获取的载体或外部测量信息并结合运载体执行部件的控制输入,以维持一个对运载体当前位姿的估计。但是从传感器读取的测量信息都具有一定的噪声,且由于外部复杂的环境,运载体执行部件的作用效果通常也不能很好地进行预测,因此需要对其进行建模并对这些噪声进行估计。针对 AUV 这种三维空间中的载体运动,系统的状态可表达为由 AUV 位姿组成的随机变量,其中包括 AUV 在全局坐标中的位置 $[x, y, z]^T$ 以及 AUV 的姿态。若 AUV 的姿态采用欧拉角 $[\phi, \psi, \theta]^T$ 表示,则 AUV 在 t 时刻的位姿向量可表达为 $X(t)=[x, y, z, \phi, \psi, \theta]^T$,其中 x, y, z 分别为全局三维空间中沿 x 轴, y 轴, z 轴 3 个维度的位置坐标, ϕ 为滚转角, ψ 为俯仰角, θ 为航向角。各分量坐标如图 6 所示。

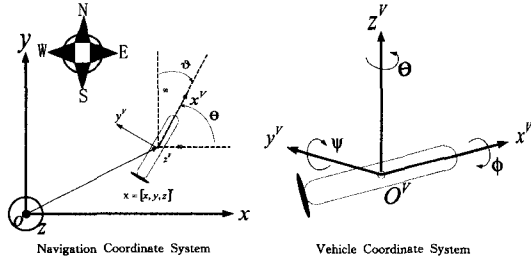


图 6 导航坐标系和载体坐标系

除此之外,系统的状态还可以包含位姿向量对时间的一阶和二阶偏导,分别表示载体的速度和加速度。为有效地评估 AUV 的控制输入 u_t 对运载体位姿向量的作用效果,需要对 AUV 的运动进行建模,利用 AUV 在 t_1 时刻的状态 X_{t_1} 和控制输入 u_{t_1} 对载体在 t_2 时刻的状态 X_{t_2} 进行预测,则其系统状态速度和速率分量的连续时间模型可表达为:

$$\dot{X}_t = f(X_t, u_t) \quad (3)$$

式中,函数 $f(\cdot)$ 为非线性连续函数,通常比较复杂,其主要由 AUV 的形状、大小、重量以及 AUV 所处的环境决定。在对 AUV 的运动进行建模时,考虑的问题越多,模型越复杂,通常对 AUV 的实际运动的描述就会越准确,即对 AUV 位姿的预测也就更准确。式(3)是理想化模型,在实际研究中,即使是最复杂的模型也无法完全准确地描述载体在实际环境中的真实运动,不确定性总是存在的。例如 AUV 在水下运动时会受到不可观测的洋流及其他未知的扰动,因此有必要在运动模型中加入噪声代表载体实际运动中的不确定性因素:

$$\dot{X}_t = f(X_t, u_t, w_t) \quad (4)$$

式中, w_t 代表系统在 t 时刻的运动噪声,由于算法需要在计算机上运行故需要对连续系统进行离散化,在实际操作中通过对传感器的信号进行周期性的采样来完成,采样频率 $f_u = \frac{1}{\Delta T}$ 通常与控制循环的更新频率相同。假设采样周期 ΔT 足够小,在该时间间隔内载体的运动状态 x 和控制输入 u 均可视为常量,则式(4)又可表达为:

$$X_{k+1} = X_{t(k+1)} = f(X_k, u_k, w_k) \quad (5)$$

其中, $t_k = k \cdot \Delta T$, w_k 包含运动过程中未被频率 f_u 捕获到的高频部分以及其他的运动噪声。

在研究多 AUV 协同导航问题时,假设 AUV 在 k 时刻的

状态 X_k 为随机变量,且概率密度满足正态分布,即:

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}|P|} \exp\left(-\frac{1}{2}(X-\mu)^T P^{-1}(X-\mu)\right) \quad (6)$$

也就是说, AUV 在某一时刻的状态 X 可以通过均值向量 $\mu \in R^n$ 和半正定的协方差 $P \in R^n \times R^n$ 完全表征,其中 n 与状态向量的维数相同。由于 AUV 的深度值 z 可以通过深度计等传感器直接准确测量且 AUV 在进行稳态运动时俯仰角较小可近似看做等深运动,故可以将三维空间的导航问题投影到二维平面,假设参与多 AUV 协同导航的所有 AUV,都拥有一个描述其 k 时刻位姿估计的均值向量:

$$\mu_k = [\mu_{xk}, \mu_{yk}, \mu_{\theta k}]^T = [x_k, y_k, \theta_k]^T = \hat{X}_k \quad (7)$$

及一个描述该位姿估计不确定度的协方差矩阵:

$$P(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2(k) & \sigma_{xy}^2(k) & \sigma_{y\theta}^2(k) \\ \sigma_{yx}^2(k) & \sigma_{yy}^2(k) & \sigma_{y\theta}^2(k) \\ \sigma_{\theta x}^2(k) & \sigma_{\theta y}^2(k) & \sigma_{\theta\theta}^2(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

则针对 AUV 的水下运动可考虑如下二维非线性离散系统,其运动方程为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + TV_k \cos(\theta_k) \\ y_{k+1} = y_k + TV_k \sin(\theta_k) \\ \theta_{k+1} = \theta_k + T\dot{\theta}_k \end{cases} \quad (9)$$

其中, x_k, y_k 和 θ_k 分别表示 AUV 在二维投影平面中的横向坐标、纵向坐标和偏航角度; V_k 和 $\dot{\theta}_k$ 分别表示 AUV 的前向速度和偏航角速度; T 表示在将连续系统离散化时传感器的采样周期,而其中 V_k 和 $\dot{\theta}_k$ 可由 AUV 的载体传感器测量,为系统的控制输入,可建模如下:

$$u_k = \begin{bmatrix} V_k \\ \dot{\theta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{mk} - w_{vk} \\ \dot{\theta}_{mk} - w_{\theta k} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, w_{vk} 和 $w_{\theta k}$ 为相互独立的运动噪声,且有 $w_{vk} \sim N(0, \sigma_{vk}^2)$ 和 $w_{\theta k} \sim N(0, \sigma_{\theta k}^2)$ 。

故该运动模型也可简写为:

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k, w_k) = X_k + \Gamma(u_k, w_k) \quad (11)$$

其中, $\Gamma(u_k, w_k)$ 为非线性项,且有:

$$Q_k = E\{W_k W_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_{vk}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta k}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4.2 多 AUV 协同导航的量测模型

在构建多 AUV 协同导航系统时,为简化系统,假设采用单主结构,即单领航者模式。其协同定位原理如图 7 所示。在单领航者模式中,领航者即主 AUV,配备高性能的导航设备,并周期性地对外广播水声信号,信号中包含主 AUV 的导航信息及获取该导航信息的时间戳。主、从 AUV 在开始进行水下作业前先进进行时钟同步,假设 t_k 时刻从 AUV 接收到来自主 AUV 的水声信号,从中可以解析出主 AUV 的 X_k^M 和对应的方差 P_k^M 以及主从 AUV 之间的距离 r_k ; 当 t_{k+1} 时刻从 AUV 再次接收到来自主 AUV 的水声信号数据包时,从 AUV 可以解析出主 AUV 的相关信息 $X_{k+1}^M, P_{k+1}^M, r_{k+1}$,根据这两次获取的位置信息及从 AUV 的航位推算系统 $D_{k+1, k}^M$,可解算出从 AUV t_{k+1} 时刻的位置估计信息。

采用单主结构的多 AUV 协同导航系统具有弱观测性,因此需要对主、从 AUV 的路径进行恰当的设计,主 AUV 不能与从 AUV 以相同速率向相同的方向运动,否则可能导致系统不可观测^[4-7]。由此可见多 AUV 协同导航系统中主、从

AUV 之间的几何位置关系与 AUV 的定位性能有一定的关系^[8], 因此在进行实验时需要为主、从 AUV 的运动轨迹进行恰当设计以使协同导航的定位性能达到最优。

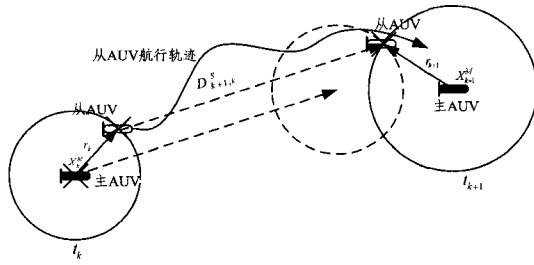


图7 单主结构多 AUV 协同定位原理

通常运动载体都搭载了各种传感器用以测量本体状态信息或外部环境的信息。假设这些传感器在 k 时刻获取的量测值用 z_k^i 表示, 其中 i 表示传感器编号, 则 k 时刻来自 AUV 上所有传感器的量测值可组成一个量测向量 Z_k , 其中对 AUV 本体的测量依赖于载体当时的运动状态 X_k , 而对外部环境的测量则依赖于外部环境的特征, 假设其为 m_k , 由此系统的量测模型可表示为:

$$Z_k = g(X_k, m_k) \quad (13)$$

其中, $g(\cdot)$ 为非线性函数。考虑到实际的传感器在进行测量时, 不可避免地会产生误差, 因此有必要对这些误差进行建模, 引入传感器噪声项 v_k , 则系统的量测模型可以表达为:

$$Z_k = g(X_k, m_k, v_k) \quad (14)$$

在确定量多 AUV 协同导航的测量模型时, 航向角可由磁罗盘测得, 为简化系统, 采用上述单主仅距离量测的协同系统并将主、从 AUV 简化为质点, 故在 k 时刻主、从 AUV 在三维空间中的坐标分别为 $X_k^M = [x_k^M \ y_k^M \ z_k^M]^T$ 和 $X_k^S = [x_k^S \ y_k^S \ z_k^S]^T$, 此时从 AUV 接收到来自主 AUV 的水声信号, 从该信号在水中传播的时间 Δt 及声波在水中传播速度 v_{sound} 中可以解算出主、从 AUV 之间的斜距:

$$L_k = \Delta t \cdot v_{\text{sound}} \quad (15)$$

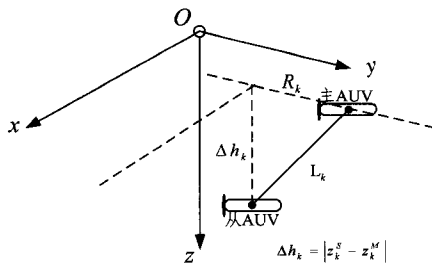


图8 主、从 AUV 之间斜距的投影

由于主、从 AUV 的 z_k^M 和 z_k^S 可以很容易地从深度传感器中获取, 因此可以将其投影到水平面上, 如图 8 所示。由图 8 易得:

$$R_k^2 = L_k^2 - (z_k^M - z_k^S)^2 \quad (16)$$

其中, R_k 为主、从 AUV 在水平面上的距离, 因此可以将三维空间问题简化为二维空间问题求解, 可得:

$$R_k^2 = (x_k^M - x_k^S)^2 + (y_k^M - y_k^S)^2 \quad (17)$$

假设经过一段时间 T 后从 AUV 再次收到来自主 AUV 的水声信号, 可得:

$$R_{k+1}^2 = (x_{k+1}^M - x_{k+1}^S)^2 + (y_{k+1}^M - y_{k+1}^S)^2 \quad (18)$$

又由从 AUV 的航位推算系统可得:

$$\begin{cases} x_{k+1}^S = x_k^S + dx_{k,k+1} \\ y_{k+1}^S = y_k^S + dy_{k,k+1} \end{cases} \quad (19)$$

由式(17)一式(19)可得其量测方程为:

$$\begin{cases} R_k^2 = (x_k^M - x_{k+1}^S + dx_{k,k+1})^2 + (y_k^M - y_{k+1}^S + dy_{k,k+1})^2 \\ R_{k+1}^2 = (x_{k+1}^M - x_{k+1}^S)^2 + (y_{k+1}^M - y_{k+1}^S)^2 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $dx_{k,k+1}$ 和 $dy_{k,k+1}$ 分别表示 AUV 在采样周期时间内走过的水平位移和纵向位移, 若用 v 表示量测噪声, 则满足 $v \sim N(0, \sigma^2)$ 且 $E[v_k(v_j)^T] = \sigma^2 \delta_{kl}$ 即:

$$O_{k+1} = \begin{bmatrix} \sigma_{r_k}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{r_{k+1}}^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

上标 S (Slavery) 表示从 AUV, 上标 M (Master) 表示主 AUV, 则式(20)可简写为:

$$Z_{k+1} = \begin{bmatrix} z_k \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = g(X_{k+1}^S, X_{k+1}^M, X_k^M, DX_{k+1,k}^S, v) \quad (22)$$

综上所述, 多 AUV 协同导航系统的非线性系统模型可表示为:

$$\begin{cases} X_{k+1} = f(X_k, u_k, w_k) \\ Z_{k+1} = g(X_{k+1}^S, X_{k+1}^M, X_k^M, DX_{k+1,k}^S, v) \end{cases} \quad (23)$$

结束语 通过研究多 AUV 协同导航系统的基本原理, 分析了多 AUV 协同导航系统中主要采用的两种系统结构的特点, 提出了一种改进的系统结构——分层式结构, 以弥补两种传统结构的不足。该结构既具有主从式结构中充分利用高精度导航设备的特点, 又具有平行式结构的鲁棒性和抗损伤能力, 而且在构建多 AUV 协同导航系统时采用该结构还可获得更高的灵活性; 针对 AUV 的水下运动, 以单主仅距离量测的多 AUV 协同导航系统为研究对象, 分析并建立了协同导航的数学模型, 为后续协同导航算法的研究打下基础。

参考文献

- [1] 余琨, 徐国华, 肖治琥, 等. 多 AUV 协作系统研究现状与发展综述[J]. 船海工程, 2009, 38(5)
- [2] 吴小平. 多 AUV 协调控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学大学, 2008
- [3] 朱亦峰. 多 AUV 协同作业中的互定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009
- [4] 张立川, 徐德民, 刘明雍. 基于双水听器的主自主水下航行器协同导航方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1603-1606
- [5] Antonelli G, Caiti A, Calabro V, et al. Designing behaviors to improve observability for relative localization of AUVs[C]// 2010 IEEE International Conference on IEEE Robotics and Automation (ICRA). 2010: 4270-4275
- [6] Antonelli G, Arrichiello F, Chiaverini S, et al. Observability analysis of relative localization for AUVs based on ranging and depth measurements[C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2010: 4276-4281
- [7] 严卫生, 房新鹏, 崔荣鑫. 单信标测距 AUV 水下定位系统观测性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3086
- [8] 李闻白, 刘明雍, 李虎雄, 等. 基于单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统定位性能分析[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 724-736
- [9] 张宁申, 黄晨程, 刘林峰. UWSNs 中基于 AUV 移动的覆盖盲区修复算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(11A): 154-157, 161