

# An Integrated AUV Navigation Method Using Bayes Filtering

LI Jianlong<sup>1</sup>, GUAN Xinghua, SUN Feng, XU Wen<sup>2</sup>

1. Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology, Hangzhou 310027, China

e-mail: JLLi@zju.edu.cn, wxu@zju.edu.cn

**Abstract:** A framework of integrated navigation for autonomous underwater vehicle (AUV) is presented based on Bayes filtering. The observation data of the framework include the initial surface position of the AUV recorded by GPS, the AUV position/pose parameters underwater obtained via the inertial navigation system/doppler velocity log, and the seafloor feature information detected by an imaging sonar. All the data are fused by Bayes filtering and the AUV position/pose parameters are estimated in a combined manner. This framework of integrated navigation may achieve robust and high-precision navigation for AUV operated medium to long distance.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle; integrated navigation; sonar; Bayes filtering

## 基于贝叶斯滤波的 AUV 组合导航方法

李建龙<sup>1</sup>, 官兴华, 孙 峰, 徐 文<sup>2</sup>

1. 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江省杭州市, 中国, 310027

2. 浙江省综合信息网技术重点实验室, 浙江省杭州市, 310027

e-mail: JLLi@zju.edu.cn, wxu@zju.edu.cn

**摘 要:** 本文讨论了利用贝叶斯滤波的 AUV 组合导航执行框架。该框架的观察数据来源于通过 GPS 获取的 AUV 下潜之前水面初始位置信息, 通过多普勒计程仪/惯性导航仪获取的 AUV 位置/姿态参数, 以及通过成像声纳检测技术获取的海底特征目标信息。贝叶斯滤波通过对上述三类观察数据的融合进行组合导航, 以实现 AUV 中、远程航行稳定、高精度导航。

**关键词:** 自主水下机器人; 组合导航; 声纳; 贝叶斯滤波

### 1 引言

自主水下机器人 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 是目前海洋工程领域技术发展的热点, 在海洋环境观测、海底工程、资源开发以及军事应用等各领域扮演着越来越重要的角色。导航技术是实现 AUV 自主航行的关键, 而 AUV 所具有的工作时间长、环境复杂、信息源少、隐蔽性要求高等特点, 给稳定、精确的导航实现带来很大的挑战。首先, 由于电磁波在水下的快速衰减, 传统的 GPS 卫星导航技术只适用于水体表层有限的区域; 其次, 基于声学导航的长/短基线定位技术需要预先布设或者船体安装外部信标, 使得 AUV 活动范围受到限制; 此外对于小型机器人而言,

采用低成本、小体积的惯性导航技术或者航位推算技术, 无法满足中、长程航行的导航要求。基于以上原因, 发展适用于中、长航程的新型导航技术, 并联合传统的惯性导航技术形成组合导航已成为目前水下机器人导航技术发展的重要趋势。

近年来国际上对于 AUV 导航技术的研究一直非常活跃, 主要研究单位包括美国的海军水面武器中心、麻省理工学院、Woods Hole 海洋研究所、海军研究生院、佛罗里达大西洋大学等, 欧洲的 Norwegian Defense Research Establishment, Kongsberg Simrad AS, NATO SACLANT 水下研究中心, 以及澳大利亚悉尼大学的 Field 机器人研究中心 (Australian Centre for Field Robotics) 等。水下导航技术通常需要在精度、操作距离和自动化程度等之间进行平衡, 概括起来主要有以下几种类型: 航位推算与惯性导航、声学信标导航、地

资助信息: 国家 863 计划资助(2009AA12Z308)和机器人学国家重点实验室基金资助(RLO200817)

球物理导航等。

由于水下声传播的透明性,声纳系统是AUV的重要组成部分,用于环境测量、地形测绘、成像及通信与定位。基于声纳成像地形匹配的方法是目前水下导航技术研究热点之一。其执行需要航行区域的先验信息,而实际中通常面临的是未知环境,迫切需要AUV在成像的同时进行自身定位,同时定位与地图创建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)技术正是在此背景下发展起来的。SLAM方法中利用概率进行估计的思想最早在1986年IEEE机器人和自动化学术会议上被提出。此后,Smith, Cheesman和Durrant-Whyte等人建立了描述地标与AUV运动几何轨迹之间相关性的统计学基础<sup>[1-2]</sup>。同时,Smith等人提出了在未知环境下,把AUV成像与定位参数作为状态变量进行联合估计的思想,然而该方法的主要缺点是未知参数多、算法复杂且较难收敛。随着研究的深入,尤其是对地标之间相关性对AUV定位的影响等认识的加深,1995年的国际机器人研讨会上SLAM方法首次被明确提出<sup>[3]</sup>,研究者把SLAM问题建模为单一的估计问题,论证了该估计问题的收敛性,并给出了一些初始结果<sup>[4]</sup>。近年来,多家研究机构对SLAM导航方法进行了深入研究,并取得了重要进展,具有代表性的有美国的麻省理工学院,澳大利亚的悉尼大学等<sup>[5-10]</sup>。

目前,对SLAM技术的研究主要集中于多传感数

据的融合框架、算法的精度、稳定性以及执行效率。

主要的数据融合框架为基于Kalman滤波的方法以及Bayes滤波方法<sup>[9]</sup>,并均已在300 m以上水深实际环境中取得可靠导航结果。然而,算法精度的改善、稳定性与实用性的提高、海底地形特征统计描述模型、非结构化海底地形情况下的SLAM方法、远距离情况下的SLAM精确导航等有关技术还在发展之中。

现有AUV航位推算仪中普遍使用的惯性导航系统(INS)、多普勒计程仪(DVL)存在时间二阶或一阶累积误差,造成的导航误差在一定时间以后变得难以接受,同时使所承载的海底地形测量、目标定位等产生较大的偏差。常规方法通过定期上浮在水面进行GPS修正,这在受时间/能量限制的深海操作或者需要隐秘性的操作中,是不实际的。因此,无需先验信息的SLAM技术作为替代的全局导航修正方法,越来越受到关注。本文介绍了基于贝叶斯滤波的组合导航执行框架,即利用AUV搭载的声纳对未知环境进行海底特征目标检测,同时通过检测得到的海底特征目标之间的匹配来实现AUV自身的定位,这实质上是SLAM技术的一种简化形式。该技术与INS、DVL导航相组合,可修正INS、DVL由于长时间水下航行导致的时间累积误差,从而实现高精度的水下机器人组合导航,显著提高AUV整体导航的性能。

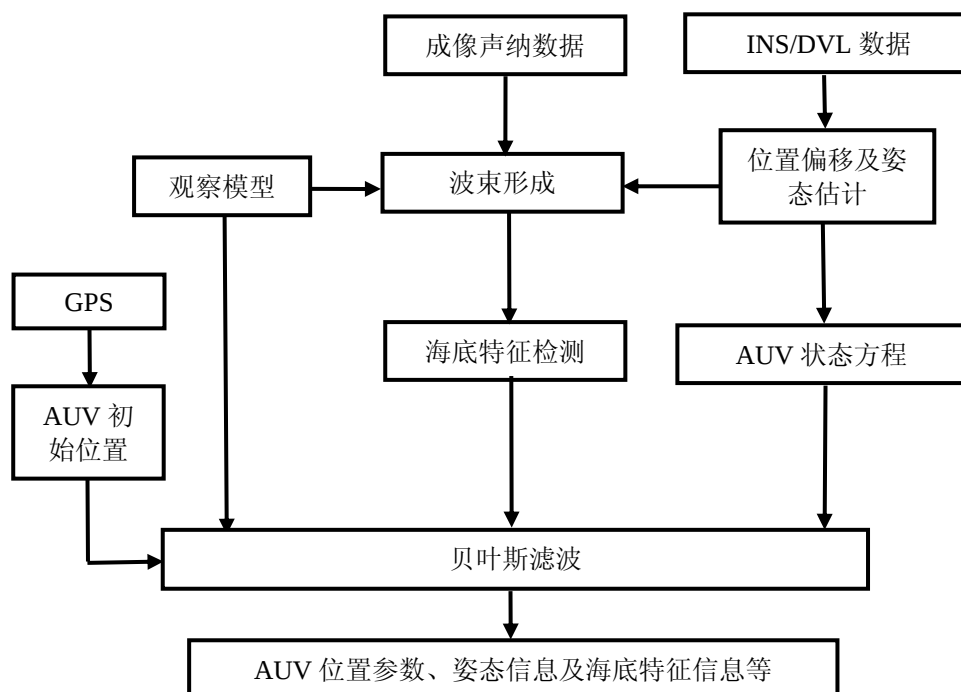


图 1. AUV 组合导航系统框图

## 2 AUV 组合导航方法

### 2.1 总体思路

AUV 组合导航方法的总体思路如图 1 所示，其目标为将惯性导航、多普勒计程仪及特征匹配全局导航等技术有效地结合起来，提高 AUV 中、远程导航精度。

图中包括多普勒计程仪与惯性导航组合处理流程，通过该模块，对 AUV 运动偏移及姿态等参数进行估计，以对声纳波束形成进行运动补偿。进而通过贝叶斯滤波方法，融合由 GPS 获得的 AUV 初始位置信息、声纳观察模型信息、由波束形成获得的海底特征信息以及 INS/DVL 数据信息，最终可输出 AUV 位置信息、姿态信息、海底特征信息等。成像声纳在特征匹配全局导航中的作用为提供海底特征图像数据，系统通过海底特征匹配对 INS/DVL 全局时间积累的误差进行修正。

### 2.2 贝叶斯滤波方法

基于贝叶斯滤波的组合导航技术，在初始位置先验已知（可通过 GPS 测量得到）的情况下，融合惯性导航/多普勒计程仪观察数据，声纳接收数据，基于 AUV 状态更新方程及声纳观察模型，通过贝叶斯后验概率的递推优化搜索获取相关导航参数。由于利用概率表示海底图像特征，因此对于缺少点、线等图像特征的非结构化海底地形以及较低质量的海底成像数据，该方法具有较好的宽容性，同时也具有广泛的适用性。

贝叶斯滤波的主要过程为：

(1) 利用 GPS 等工具，估计 AUV 下潜之前的初始位置  $\mathbf{x}_0$ ，其中  $\mathbf{x}_l = [i(l), j(l), \theta(l)]$ ， $i(l)$  和  $j(l)$  为水平面直角坐标位置， $\theta(l)$  为方位角，在初始时刻， $l = 0$ 。

(2) 通过惯性导航/多普勒计程仪数据以及 AUV 状态更新方程，估计条件概率  $p(\mathbf{x}_{l+1} | \mathbf{x}_l)$ ，其中  $\mathbf{x}_l$  为 AUV 在  $l$  时刻的位置，该条件概率可通过 AUV 状态方程  $p(\mathbf{x}_{l+1} | \mathbf{x}_l) = C / (\bar{\mathbf{x}}_l - \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}}_{l-1})$  进行近似估计，其中  $C$  为归一化常数。设 AUV 匀速运动，状态向量可表示为

$$\bar{\mathbf{x}}_l = \begin{Bmatrix} i(l) \\ u \\ j(l) \\ v \\ \theta(l) \\ \omega \end{Bmatrix} \quad (1)$$

状态转换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 对声纳接收信号进行波束形成处理，并进行运动补偿，结合观察模型，对观察数据进行条件概率表示  $p(\mathbf{z}_l | \mathbf{x}_l)$ 。设  $z_{ij}(l)$  表示在  $(i, j)$  位置所接收到的信号，即

$$z_{ij}(l) = \begin{cases} w_{ij}(l) \\ a_{ij}(l) + w_{ij}(l) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $a_{ij}(l)$  表示随时间变化的信号幅度， $w_{ij}(l)$  表示噪声。令  $z_{ij,x_l}(l)$  表示相邻的两帧接收信号在  $(i, j)$  位置的像差，则测量（观察）单元在  $l$  时刻所接受信号像差的负数为

$$\tilde{z}_{ij\theta}(l) = -\frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M z_{ij,x_l}(l)^2 \quad (4)$$

其中  $M$  为优化搜索时可能路径的网格点个数。测量矩阵可表示为

$$\mathbf{z}_l = \{\tilde{z}_{ij\theta}(l)\}, \text{ 其中 } l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

设观察为高斯分布，样本方差为  $\sigma^2$ ，则<sup>[11]</sup>

$$\log p(\mathbf{z}_l | \mathbf{x}_l) \approx C(\sigma, M) + \frac{M^2}{4\sigma^2} \tilde{z}_{ij\theta}(l) \quad (6)$$

设 AUV 每一时间点的状态转换可建模为一阶 Markov 随机行走模型，即

$$\mathbf{s}(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{l-1}, \dots, \mathbf{x}_1) = s_l(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{l-1}) + s_{l-1}(\mathbf{x}_{l-1}, \mathbf{x}_{l-2}) + \dots + s_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) \quad (7)$$

则可定义搜索最优路径的代价函数为

$$\begin{aligned} \tilde{s}(\tilde{\mathbf{x}}_l, \tilde{\mathbf{x}}_{l-1}, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_1) \\ = \max_{\mathbf{x}_l} \left[ \max_{\mathbf{x}_{l-1}} [s_l(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{l-1}) \right. \\ \left. + \max_{\mathbf{x}_{l-2}} [s_{l-1}(\mathbf{x}_{l-1}, \mathbf{x}_{l-2}) + \dots + \max_{\mathbf{x}_1} [s_1(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1)]] \dots \right] \\ \triangleq \max_{\mathbf{x}_l} [h_{l-1}(\mathbf{x}_l)], \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\tilde{s}$  为代价函数最大值， $\tilde{\mathbf{x}}_l, \tilde{\mathbf{x}}_{l-1}, \dots, \tilde{\mathbf{x}}_1$  为 AUV 实际行走路径。由式(8)的定义可知，

$$\begin{aligned} h_{l-1}(\mathbf{x}_l) &= \max_{\mathbf{x}_{l-1}} [h_{l-2}(\mathbf{x}_{l-1}) + s_l(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{l-1})] \\ h_l(\mathbf{x}_2) &= \max_{\mathbf{x}_1} [s_1(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1)]. \end{aligned} \quad (9)$$

根据贝叶斯后验概率最大原理，可定义在  $l$  时刻搜索最

佳路径（即 AUV 实际行走路径）的代价函数为

$$s(\mathbf{X}_l) = \log[P_{ll}(\mathbf{X}_l | \mathbf{Z}_l)] \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{X}_l = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_l] \quad (11)$$

$$\mathbf{Z}_l = [\mathbf{z}_1 \quad \mathbf{z}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{z}_l] \quad (12)$$

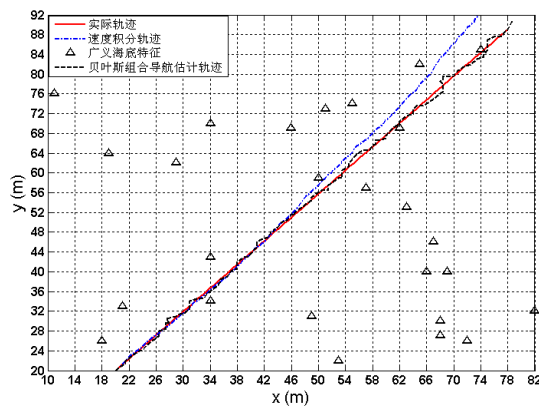
根据贝叶斯后验概率原理和一阶 Markov 随机行走模型，式（10）中的后验概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{ll}(\mathbf{X}_l | \mathbf{Z}_l) \\ &= P(\mathbf{z}_l | \mathbf{x}_l) \cdot P_{l-1}(\mathbf{X}_l | \mathbf{Z}_{l-1}) \\ &= P(\mathbf{z}_l | \mathbf{x}_l) \cdot P(\mathbf{x}_l | \mathbf{x}_{l-1}) \cdot P_{l-1}(\mathbf{X}_{l-1} | \mathbf{Z}_{l-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

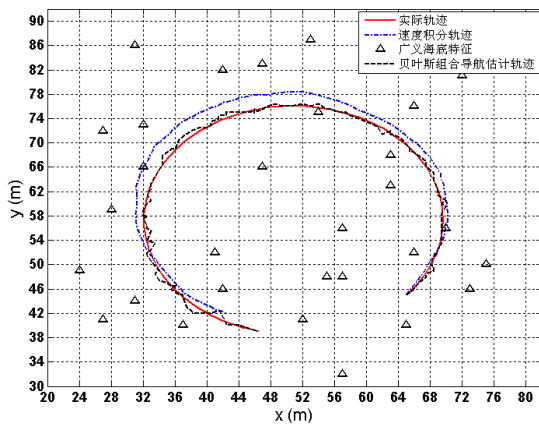
把式（10）和（13）带入式（9），根据前述估计得到的条件概率  $p(\mathbf{x}_{l+1} | \mathbf{x}_l)$  及  $p(\mathbf{z}_l | \mathbf{x}_l)$ ，通过逐步递推优化搜索（即代价函数最大化）可估计 AUV 实际运动路径，详细的优化算法可参考文献[11]。

### 3 仿真分析

结合图 1 的组合导航思路，本文开展了基于贝叶斯滤波的特征匹配全局导航算法仿真分析，图 2 是贝



(a)



(b)

图 2. 基于贝叶斯滤波的组合导航路径估计结果及与单一的速度积分路径估计的比较：(a) AUV 做直线运动，(b) 做圆弧运动

叶斯滤波组合导航路径估计的结果，其中（a）中 AUV 做直线运动，而（b）中做圆弧运动。仿真时设 AUV 实际运动速度为 1.5 m/s，速度误差小于 0.3 m/s，角速度误差小于  $1^\circ/\text{s}$ ，假设 AUV 载声纳线阵法向 120 度，距离 20 m 范围内海底特征目标均有回波，图中三角形表示广义海底特征，声纳检测输出平均信噪比约 0 dB。图中实线为 AUV 实际运动轨迹，点划线为根据速度及角速度值积分所得的轨迹，虚线为利用贝叶斯滤波融合速度测量值和特征检测信息的组合导航方法估计得到的运动轨迹，AUV 运动时间约 60 秒。从图中可知，组合导航算法估计的轨迹与实际较一致，且基本不受时间累积的影响。为验证方法的有效性，仿真假定的速度测量参数的误差比大部分现有设备略有夸大，然而实际中，在 AUV 运动时间增加后，即使较高性能的测量设备累积误差仍会很大。

### 4 总结

导航定位技术是 AUV 实现智能化以及完全自主化的关键技术。目前水下机器人导航技术发展在追求高精度的同时，更加注重可靠性、自主性和小型化。本文提出在以惯性导航系统为主的基础上，发展基于声纳信号处理的水下机器人组合导航技术，通过声纳海底特征检测及定位修正惯性导航系统的全局时间累积误差。文章旨在阐述一个组合导航框架，并对贝叶斯滤波方法进行了数值仿真分析，具体的技术实现有待于在载有成像声纳系统的实际 AUV 平台上进一步发展。

### References (参考文献)

- [1] Smith R, Cheesman P. On the Representation of Spatial Uncertainty[J]. *Int. J. Robot. Res.*, 1987, 5(4), pp. 56-68.
- [2] Durrant-Whyte H F. Uncertain Geometry in Robotics[J]. *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 1988, 4(1), pp. 23-31.
- [3] Durrant-Whyte H F, Rye D, Nebot E. Localisation of Automatic Guided Vehicles[A], in *Robotics Research: The 7th International Symposium (ISRR'95)*, Giralt G and Hirzinger G, Eds. New York: Springer Verlag, pp. 613-625, 1996.
- [4] Csorba M, Durrant-Whyte H F. A New Approach to Simultaneous Localization and Map Building[A], in *Proc. SPIE Aerosense*, Orlando, FL, 1996.
- [5] Leonard J J, Feder H J S. A Computational Efficient Method for Large-scale Concurrent Mapping and Localization[A], in *Robotics Research, The Ninth International Symposium (ISRR'99)*, Hollerbach J and Koditschek D, Eds. New York: SpringerVerlag, pp. 169-176, 2000.
- [6] Williams S B, Newman P, Dissanayake G, Durrant-Whyte H F. Autonomous Underwater Simultaneous Localization and Map Building[A], in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. (ICRA)*, San Francisco, CA, P1793-1798, 2000.
- [7] Castellanos J A, Tardós J D, Schmidt G. Building a Global Map of the Environment of A Mobile Robot: The Importance of Correlations[A], in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp.

- 1053-1059, 1997.
- [8] Deans M, Hebert M. Experimental Comparison of Techniques for Localization and Mapping Using a Bearing-only Sensor[A], in Proc. Int. Symp. Experimental Robot., pp. 395-404, 2000.
  - [9] Majumder S. Sensor fusion and feature based navigation for subsea robots. Ph. D. dissertation, Univ. Sydney, Australian Ctr. Field Robotics, 2001.
  - [10] Liu Te-Chih, Schmidt H. Concurrent Navigation and Sea-bottom Targets Detection Using Acoustic Sensors on AUV[A], OCEANS 2003, 5(22-26), pp. 2404-2409, 2003.
  - [11] Guo Jenhwa, Cheng Shengwen, Ying Chengyang, Liu Te-Chih. Image Registration for the Underwater Inspection Using the Maximum a Posteriori Technique[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2003, 28(1), pp. 55-61.