

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.013

水下机器人定位方法综述

商承超^{1,2}, 王伟², 谢广明², 罗文广¹

(1. 广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 机器人定位是指通过机器人传感系统实时获得其所在的位置和航向信息, 是移动机器人完成复杂实际任务的基础。针对水中机器人, 介绍了基于水声、基于 GPS 和基于概率等几种典型的水下定位方法。分别描述了这些方法的实现原理, 并分析了它们的特点和存在的问题。最后, 展望了该方向今后的发展趋势和应用前景。

关键词: 水下机器人; 定位方法; 水声定位; GPS 定位; 概率定位

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Survey of Localization Methods for Underwater Robots

Shang Chengchao^{1,2}, Wang Wei², Xie Guangming², Luo Wenguang¹

(1. College of Electric & Information Engineering, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545006, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Robot localization means that the robot obtains its position and heading information through its sensor systems in real time, which is the start point of complex real applications for mobile robots. In this paper, for underwater robots, three typical localization methods including acoustic localization, GPS-based localization and probabilistic localization are introduced. Their implementation principles are described and their advantages and existing problems are analyzed, respectively. Finally, the direction of future development and application prospect are discussed.

Key words: underwater robot; localization method; acoustic localization; GPS-based localization; probabilistic localization

0 引言

移动机器人定位是指机器人通过自身感知系统从所在环境获取与定位相关的信息数据, 然后再经过一定的算法处理, 进而对机器人当前的位姿(位置和航向)进行准确估计的过程。Leonard 和 Durrant-Whyte 把机器人的导航问题归结为“我在哪(Where am I)”、“我要去哪(Where am I going)”及“我如何到达那里(How should I going there)”3个问题的回答^[1]。机器人为了完成导航任务, 必须解决运动控制(Motion Control)、地图构建(World Modeling)、路径规划(Planning)和定位(Localization)这4个问题^[2]。其中, 定位是移动机器人导航最基本的环节, 也是完成导航任务首先必须解决的问题。实现快速精确的定位是提高机器人性能的关键^[3]。目前, 在水下机器人定位方法的应用上, 根据机器人是否已知和自身位置相关的先验信息可分为2大类: 位置跟踪和全局定位^[4-7]。位置跟踪又称为相对定位, 是指机器人在已知初始位置的情况下确定自己的位置, 是机器人定位过程中最广泛的研究方法; 全局定位又称为绝对定位, 要求机器人在未知初始位置和没有任何对于自身位置的先验信息的情况下确定自己的位置。根据应用原理和算法的不同, 目前典型的水下定位方法有以下几

种: 基于水声的定位方法、基于 GPS 的定位方法和基于概率算法的定位。笔者主要从算法的理论基础出发, 对上述算法进行分析, 指出各自的优越性和存在的问题。

1 水声定位系统

水声定位技术是自主水下机器人进行水下定位的主要方式。由水下声发射接收器及其应答器相互作用构成的水下定位系统叫作水声定位系统^[8]。按照发射接收器声纳基阵的尺度或者应答器基阵间的基线长度分为3种类型(如表 1^[9]): 长基线定位系统(Long base line)、短基线定位系统(Short base line)、超短基线定位系统(Ultra short base line)。

表 1 水声定位系统分类

定位系统的类型	基线长度/m
超短基线(USBL)	< 10
短基线(SBL)	20~50
长基线(LBL)	100~6 000

1.1 长基线定位系统

长基线定位系统(LBL)包含2部分: 一是水下机器人所配置的应答器; 二是在水底或水面布设的已知位置的发射收发器, 也称为基点, 他们以一定的几何形状可以组成上百米到几千米之间的基线, 机器人一般位于基线所构成的基准阵之内, 通过测

收稿日期: 2013-07-17; 修回日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10972003); 广西车辆零部件先进设计制造重点实验室开放基金重点项目(2012KFZD03)

作者简介: 商承超(1984—), 男, 山东人, 硕士, 从事智能机器人研究。

量机器人所配置的收发器与应答器之间的相对位置，利用曲面交汇法可确定机器人的坐标。长基线定位系统的优点是可以在较大的水面上确定机器人的位置坐标，定位精度相对较高，可靠性好，数据刷新率高；缺点是系统构成复杂，基线阵布设需要高昂的费用，需要做大量的矫正工作，耗费大量的时间。为了得到较高的定位精度，必须提高工作频率，但是高频信号在水中衰减得较快，作用距离有限，不适合长基线定位。然而近年来广泛研究的水声扩频技术提高了作用距离和定位精度，大大扩展了长基线定位系统的应用领域^[10]。

1.2 短基线定位系统

短基线定位系统(SBL)的声基阵是由 3 个以上的布设在水下机器人底部的基点构成，和长基线定位系统不同的是，基点必须安装在水下机器人底部。通过测量声波在应答器与接收器之间传播的时间或时间差来确定斜率，系统根据基阵相对机器人坐标系的固定关系，结合从传感器所获取的观测值来确定水下机器人的位置信息和航向信息。

短基线定位系统的优点是系统组成简单，便于操作，不需要组建水下基线阵，测量精度高；缺点是需要在水下机器人底部布置 3 个以上的基点，要求具有良好的几何图形，需要做大量的校准工作，绝对定位精度主要依赖于 VRU、Gyro、DGPS 等外围传感器。另外，短基线定位系统的定位精度与水的深度和工作距离关系极大：水越深，工作距离越长，定位精度越低。

1.3 超短基线定位系统

超短基线定位系统(USBL)与短基线定位系统一样，其定位基点布置在船底并且集中做在一个阵列上，只是它的基线长度更短，利用声波入射角与到达各个水听器元件之间的相位差建立关系^[11]。

如图 1，4 个基点组成一个基阵，基点 1、3 的连线与基点 2、4 构成一个正交坐标系，基线长度一般小于等于半个波长，这样小的间隔排除了传统的脉冲包络检测和相对到达时间的测量，但能使声波入射角与到达各水听器基元间的相位差建立关系^[12]。

假设目标应答器位于 s 点， s' 为目标向正交坐标系的投影，声基阵中心为坐标原点。目标矢量为 os ，其方向余弦如式 (1)~式 (3)：

$$\cos \alpha = x / R \quad (1)$$

$$\cos \beta = y / R \quad (2)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

式中： α 、 β 分别为矢量 os 与 x 轴、 y 轴的夹角； R

为目标斜距。所以测得 α 、 β 和 R 值便可以确定目标位置。由于基阵的尺寸很小，在平面波近似下，如图 2，超短基线入射角与相位差间有如下关系：

$$\Delta \varphi_x = 2\pi ft = 2\pi fL / c = 2\pi D \cos \alpha / \lambda \quad (4)$$

$$\Delta \varphi_y = 2\pi ft = 2\pi fL / c = 2\pi D \cos \beta / \lambda \quad (5)$$

式中： $\Delta \varphi_x$ 、 $\Delta \varphi_y$ 分别表示 x 轴、 y 轴与基点之间的相位差； D 表示基元之间的距离； λ 表示波长。将式 (4)、式 (5) 带入式 (1)、式 (2)，可得目标应答器的水平坐标 x 和 y ：

$$x = \frac{R \Delta \varphi_x \lambda}{2\pi D} \quad (6)$$

$$y = \frac{R \Delta \varphi_y \lambda}{2\pi D} \quad (7)$$

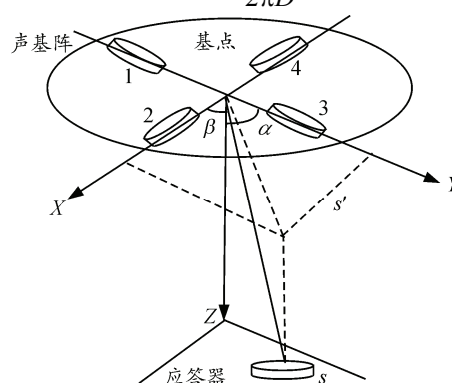


图 1 超短基线声学定位原理^[12]

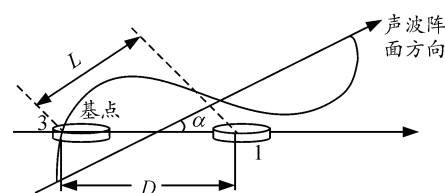


图 2 入射角和相位差的关系^[13]

超短基线定位系统集成度较高、尺寸小、轻便灵活、操作方便，但测量有效距离较近，系统安装后的方向校准需要非常准确，测量目标的绝对位置精度依赖于外围姿态传感器精度^[13]。

2 基于 GPS 的水下定位系统

水下 GPS 定位是国际上近几年发展起来的水下定位高新技术。系统主要由 GPS 卫星星座、GPS 定位浮标、差分 GPS 基准站(可选)、安装于水下机器人身上的收发器、陆基或船基数据处理与监控中心(数据控制中心)、水上无线电通讯、水下水声通讯构成。其中，GPS 定位浮标、GPS 卫星星座和差分基准站组成海面大地测量基准，作为水下定位的水面测量基线，实现对水下机器人所配备的收发器进行精确位置标定。数据控制中心和水下收发器之间的水声通讯可进行定位数据的相互传送，实现对

水下机器人的导航功能。水下收发机同水下载体进行数据交换^[14]。具体系统构成见图 3。

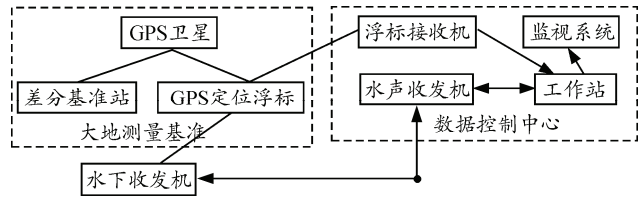


图 3 水下 GPS 定位系统构成示意图

GPS 水下定位系统的用法较多，但是从整体上可分为基于 GPS 定位浮标的长基线水下相对定位系统和基于单个 GPS 浮标的水下绝对定位系统 2 种方法^[15-16]。绝对定位是以地球的质心为参考点，水下确定 GPS 定位浮标的绝对位置。相对定位是用 2 个或多个 GPS 定位浮标分别放置在不同点，位置静止不动，通过一段时间的观测确定点间的相对位置关系，是目前 GPS 测量中定位精度最高的定位方法。当水下收发机接收到数据控制中心发送的定位请求信号时，激活水下收发机向 GPS 定位浮标发送定位信号。GPS 定位浮标收到信号后，对其进行精确的时延估计，将获得的结果数据和浮标姿态校准数据、GPS 定位数据等信息进行调制后，传送到数据控制中心。数据控制中心将 GPS 基准站差分信号与以上信息进行融合处理后，计算出水下机器人所处的位置，并可以实时、在线地显示水下机器人在大地测量坐标系的位置坐标^[16]。

2004 年 1 月，我国首套水下 GPS 高精度定位导航系统研制成功。试验表明，对于水深 45 m 左右的水域，系统的水下定位精度为 5 cm，测深精度为 30 cm，且测量误差不随时间累积。这是继美国和法国之后，我国科学家自主研制开发的功能强、精度高、自动化程度高的水下 GPS 定位系统^[17]。

3 基于概率定位

由于机器人所在的水下环境复杂多变，不仅应用在机器人身上的传感器本身存在误差，而且其周围环境所存在的噪声对其输出的数值也可能形成误差，这样就可能造成机器人在定位时，定位瞬时失效，为了解决这类问题，基于概率定位的方法近年来得到广泛的应用。

基于概率的定位方法都是基于贝叶斯概率定理的，具体方法有马尔可夫定位、多假设跟踪、卡尔曼滤波定位和粒子滤波定位。马尔可夫定位^[18]是针对多峰分布情况的定位方法，在解决多峰分布定位问题的时候，具有较好的鲁棒性，但是计算成本大，定位效率比较差。多假设跟踪^[19]利用混合高斯分布

表示概率分布的方法来解决多峰分布问题，能够进行全局定位，定位效率较好。卡尔曼滤波定位和粒子滤波定位^[20]是目前应用较多的水下定位方法。卡尔曼滤波可用在线性或线性化过程和测量系统，并且局限于高斯分布；而粒子滤波可在非线性系统和非高斯分布上进行应用。当传感器周围的噪声没有发生突变的时候，2 种定位方法都比较准确，但是当噪声变化较大的时候，卡尔曼滤波就会发生错误，而粒子滤波定位则显示出了较强的鲁棒性。鉴于此，笔者只对粒子滤波的理论进行详细的阐述。

3.1 贝叶斯滤波

基于概率定位的理论基础是贝叶斯滤波，它解决根据传感器测量信息估计一个动态系统的状态 x 的问题。机器人定位的动态系统包括机器人的当前状态和定位环境。状态是机器人的位姿，包括机器人在笛卡尔坐标系的位置坐标和航向角。机器人的运行环境是马氏的，这是因为通过传感器可以知道当前的状态，即过去和将来的数据是独立的，这就从理论上对贝叶斯滤波假设进行了论证。

贝叶斯滤波的关键是通过条件数据的状态空间估计后验概率密度。这里的后验概率密度称为信度^[21]，用式 (8) 来表示：

$$\text{Bel}(x_t) = p(x_t | d_{0:t}) \quad (8)$$

这里 x 代表状态， x_t 代表在时间 t 时刻的状态。 $d_{0:t}$ 代表从时间 0 时刻开始到 t 时刻结束所获得的数据。移动式机器人可以观测到 2 种类型的数据：一是观测数据，比如通过摄像头获得的数据；二是测量数据里程表数据，是通过机器人运动获得的数据。笔者用不同的字母来分别表示式 (8) 中的数据，更改后的公式如 (9) 所示：

$$\text{Bel}(x_t) = p(x_t | o_t, a_{t-1}, o_{t-1}, a_{t-2}, o_{t-2}, \dots, o_0) \quad (9)$$

式中： $\text{Bel}(x_t)$ 表示 t 时刻状态 x 的信度； o (observation) 代表通过传感得到的观测数据； a (action) 代表通过传感器得到的运动数据。为不失一般性，笔者设获得的观测数据和运动数据是按一定的次序分别得到的。可以看出，状态的信度是由系统从开始时刻到当前时刻的所有传感器输入和运动数据所决定的。

贝叶斯滤波通过递归方法得到信度值。初始时刻，笔者根据已知的初始状态来确定初始信度，如果初始状态未知，一般假设为均匀分布。

利用贝叶斯定律，可将公式 (8) 转换为式 (10)：

$$\text{Bel}(x_t) = \frac{p(o_t | x_t, a_{t-1}, \dots, o_0) \times p(x_t | a_{t-1}, \dots, o_0)}{p(o_t | a_{t-1}, \dots, o_0)} \quad (10)$$

根据马尔科夫的无后效性，对公式进行简化，最终公式为：

$$\text{Bel}(x_t) = \eta p(o_t | x_t) \int p(x_t | x_{t-1}, a_{t-1}) \text{Bel}(x_{t-1}) dx_{t-1} \quad (11)$$

式 (11) 即为贝叶斯滤波的递归公式，加入初始分布后，就构成了完整的贝叶斯滤波。

3.2 粒子滤波

虽然贝叶斯滤波很好地完成了递归演算，但是由于含有积分项，计算量比较大，就不能做到定位的实时性和有效性；因此，粒子滤波算法将信度用一系列分散的带有权重的粒子代替^[21]，如式 (12)：

$$\text{Bel}(x_t) \approx \{x^{(i)}, w^{(i)}\}_{i=1, \dots, m} \quad (12)$$

式中， $x^{(i)}$ 代表状态的可能值，称为粒子。每个状态(粒子)对应的权重 $w^{(i)}$ 称为重要性因子。这里粒子确定了一个离散概率分布，用来估计信度。初始分布表达系统的初始状态，当初始状态未知时，采用系统所有可能状态的均匀分布，每个粒子的权值均为 $1/m$ ，即为等概率分布。

初始分布确定后，像贝叶斯滤波一样，粒子滤波也采用递归实现改变分布，表示不同的系统状态。针对每个粒子，根据 t 时刻的运动数据 a_t 和上一时刻的分布 x_{t-1}^i ，由 $p(x_t | x_{t-1}, a_{t-1})$ 得到一个假设的分布 x_t^i ，再由 x_t^i 和当前观测值 o_t ，得新的权重 w_t^i 。其次，重要性重采样。根据假设分布 x_t^i 和权重重新分布粒子的状态，得到 t 时刻的分布，新的分布去掉低概率(低权重)的粒子，增加高概率(高权重)粒子；最终，粒子集收敛到最有可能的系统状态，此时的数据就是通过粒子滤波所得的机器人最终位置。

以基于概率的定位算法为核心，对不同的传感器所获得的和环境信息相对应的数据进行处理，这种定位方式得到了大量的应用，不管在小区域水域，还是在海上运行的航行器的应用都获得了不错的定位效果，不过这种定位算法的精度依赖于传感器所获得的数据的精确度，对硬件的要求较高。

4 其他定位方法

除了上述几种比较成熟的常用方法，研究者还对其他方法做了不少的尝试，有的可以说是具有里程碑意义的水下定位算法，主要有：

1) 基于地图的定位方法^[22-23]。现在用得比较多的一种方法是同时定位与地图构建(SLMA)。SLMA 允许机器人在完全未知的环境中，利用自身配置的传感器从外界环境获取数据，来对环境进行感知，提取环境中有用的信息，利用这些信息在配合其他的算法，确定数据和环境的关系，从而达到定位的

目的，进行定位的同时，对环境地图进行构建。

2) 基于视觉的定位方法^[24]。基于训练，利用马尔科夫随机场模型得到训练统计，然后运用图像增强算法得到高质量的水下图像，配置三目摄像头，利用图像配准与 IMU(惯性导航单元)结合，得到位置更新。与此同时，根据第一次行走路线构建地图，方便水下机器人进行位置获得和场景的再检测。

3) 基于人工侧线的定位方法^[25]。受自然界鱼类身上的侧线的启发，在水下机器人身上利用传感器阵列组成人工侧线。利用人工侧线得到的数据来得水下机器人在水中的位置。定位问题相当于解决高斯-牛顿算法解决一个非线性估计问题。

4) 基于多传感器融合的定位方法^[26-27]。环境中，单一的传感器设备，如声纳、摄像头等，都无法满足高精度自主导航的要求，而采用多传感器融合的方法则成为一种比较好的选择。把得到的传感器信息经过加权平均法、Kalman 滤波、Bayes 估计等方法进行处理，最终得到机器人的位置。

5) 基于电场的水下定位方法^[28]。通过放置在水中的电场发射装置和传感器装置，根据水中不同地点的阻抗不同，结合粒子滤波定位算法，对机器人的位姿进行估计。

5 总结与展望

随着水下机器人的蓬勃发展，关于水下机器人自主定位的方法已有了比较深入的研究。目前所有的方法各有优缺点，主要包括：

1) 水声定位系统的技术研究和应用对水下机器人定位有着重要的作用。但是，声音在水中传播时所产生的多径效应、起伏效应和传播损失，成为困扰定位的关键性问题；水声定位系统在布设、校准和维护等方面都比较困难，费时耗资，灵活性差，不能机动，作用范围有限，这些问题能否解决好成为能否实现快捷、精确地基于水声定位的关键。将声学定位系统和传感器进行组合，以获取更多关于机器人在水下的信息，成为声学定位发展的未来趋势。水下 GPS 定位技术处于当前水下定位技术的前沿，目前比较多的是和水声定位系统进行结合，将 GPS 水面定位技术向水下延伸，实现水下的精确定位。不同定位系统进行联合，起到互补的作用，提高定位的效果，为以后的发展提供研究方向，比如：水声定位和基于概率的定位两者相结合，可以弥补水声定位中数据短时间内精度降低的问题，提高定位的鲁棒性。

2) 在小型机器人上应用较多的是基于粒子的定位方法，这种定位方式通过将传感器所获取的数

据与粒子定位算法相结合,更具有鲁棒性。但由于机器人位于水下环境,有些传感器获取到的数据无法保证正确和有效,对获取到的数据怎么进行识别和有效处理,成为实现定位的主要工作。但目前这种方法大多仅局限于小区域水中进行研究,怎么在较大的水域进行有效定位也成为今后研究的方向。

3) 由于水下的环境复杂多变,仅仅依靠单一的传感器和单一的算法,不能有效地完成水下定位。近年来,多传感器融合结合多经典的定位方法,成为了研究者们追逐的方法,也取得了不错的成效。该方法从生物学的角度,把水下生物在水中的定位机理应用到水下机器人身上,最终进行定位。

6 结束语

笔者介绍了 3 种比较成熟和经典的水下定位方法,指出了其定位的理论基础、存在问题和发展趋势。同时,笔者还介绍了几种近年来出现的创新型定位方法,对研究水下定位具有一定的指导意义。降低定位过程中对资源的需求,以易于实现为基础,提高定位的精度和实时性,是水下定位的发展趋势。

参考文献:

- [1] Leonard J, Durrant-Whyte H F. Mobile robot localization by tracking geometric beacons[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 7(3): 376-382.
- [2] Salichs M A, Moreno L. Navigation of mobile robots: open questions[J]. Robotica, 2000, 18: 227-234.
- [3] 王卫华. 移动机器人定位技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [4] Borenstein J, Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(6): 869-880.
- [5] Burgard W., Derr A., Fox D., et al. Integrating global position estimation and position tracking for mobile robots: the Dynamic Markov Localization approach[C]// Proceedings 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: IEEE, 1998: 730-735.
- [6] Chenavier F, Crowley J. Position estimation for a mobile robot using vision and odometry[C]// Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice: IEEE, 1992: 2588-2593.
- [7] Schiele B., Crowley J L. A comparison of position estimation techniques using occupancy grids[C]// Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, CA, p.: IEEE, 1994: 1628-1634.
- [8] 孙思萍. 水声定位技术的应用. 海洋技术[J]. 海洋测绘, 1993, 12(4): 30-34.
- [9] Keith Vickery. Acoustic positioning systems-A practical overview of current systems[C]// Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles. Cambridge, MA: IEEE, 2003: 5-17.
- [10] 李守军, 包更生, 吴水根. 水声定位技术的发展现状与展望[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 131-135.
- [11] 李玉祥. 长程超短基线定位系统水声应答器电子舱研制[D]. 哈尔滨工程大学工学硕士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [12] 冯守珍, 吴永亭, 等. 超短基线声学定位原理及其应用[J]. 海岸工程, 2002, 21(4): 13-18.
- [13] 庞雷. 高精度水下定位系统[D]. 西北工业大学硕士学位论文, 西安: 西北工业大学, 2007.
- [14] 王泽民, 罗建国, 陈琴仙, 等. 水下高精度立体定位导航系统[J]. 声学与电子工程, 2005, 78(2): 1-3.
- [15] 郭传海. 基于 vxWorks 的 AUV 组合导航系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [16] 李精文. GPS 水下定位系统研究[C]. 成都: 世纪之交的中国导航技术发展研讨会, 1998: 101-106.
- [17] 863 计划水下 GPS 高精度定位系统课题组. 我国首套水下 GPS 高精度定位导航系统简介[J]. 中国水利, 2004, 53-45.
- [18] Fox D. Markov localization: A probabilistic framework for mobile robot localization and navigation[D]. PhD thesis, Germany: Dept. of Computer Science, University of Bonn, 1998.
- [19] Jensfelt P. Approaches to mobile robot localization in indoor environments[M]. Tekniska högsk., 2001: 100-140.
- [20] Nak Yong Ko, Tae Gyun Kim. Comparison of Kalman Filter and Particle Filter Used for Localization of an Underwater Vehicle[C]// 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Daejeon. Korea: IEEE, 2012: 26-29.
- [21] Thrun S, Fox D, Burgard W, et al. Robust Monte Carlo localization for mobile robots[J]. Artificial intelligence. 2001, 128(1): 99-141.
- [22] Leonard J J, Durrant-Whyte H F, Cox I J. Dynamic map building for an autonomous mobile robot[J]. The International Journal of Robotics Research. 1992, 11(4): 286-298.
- [23] Leonard J J, Durrant-Whyte H F. Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot[C]. Proceedings of 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Osaka: IEEE, 1991: 1442-1447.
- [24] Carreras M, Ridaou P, Garcia R, et al. Vision-based localization of an underwater robot in a structured environment[C]// Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003: 971-976.
- [25] Abdulsadda A T, Tan X. Localization of a moving dipole source underwater using an artificial lateral line[C]. International Society for Optics and Photonics, 2012: 9-29.
- [26] 周华. 多传感器融合技术在移动机器人定位中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [27] Hsieh H, Lee C, Kuo C. Localization of an underwater robot with inertial sensor fusion models[C]. Taichung: IEEE, 2010: 1562-1567.
- [28] Solberg J R, Lynch K M, MacIver M A. Robotic electrolocation: Active underwater target localization with electric fields[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma: IEEE, 2007: 4879-4886.