

超小型水下机器人智能定位系统

高延增, 叶家玮, 陈远明, 梁富琳

(华南理工大学 船舶与海洋工程系, 广东 广州 510641)

摘要: 提出一种新的超小型水下机器人智能定位系统. 融合短基线定位声纳、电子罗盘、 X/Y 倾角传感器和深度传感器组成超小型水下机器人定位的硬件系统, 使用基于构件的方法开发了针对超小型水下机器人定位系统的水上控制计算机三维虚拟显示软件. 使用马尔可夫自定位算法在实测定位声纳信号的间隙推算水下机器人的位置, 提高定位速度, 使其与姿态传感器同步. 设计了定位算法有效性的测试实验, 结果证明算法有效.

关键词: 水下机器人; 马尔可夫自定位; 软件体系结构; 构件

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Intelligent localization-system for subminiature underwater-vehicle

GAO Yan-zeng, YE Jia-wei, CHEN Yuan-ming, LIANG Fu-lin

(Naval Architecture and Ocean Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

Abstract: A new intelligent localization system is developed for the subminiature-underwater-vehicle(SUV). In this system, we combine the short-base-line(SBL) localization sonar, the electronic compass, the X/Y angle-sensor and the depth sensor to make up the hardware architecture for the SUV localization system; and develop the component-based 3D virtual display software system for the land-based positioning computer. In the time-interval between SBL signal-measurements, the Markovian-self-localization algorithm is employed to calculate the position of the SUV. This accelerates the localization process, and makes it in synchronization with the operation of the posture sensor. Experimental tests are designed and performed for this localization algorithm; results show the effectiveness in application.

Key words: underwater vehicle; Markov localization; software architecture; component

1 引言(Introduction)

水下机器人(UV)在海洋开发、水下作业、海底探测等领域具有广泛的应用前景, 它涉及声纳技术、导航定位技术、自控技术和机器人系统集成技术等多学科领域. 其工作环境较陆上机器人更为恶劣, 获取环境信息更困难, 但周围的环境信息和自身的位置信息是机器人作业的基础, 必须对其准确定位. 因此, 定位问题一直是水下机器人的关键问题之一, 其精度和速度直接影响后续地图构建及路径规划的准确度, 成为研究人员的巨大挑战.

UV定位要确定两方面内容: 1) 位置信息, 即水UV的位置坐标 (x, y, z) ; 2) 姿态信息, 即UV的航向角 (α) 、俯仰角 (β) 、横滚角 (γ) . 目前, 最常用的定位设备是声纳, 由水听器和应答器组成, 最重要的指标包括定位的精度、速度和可靠性^[1~3]. 出于成本和体积的考虑, 超小型水下机器人(SUV)的定位一般采用短基线定位声纳(SBL). 由于存在水底混响、机器人的机械噪声和SBL水听器安装尺寸误差等, 使SBL的速度和可靠性难以保证^[4]、SBL的水听器与

应答器之间的连接容易出现异常. 另外, SBL的软硬件系统独立于SUV系统之外, 特别是计算机监控软件的独立不利于SUV系统将SBL信号与其它位姿传感器信号进行融合, 给SUV的后续工作造成不便.

本文结合SUV位姿标定数学模型, 利用马尔可夫自定位算法在实测的SBL及姿态传感器信号基础上推算SUV的位置, 提高定位速度. 文中给出模块化的SUV智能定位系统硬件设计方案、基于构件方法的上位机软件系统架构, 并设计了SUV定位算法有效性的验证方案, 实验结果表明算法可行.

2 软硬件集成方案(Integrated program for software & hardware system)

2.1 模块化的硬件架构(Modular hardware architecture)

系统构架如图1, 水下部分主要由位姿控制模块、观通模块和定位系统模块组成; 水上部分由监控计算机、水上控制电路和观通系统的水上处理部分组成. 水上控制电路为双处理器结构, 主处理

器(Arm7)主要完成与水下载体的CAN现场总线通信、控制设备电压检测、为水下载体与主控微型计算机进行数据交换提供传输接口等任务, 辅助处

理器(基于MCS-51内核的增强型STC系列8位单片机)则用于接收GPS模块信息及对扩展设备的控制等任务.

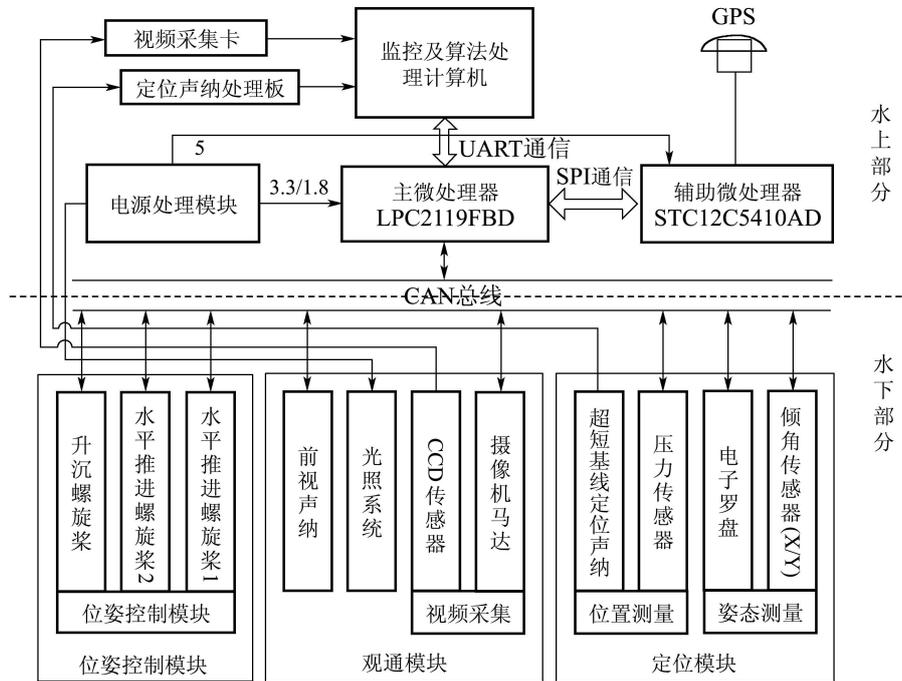


图1 SUV智能定位系统硬件结构框图

Fig. 1 Hardware architecture of SUV localization system

2.1.1 定位模块(Localization module)

采用TI-C2数字双轴倾角传感器测量 β 和 γ , 电子罗盘和压力传感器分别用来测定艏向角和深度 z , 其中压力传感器通过机器人所处位置的压力与水面压力差来确定其深度, 因此在机器人下水以前要进行标定. 短基线定位声纳由3个水听器和一个应答器组成, 定位声纳的水下定位信号与水上的GPS信号相结合可更精确地确定水下机器人的经纬度信号. 但由于机器噪声和水底混响等干扰的存在使得定位声纳的水听器与应答器连接受影响, 定位速度无法满足水下机器人作业的实时性要求, 本文采用智能算法对两个实测定位信号间的位置信号进行推算, 详见第4部分. 所有水下位姿测量传感器信号被打包后通过CAN总线与水上控制器通信, 而水上控制器再将其解析为UART协议包后送给水上监控计算机.

2.1.2 观通模块(Observation & communication module)

观通模块为水下机器人的操作人员提供水下环境信息以操纵机器人在目标路径上避开障碍物, 有光视觉和声视觉两种方式. CCD传感器和

摄像机马达为光学视觉系统的主要部分, 摄像机马达用来控制摄像机的旋转、伸缩等动作, 采用PWM方式控制, PWM控制信号由辅助微处理器给出; 视频信号直接传给水上监控计算机的视频采集卡. 由于水下光线较弱, 配备了照明系统. 声视觉系统采用Tritech公司的MicronDST避障声纳, 以应对水质浑浊的工作环境. 声纳信号通过RS232协议传输, 优化了它的上位机接收程序, 滤波特性得到提高^[5].

2.1.3 位姿控制模块(Pose control module)

所有推进螺旋桨电机均采用PWM控制, PWM信号由主微处理器给出. 通过改进水下机器人机械部分的不足并使用包含智能闭环控制算法的软件系统提高其鲁棒性和自适应性^[6,7].

2.2 基于构件的定位系统软件设计(Component-based localization system design)

2.2.1 设计要求(Design guidelines)

定位作为水下机器人路径规划、水底三维重构等的基础, 其软件系统应具备以下特点: 1) 实时性. 要求软件消耗尽量小的计算时间, 能够高效、快速地融合水下机器人各种位姿测量传感器的数据;

2) 可协作性. 水下机器人作业任务多变、结构复杂, 需要不同模块间的协同合作. 因此需要定位软件部分提供良好的接口机制, 能与其他模块良好协作; 3) 可重用性. 定位软件系统中的技术构件可方便的装配到其它需要此技术构件的功能模块中, 达到复用目的; 4) 可伸缩性. 对于定位系统, 可随时添加或减少一个或多个位姿测量传感器而不影响其它传感器的正常工作.

2.2.2 定位系统软件设计(Software design of localization system)

定位系统的软件体系可按工作环境分为水上和水下部分, 也可按硬件环境分成PC机监控系统和微控制器嵌入式处理系统. 依据设计要求, 采用

构件化的软件设计方案将智能定位软件系统设计如图2所示. 构件是指可重复地用于构造其他软件系统的软件单元, 可以是被封装的对象、功能模块或软件系统模块等^[8].

嵌入式系统分为水下机器人上的控制系统、水上控制板上的控制系统和定位声纳水听器信号的水上处理部分. 水下嵌入式系统的主要工作是完成传感器信号的A/D转换、PWM电机控制信号的最终生成、Flash的管理等; 水上控制板嵌入式系统的主要任务是连接水下机器人与水上监控计算机, 与水下机器人的通信通过CAN总线, 而与计算机的通信是UART 格式的; 定位声纳的水上处理部分主要是针对3个水听器信号的处理.

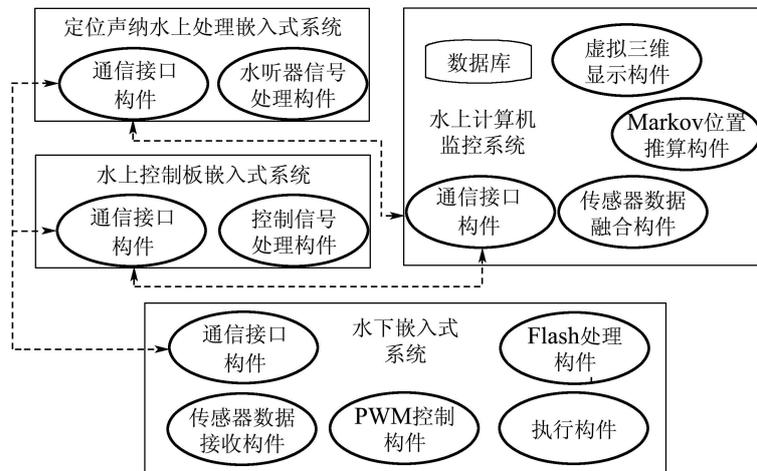


图2 基于构件的水下机器人定位软件系统结构

Fig. 2 Software structure of SUV localization system

水上计算机监控系统的3个主要构件是传感器数据融合构件、位置推算构件和虚拟三维显示构件: 1) 传感器数据融合构件. 我们的超小型水下机器人是以VideoRay型水下机器人为母体设计改造的, 加载了电子罗盘、X/Y倾角传感器、压力传感器和SBL. 各传感器的采样速率、误差率不一致需要采用有效方法融合; 2) 位置推算构件. 由于SBL的速率过慢, 所以在两个实测信号之间插入马尔可夫位置推算构件的推算结果可以提高定位的速度满足实时性要求; 3) 虚拟三维显示构件. 将水下机器人的运行环境在计算机上虚拟显示, 根据声光学观通系统的成像结果进行三维重构, 将重构的结果虚拟显示, 然后根据定位结果将水下机器人模型实时插入到虚拟环境中, 方便操作人员对水下机器人的操控.

3 马尔可夫自定位算法(Markov localization)

3.1 水下机器人运动数学模型(Motion mathematical model of SUV)

惯性坐标系中UV的状态由速度向量 v 、位姿向量描述(见图3). 六自由度水下机器人在惯性坐标系下的空间动力学方程为^[9]:

$$\begin{cases} M\dot{v} + C(v)v + F_D(v_r) + G(\eta) = \\ \tau_c + \tau_{cable} + \tau_{prop}, \\ \eta = J(\eta)v. \end{cases} \quad (1)$$

其中: M 为包括附加载体的惯性矩阵; $C(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为向心力和科氏力矩阵(包括载体产生的向心力和科氏力); F_D 为水动力阻力和升力矩阵, v_r 为UV相对水流的速度 $v_r = v - v_c$; $G(\eta) \in \mathbb{R}^6$ 是包含重力及浮力分量的恢复力; $\tau_c/\tau_{cable}/\tau_{prop}$ 分别表示水流力、控制电缆的干扰力及螺旋桨的推

进力. 式(1)是标准的潜艇运动方程去掉与舵相关的受力项后得到的. 若以UV的重心作为物体坐标系的原点, 可以得到其运动轨迹方程^[10]:

$$\begin{cases} \dot{x}_g = \dot{x}_o = \mu \cos \alpha \cos \beta + \\ \nu (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma) + \\ \omega (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma), \\ \dot{y}_g = \dot{y}_o = \mu \cos \beta \sin \gamma + \\ \nu (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) + \\ \omega (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma), \\ \dot{z}_g = \dot{z}_o = -\mu \sin \beta + \nu \sin \alpha \cos \beta + \omega \cos \alpha \cos \beta, \end{cases} \quad (2)$$

$$L(k+1) = L(k) + \dot{L}, \quad (3)$$

其中: 下标g, o分别表示重心和物体坐标系原点; $[\mu, \nu, \omega]$ 为UV的速度向量在x, y, z坐标轴上的投影分量.

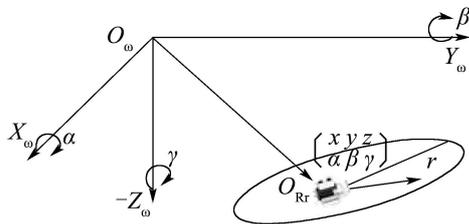


图3 超小型水下机器人定位
Fig. 3 Localization of SUV

3.2 自定位算法(Localization algorithm)

水下机器人位置推算即推算水下机器人在全局空间的概率分布问题, 满足马尔可夫性. 使用马尔可夫定位算法, 机器人可在完全不知道自己位置的情况下通过传感器数据和运动模型来估计自己的位置^[10]. 设水下机器人的最大速度为 V_{max} , 则从 $k-1$ 到 k 时刻水下机器人位置分布的全局空间是以 $k-1$ 时刻的水下机器人所处位置为球心, V_{max} 为半径的球内, 具体位置与 $k-1$ 到 k 时刻内水下机器人的姿态、速度有关. 马尔可夫定位有基于网格的和基于拓扑地图的两种实现方法, 本文采用基于网格的方法, 以机器人尺寸的1/10为单元格将全局空间等分. 水下机器人移动时, 概率分布就由运动模型更新; 若SBL连接成功, 概率分布就由新的SBL结果来更新, 以此降低机器人位姿的不确定性. 以 L 表示位姿向量, 以 $Bel(L = l)$ 表示水下机器人在 l 处的信度, 马尔可夫自定位的更新公式为^[11]:

$$Bel(L_k = l) \leftarrow \sum P(L|L', \alpha_k) Bel(L_{k-1} = l'), \quad (4)$$

$$Bel(L_k = l) \leftarrow \alpha_k P(d|l) Bel(L_{k-1} = l). \quad (5)$$

其中: α 为均一化常数, 使得所有概率和为1;

$P(d|l)$ 为 l 处SBL连接成功的概率; 式(4)为运动模型, 式(5)为传感器模型. 算法流程如图4^[11~13]:

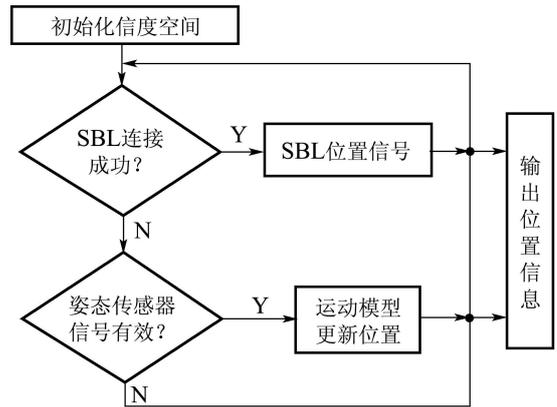


图4 马尔可夫自定位算法流程图
Fig. 4 Flow chart of Markov self-localization algorithm

4 定位实验(Localization experiment)

4.1 实验方案(Experimental program)

在华南理工大学船模实验池(长120 m×宽4 m×深4 m)中进行定位算法的验证(见图5). SUV的安装方式如图5(a)所示, 它可以在X/Y/Z3个方向上移动且速度可控; 短基线定位声纳的3个水听器固定在船模实验池的池壁上.

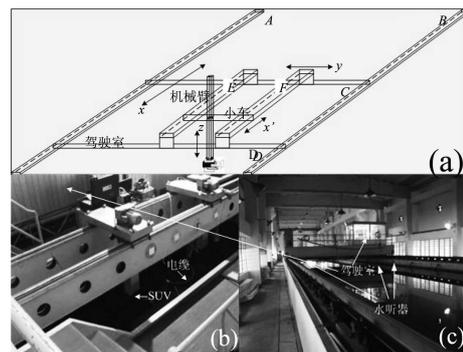


图5 SUV定位实验方案

Fig. 5 Experimental program for SUV localization

4.2 实验结果分析(Experimental analysis)

图6为SUV智能定位系统操作界面, 左方为用户交互区, 可设置SUV智能定位系统的测量属性; 右方为SUV运行环境的三维虚拟显示区, 用小长方体模拟SUV, 显示其在水下三维环境中的运动(其中点O为设定的世界坐标系原点). SUV的最大速度为1 m/s, 取初值 $[\nu_0, \mu_0, \omega_0]$ 在区间 $[-1, 1]$ 内并服从正态分布. 定位效果如图7所示(其中, (a)(b)分别为未加入马尔可夫智能推算算法的SBL定位结果, (c)(d)为加入马尔可夫算法后的结果), 姿态及深度传感器的采样周期为0.5 s, 马尔可夫定位算法寻优速度小于0.5 s, 满足SUV对

定位速度的要求. 本文所提方法是提高SUV中使用SBL的定位速度的有益尝试, 可通过进一步优化SUV的运动模型、在马尔可夫自定位算法中加入模糊推理机制等措施优化定位算法提高定位精度.

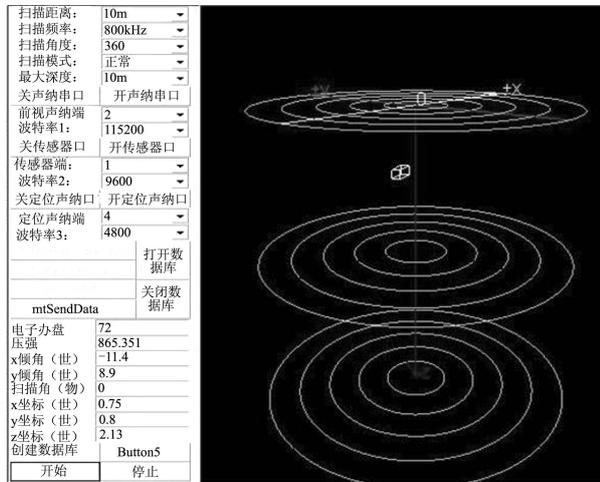


图6 上位机软件系统运行效果图

Fig. 6 Operational effect of SUV localization system software

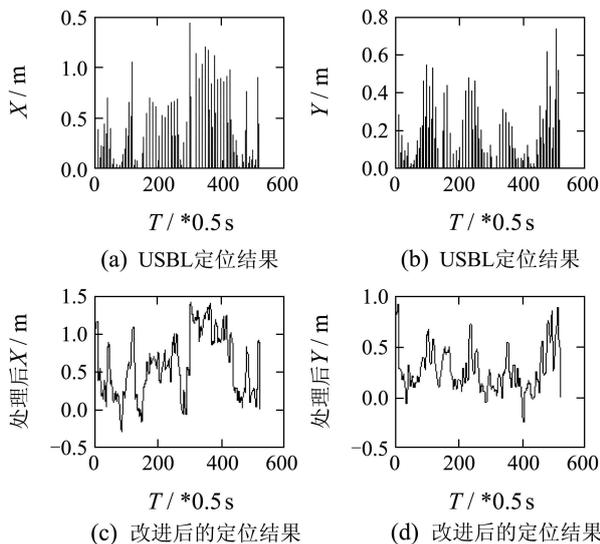


图7 SUV定位结果

Fig. 7 Experimental result of SUV localization

5 结论(Conclusion)

介绍了超小型水下机器人智能定位系统. 模块化的硬件搭建方案使定位系统具有可扩展性, 部分模块出现异常时不影响其它模块的工作; 分析智能定位系统要求的基础上给出基于构件的软件系统设计方法, 基于构件的方法使系统具有伸缩性、协作性和重用性. 使用马尔可夫定位算法推算SBL实际测量信号间隙SUV的平面坐标值(X/Y), 提高定位速度. 设计了定位效果测试实验, 结果表明系统性能符合要求.

参考文献(References):

- [1] BEAUJEAN P, MOHAMED A, WARIN R. Acoustic positioning using a tetrahedral ultrashort baseline array of an acoustic modem source transmitting frequency-hopped sequences[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(1): 144 – 157.
- [2] PAN L, BONG J, HYUN T C, et al. An integrated navigation systems for underwater vehicles based on inertial sensors and pseudo LBL acoustic transponders[C]//*Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*. Washington: IEEE, 2005, 1: 555 – 562.
- [3] 俞建成, 李强, 张艾群, 等. 水下机器人的神经网络自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(1): 9 – 13. (YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun, et al. Neural network adaptive control for underwater vehicles[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 – 13.)
- [4] CHEN H. In-situ alignment calibration of attitude and ultra short baseline sensors for precision underwater positioning[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(14/15): 1448 – 1462.
- [5] 高延增, 叶家玮, 陈爱国. 用于水下机器人的主动侧扫声呐图像预处理技术[J]. *船海工程*, 2009, 38(2): 97 – 100. (GAO Yanzeng, YE Jiawei, CHEN Aiguo. Pre-processing techniques for the side scan sonar images used in ROV[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2009, 38(2): 97 – 100.)
- [6] 宋鑫, 叶家玮, 梁富林, 等. 超小型水下机器人改进设计及其智能控制系统[J]. *机器人*, 2007, 26(6): 596 – 600. (SONG Xin, YE Jiawei, LIANG Fulin, et al. Improved design of super-mini underwater robot and its intelligent control system[J]. *Robot*, 2007, 26(6): 596 – 600.)
- [7] SONG X, YE J, WU L. Application of the integral sliding mode controller with fuzzy logic to submersible vehicle[J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2007, 3(4): 897 – 906.
- [8] YUNHO J, CHONG-HO C. Minimization of blocking time in component-based software architecture for control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(6): 683 – 693.
- [9] DE E C, MARUYAMA N. Intelligent UUVs: Some issues on ROV dynamic positioning[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 214 – 226.
- [10] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000. (JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Ditang. *Unmanned Underwater Vehicles*[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2000.)
- [11] FOX D, BURGARD W, THRUN S. Active Markov localization for mobile robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, 25(3/4): 195 – 207.
- [12] 吴庆祥, DAVID B. 可移动机器人的马尔可夫自定位算法研究[J]. *自动化学报*, 2003, 29(1): 154 – 160. (WU Qingxiang, DAVID B. A study on Markov localization for mobile robots[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(1): 154 – 160.)

作者简介:

高延增 (1982—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为水下机器人定位与观通系统, E-mail: gaoyanzeng@foxmail.com;

叶家玮 (1947—), 男, 博士生导师, 目前研究方向为水下机器人、先进制造技术、测量技术和人工智能技术应用、水下机器人及人工智能, E-mail: yjw4360@163.com;

陈远明 (1979—), 男, 博士, 目前研究方向为先进制造技术及人工智能技术应用, E-mail: scutcym@163.com;

梁富琳 (1981—), 男, 工程师, 目前研究方向为水下机器人的结构设计及其控制系统, E-mail: lianglinching@126.com.