

无缆自治水下机器人运动控制技术研究^①

王建国^② 孙玉山 万 磊 姜大鹏 常文田

(哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要 针对无缆自治水下机器人满足不同任务要求下的运动控制进行了研究。引入极大似然参数估计算法获取水下机器人水动力系数,并在此基础上搭建起 6 自由度运动仿真系统。通过改进传统水下机器人体系结构中的推力器布置方式、推力分配策略、运动控制方法和船位推算算法,使得无缆自治水下机器人的运动控制系统在保持原有精确定位功能的同时也能完成远距离高速航行等任务,从而解决了高速航行给无缆自治水下机器人带来的一系列问题。海上进行的速度控制、位置控制和长航程导航试验,验证了无缆自治水下机器人在所提出的运动控制系统控制下可以满足任务需求,具有一定的工程应用价值。

关键词 无缆自治水下机器人(AUV),运动控制,嵌入式系统,体系结构,推力分配,船位推算

0 引 言

无缆自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)在军事应用和海洋开发方面有着极为广阔的应用前景,已经成为完成多种水下作业任务的重要工具^[1]。AUV 是典型的强非线性、时变性的高度耦合的动力系统,其水动力系数通常很难准确测定或估计^[2,3]。较准确地获得 AUV 的水动力系数,建立起合理的运动模型^[4],保证其具有良好的运动控制能力,对于 AUV 完成作业任务及提高自身生命力^[5]都显得非常重要。低速航行的 AUV 的各个自由度的耦合效应并不明显,控制系统设计时一般忽略各个自由度之间的相互影响^[6]。国内外设计的 1m/s 航速的水下机器人都属于低速航行 AUV。远距离航行的 AUV 其航速至少为 2m/s,由于耦合效应的存在,纵向运动对其它各自由度以及推进系统都产生了较大的影响^[7]。

本文主要研究 AUV 满足不同任务要求下的运动控制技术。在采用极大似然参数估计算法^[8]获得 AUV 水动力系数的基础上,建立起运动仿真系统。通过改进传统水下机器人体系结构中的推力器布置方式、推力分配策略、运动控制方法和船位推算算法,使得 AUV 的运动控制系统在保持原有精确定位功能的同时也能完成远距离高速航行等任务,从而

解决了高速航行给 AUV 带来的一系列问题。海上试验结果验证了 UV-5 AUV 采用所提出的运动控制系统可以满足任务要求。

1 UV-5 AUV 介绍

本文的研究对象是由哈尔滨工程大学于 2008 年研制的 UV-5 AUV^[9]。图 1 为 UV-5 AUV 的外形图。该 AUV 由运动控制系统、路径规划系统、导航系统、视觉系统、应急处理系统和监控系统等组成。除了监控系统以外,其它系统均已嵌入到机器人体内。图 2 为 UV-5 AUV 的系统组成。

UV-5 AUV 搭载有光纤罗经(fiber optical gyrocompass, FOG)、多普勒测速仪(doppler velocity log, DVL)、

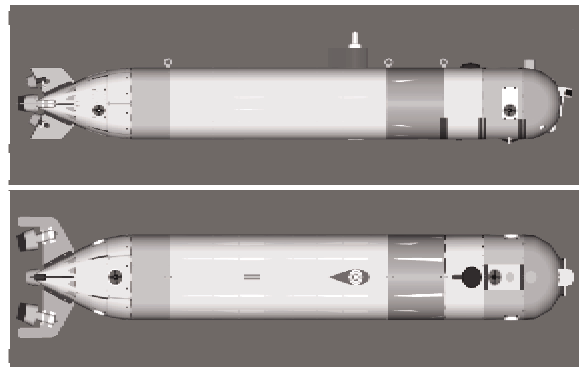


图 1 UV-5 AUV 外形图

^① 863 计划(2008AA092301),国家自然科学基金(50579007)和中国博士后科学基金(20080440838)资助项目。

^② 男,1983 年生,博士;研究方向:水下机器人智能运动控制、故障诊断与容错控制;联系人, E-mail: wjg103@126.com (收稿日期:2009-10-27)

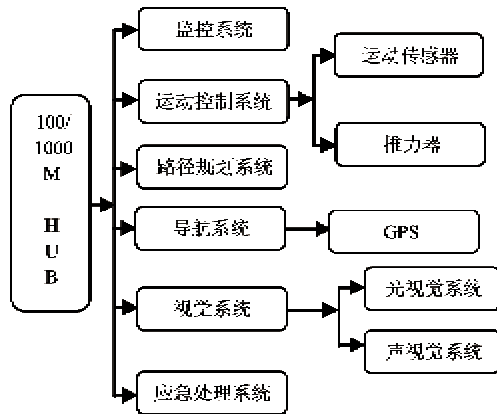


图2 UV-5 AUV 系统组成

GPS、深度计等以获取 AUV 的运动信息,执行机构采用 8 个推力器,它们根据其作用可分成 4 组,即水平面主推力器、垂直面主推力器、侧向推力器和垂向推力器,每组有两个推力器。水平面和垂直面主推力器采用导管推力器,侧向和垂向推力器采用槽道推力器。采用此布置方式后,UV-5 AUV 低速时采用槽道推力器实现精确定位,高速运动情况下则采用推力减额较小的导管推力器来控制运动姿态。

UV-5 AUV 的主要功能是为运动控制、路径规划、导航、故障诊断等技术提供一个试验平台,另外可完成海底沉船探测、海底管道探测以及海洋环境感知等。

2 仿真系统的搭建

2.1 AUV 运动建模

考虑到 AUV 一般存在三个对称的平面,故 AUV 的运动模型可以简化为^[10]

$$M\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{I}_v(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{A}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{F}_S = \mathbf{F}_T \quad (1)$$

式中, M 为质量阵,包括质量以及附加质量, $\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]$ 为速度矩阵, u 、 v 、 w 分别为纵向、横向、垂向的线速度, p 、 q 、 r 分别为横摇、纵摇以及摇艏的角速度。 $\mathbf{I}_v$ 和 $\mathbf{A}$ 分别是惯性和黏性水动力系数矩阵。 $\mathbf{F}_S$ 表示重力浮力等静态力(矩)在艇体坐标系下的分量, $\mathbf{F}_T$ 为推力器所产生的 6 个自由度上的推力(矩)。

实际的 AUV 一般都是上下、左右对称,某些鱼雷型的 AUV 前后也几乎对称,因此根据这些特点可以得到如下的简化系数矩阵:

$$\mathbf{M} = \text{diag}[m - X_u, m - Y_v, m - Z_w, I_x - K_p, I_y - M_q, I_z - N_r] \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{u}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{v}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{u}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{u}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, m 为 AUV 的质量, X_u 、 Y_v 等为惯性水动力系数。由式(1)、(2)和(3)可知,只要已知当前时刻 AUV 的运动状态和作用在其上的外力(矩),就能解算出下一时刻的运动状态,从而构建出 AUV 的运动仿真系统。

2.2 水动力系数的获取

本文引入极大似然参数估计算法^[8]用于 AUV 的模型辨识,利用获取的 AUV 辨识试验数据得到 AUV 的回转水动力系数。其它自由度的水动力系数因传感器配置和试验场地的限制,暂时很难通过系统辨识的方法获得,本文参考文献[11]的方法,通过经验公式估计得到。

利用参考文献[8]介绍的极大似然参数估计算法辨识得到 AUV 回转水动力系数并采用近似公式及图谱估算得到其它自由度的水动力系数。表 1 为获得的 UV-5 AUV 的水动力系数。

表1 UV-5 AUV 水动力系数

水动力系数符号	水动力系数值	水动力系数符号	水动力系数值
X_u	-1.53×10^{-3}	X_{uu}	-6.52×10^{-3}
X_w	8.12×10^{-2}	X_{wq}	-7.64×10^{-2}
Y_v	-6.87×10^{-2}	Y_{vp}	5.15×10^{-2}
Y_r	3.56×10^{-2}	Y_v	-8.33×10^{-2}
$Y_{v v }$	-0.1544	Z_w	-6.207×10^{-2}
Z_{wp}	6.69×10^{-2}	Z_q	1.089×10^{-2}
Z_w	-2.858×10^{-2}	Z_{wv}	-0.2185
N_r	-3.341×10^{-3}	N_{pq}	-1.901×10^{-3}
N_r	-3.41×10^{-3}	N_v	-3.12×10^{-2}

根据式(1)、(2)、(3)建立 AUV 的低频运动模型,用龙格库塔法求解 AUV 在推力和海流作用下的低频运动响应,并实时解算运动状态变量。其中,龙格库塔法的时间步长为 0.5s(仿真节拍)。这样就可以用于 AUV 的仿真系统。

3 UV-5 AUV 运动控制系统

AUV 运动控制系统的功能是:通过传感器获取 AUV 运动信息,并通过控制器进行解算,通过输出接口下达控制命令,协调各分系统的工作,使 AUV 能够按照预期的特性来运行^[12]。

3.1 UV-5 AUV 硬件体系结构

UV-5 AUV 的运动控制系统核心是基于 PC104 总线的工控机,采用 VxWorks 实时操作系统。它主要完成数据采集、控制器算法、推力分配、指令发送等功能,并且通过传输控制协议(TCP)把状态信息发送给水面 PC 机监控界面。通过串口卡获得 FOG、DVL 数据,通过 A/D 卡获取深度计和漏水检测等信息,通过 D/A 卡向推力器下达模拟量电压指令,使推力器发出 AUV 所需的推力,从而实现运动控制。另外通过用户数据报协议(UDP)和 TCP 与规划和导航系统进行通信,获得目标指令。图 3 为 UV-5 AUV 运动控制系统的硬件框图。

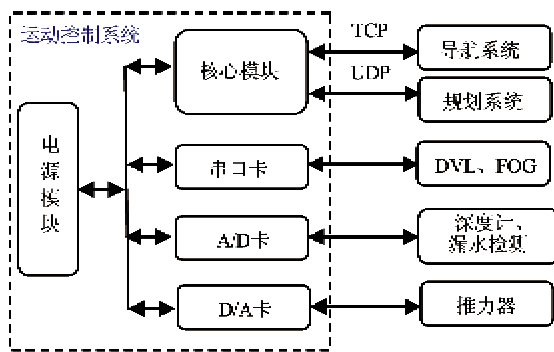


图 3 UV-5 AUV 控制系统硬件框图

3.2 UV-5 AUV 软件体系结构

3.2.1 控制软件体系

为了便于程序编码和调试,控制软件采用模块化设计,分为控制算法、数据处理、推力分配、传感器信息、通讯、水动力等模块。整个体系结构如图 4 所示。

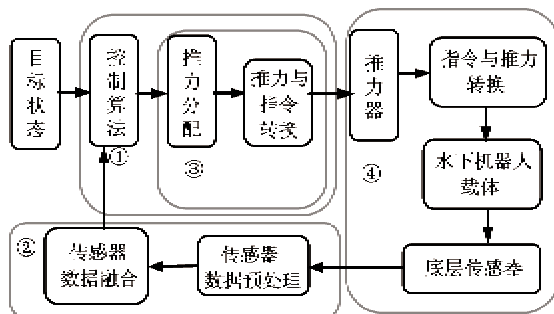


图 4 水下机器人运动控制流程

图中:①为控制算法,主要是指通过设计运动控制器来获得 AUV 的期望推力,从而实现对 AUV 运动状态的控制;②是数据处理模块,将其简单分为数据预处理和数据融合两部分,数据预处理主要指野值剔除,数据融合指平滑滤波,以便将高质量的数据传给控制算法模块;③是推力分配模块,它将 6 个自由度的推力转换到每个推力器上,再通过推力与指令之间的关系,转换成控制指令下达给推力器;④是 AUV 硬件体系结构,也是 AUV 运动控制系统的重要组成部分。

3.2.2 运动控制算法

目前研究的控制算法很多,每种算法都有其优缺点。由于 AUV 的强非线性,采用的控制算法主要是神经网络和模糊逻辑控制^[13]。由于 UV-5 AUV 需要搭载不同的设备,导致其数学模型很难获得,这里采用一种新型的控制方法——改进 S 面控制,它基于模糊控制的思想,却借鉴了比例积分微分(PID)控制器的简单结构,其算法如下:

$$\begin{cases} u_i = 2/(1 + \exp(-k_{i1}e_i - k_{i2}\dot{e}_i)) - 1 + \Delta u_i \\ f_i = K_i u_i + u_s \end{cases} \quad (4)$$

其中, e_i 和 $\dot{e}_i$ 为第 i 自由度控制的输入信息(偏差和偏差变化率,经过归一化处理); u_i 为第 i 自由度控制输出; k_{i1} 和 k_{i2} 分别为对应第 i 自由度偏差和偏差变化率的控制参数,可以改变其对应自由度的变化速度; Δu_i 为通过自适应方式得到的固定干扰力的大小(归一化); f_i 为第 i 自由度上所需力的大小; K_i 为该自由度上所能提供的最大推力(力矩)。经过海上试验发现,仅仅通过自适应项来调整控制输出使得系统响应缓慢,容易产生稳态误差,因此在控制输入中考虑加入 AUV 的静态载荷 u_s 。

3.2.3 推力分配策略

由于 UV-5 AUV 左右对称且为细长型,一般不考虑横摇影响。假定左、右主推所产生的推力为 T_1 、 T_2 , 它们对艇体中心的力臂为 l_1 、 l_2 , 夹角为 α ; 上、下主推所产生的推力为 T_3 、 T_4 , 它们对艇体中心的力臂为 l_3 、 l_4 , 夹角为 β ; 前后侧推以及垂推所产生的推力分别为 $T_5 - T_8$, 它们对艇体中心的力臂分别为 $l_5 - l_8$, 由此可以得到 5 个自由度的力(力矩)与 8 个推力器发出的力之间的关系,如式

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos\alpha & \cos\beta & \cos\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin\beta & \sin\beta & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -l_3 & l_4 & 0 & 0 & -l_7 & l_8 \\ -l_1 & l_2 & 0 & 0 & l_5 & -l_6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \\ T_8 \end{bmatrix} \quad (5)$$

所示,其中 F_x, F_y, F_z 分别为推力器在纵向、横向和垂向自由度上提供的力, M_y, M_z 分别为推力器提供的纵倾和艏向自由度的力矩。

由式(5)可知,推力器的控制是冗余的,可以采用伪逆求解方法来获得推力。但实际工程中,一般会根据任务需要增加约束条件进行推力分配。

AUV 低速航行时,纵向与垂向运动之间的耦合较小,直接通过施加垂向力来控制深度,纵倾角较小故不予控制,有

$$M_y = 0 \quad (6)$$

AUV 高速航行时,由于横向槽道推力器能力有限,往往通过改变艏向角来实现运动控制,有

$$F_y = 0 \quad (7)$$

高速航行情况下,纵向与垂向运动之间耦合较大,往往通过调节纵倾角来进行深度控制,而在垂向自由度上不施加外力,有

$$F_z = 0 \quad (8)$$

考虑到槽道推力器在高速情况下的推力减额较大,为了节省能源,不采用槽道推力器控制机器人的运动姿态,包括艏向和纵倾,有

$$\begin{cases} T_5 l_5 - T_6 l_6 = 0 \\ T_7 l_7 - T_8 l_8 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

综合考虑到左、右主推和上、下主推的最大推力,在纵向推力分配上将力分配到左右主推和上下主推,假定左右主推与上下主推的最大推力比值为 η ,有

$$(T_1 + T_2)\cos\alpha = \eta(T_3 + T_4)\cos\beta \quad (10)$$

综合式(5) - (10),可以获得 UV-5 AUV 在不同航速下为了实现运动控制,各个推力器应该提供的推力。

3.2.4 船位推算

UV-5 AUV 不仅需要实现多自由度精确定位,而且需要获知当前 AUV 的位置,本文采用船位推算来获得短时间内较为准确的导航信息,以此作为运动的位置参考^[14],长时间的导航还需利用 GPS 或水声

通信方式定期对船位推算的结果进行校正。本文采用改进的强跟踪卡尔曼滤波^[15]实现船位推算,该滤波方案具有较强的关于模型失配的鲁棒性,较小的关于噪声和初值统计特性的敏感性,极强的关于突变状态的跟踪能力和适中的计算量。强跟踪卡尔曼滤波的动态模型及具体算法参见参考文献[16]。

4 海上试验

2009 年 6 月,UV-5 AUV 在大连 760 研究所附近海域完成海上试验。试验内容主要包括:速度与位置控制、长航程导航、故障诊断、运动目标跟踪、海底管道探测、中继通讯等。其中速度和位置控制试验的试验地点选择在水深 10 ~ 20m 的近海,相对外海而言,海况较为平稳。长航程导航试验的试验地点选择在外海,海流非常复杂且流速很大,存在不同方向的海流。

图 5 是速度控制的结果。图 5(a)为纵向速度控制结果,图 5(b)为艏向角曲线,图 5(c)为深度曲线。图 5(a)、5(b)和 5(c)中,粗实线为目标值,细实线为实际值。从结果可以看出,AUV 姿态保持较好,深度偏差控制在 0.52m,艏向角偏差 2.5°范围内。

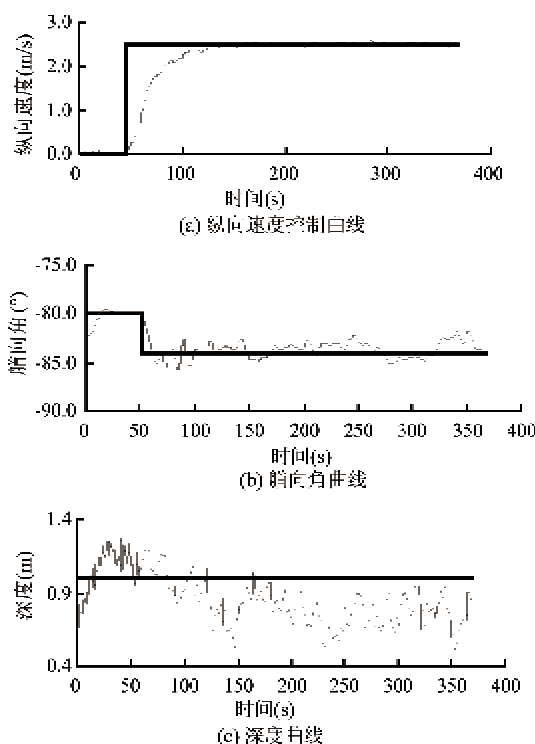


图 5 速度控制试验结果

图 6 是位置控制结果。图 6(a)为东向位置控制

结果,图 6(b)为北向位置控制结果,图 6(c)为艏向控制结果。图 6(a)、6(b)和 6(c)中,粗实线为目标值,细实线为实际值。从试验结果可以看出,东向位置控制存在一定偏差,原因是存在海流影响使得 AUV 必须实时调整艏向,所以在目标位置点来回波动;试验现场海流等因素的影响也使得北向位置控制存在波动。总体来讲位置控制精度能满足试验任务要求。

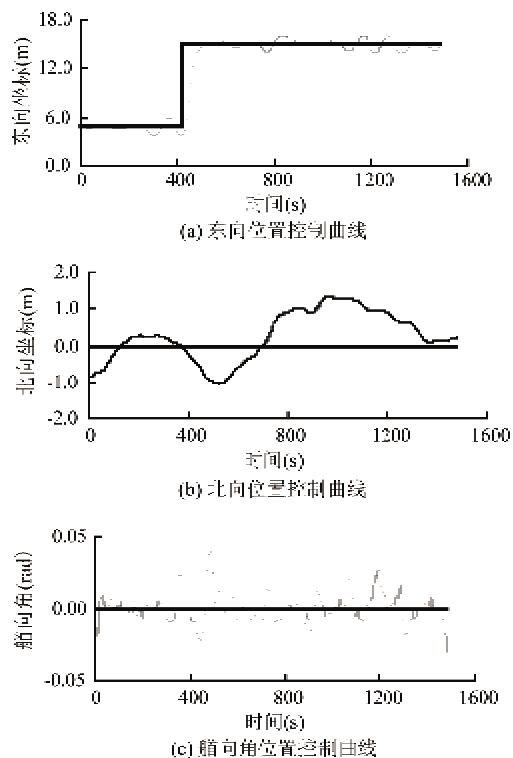


图 6 位置控制试验结果

图 7 为长航程导航的试验结果。坐标轴分别为经、纬度值,单位为秒。图 7 虚线为目标轨迹,实线为实际轨迹。此次试验包括出码头、边长 15km × 2km 的平行四边形路线和回码头四部分,历时近 11h。采用速度控制进行远距离航行,采用位置控制

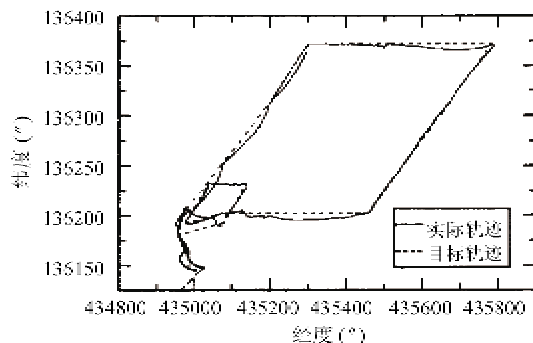


图 7 长航程导航试验结果

进行精确定位。由图可以看出,AUV 的实际轨迹与目标轨迹吻合较好,但在某些海域由于海流过大,已经超过了 AUV 的运动能力,因此和目标轨迹相比仍然存在一些偏差。

5 结论

本文主要研究 UV-5 AUV 满足不同任务需求下的运动控制技术。在采用极大似然参数估计算法获取 AUV 部分水动力系数基础上,建立起 AUV 运动模型仿真系统。为了解决高速航行给无缆自治水下机器人带来的强耦合、姿态难以控制等问题,采用改进传统水下机器人体系结构中的推力器布置方式、推力分配策略、运动控制方法和船位推算算法,使得无缆自治水下机器人的运动控制系统能够在保持原有精确定位功能的同时完成远距离高速航行等任务,从而极大提高了 AUV 完成作业任务的能力。通过海上试验的速度控制、位置控制和长航程导航试验验证了文中所提控制方法的可行性,说明了文中的运动控制系统能够满足实际任务需要,具有一定的工程参考意义。

参考文献

- [1] 徐玉如, 当坤. 智能海洋机器人技术进展. 自动化学报, 2007, 33(5): 518-521
- [2] Yu S C. Development of real-time acoustic image recognition system using by autonomous marine vehicle. *Ocean Engineering*, 2008, 35(1): 90-105
- [3] Kumar R P, Kumar C S, Sen D, et al. Discrete time-delay control of an autonomous underwater vehicle: Theory and experimental results. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 74-81
- [4] Pepijn W J, Ven V D, Johansen T A, et al. Neural network augmented identification of underwater vehicle models. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(6): 715-725
- [5] Zhang Y M, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 2008, 32(2): 229-252
- [6] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(1): 16-26
- [7] Li J W, Song B W, Shao C. Tracking control of autonomous underwater vehicles with internal moving mass. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(10): 1319-1323
- [8] 方少吉, 王丽荣, 朱计华等. 水下机器人传感器容错控制技术的研究. 机器人, 2007, 29(2): 155-159
- [9] 谢海斌, 沈林成. 水下机器人动态系统协同建模方法

- 研究.系统仿真学报, 2007,19(9): 2130-2133
- [10] 蒋达清,张宝学,王德辉等. 具有随机扰动的方程正解的存在唯一性、全局吸引性及其参数的极大似然估计. 中国科学 A 辑,2007,37(6):742-750
- [11] 张铭钧,胡明茂. 基于稳态自适应技术的水下机器人系统在线辨识.系统仿真学报,2008,20(8):5006-5009
- [12] 郭冰洁,徐玉如,李岳明. 水下机器人 S 面控制器的改进粒子群优化. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(12): 1277-1282
- [13] 俞建成,张爱群,王晓辉. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制. 自动化学报,2007,33(8):840-846
- [14] 李连营,许小兰,吴中恒. 多源导航电子地图数据融合更新方法研究. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(4):409-412
- [15] 齐俊桐,韩建达. 基于 MIT 规则的自适应 Unscented 卡尔曼滤波及其在旋翼飞行机器人容错控制的应用. 机械工程学报,2009,45(4):115-124
- [16] Sun Y S, Liang X, Wan L, et al. Design of the embedded navigation system of autonomous underwater vehicle based on the VxWorks. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Control & Automation, Guangdong, China, 2007. 2919-2924

Research on motion control of an autonomous underwater vehicle

Wang Jianguo, Sun Yushan, Wan Lei, Jiang Dapeng, Chang Wentian

(State Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

The research on the motion control of an autonomous underwater vehicle (AUV) under different task requirements was conducted. The maximum-likelihood algorithm was adopted to obtain the hydrodynamic coefficients of the AUV, and a six-degree of freedom simulation system was built up. By adjusting the thruster deployment, the force allocation strategy, the motion control method and the dead-reckoning algorithm, the new motion control system of the AUV can finish the tasks such as long distance navigation and high speed voyage while the dynamic positioning function is reserved. Therefore, lots of problems caused by high speed can be solved. Plenty of experiments including velocity control tests, position control tests and long distance navigation tests were conducted in the sea. The experiments show that the AUV controlled by the proposed motion control system can meet the requirements of tasks. Some reference values in engineering application can be demonstrated by the sea trial results.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), motion control, embedded system, system architecture, force allocation, dead-reckoning