DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904889

基于领航跟随法的多 AUV 编队控制算法研究*

李 娟[1,2],袁锐锟[2],张宏瀚[2]
(1. 哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要:针对已知路径下基于领航者的多自主水下机器人(AUV)编队队形控制问题,提出了一种 AUV 路径控制和编队协调控制相结合的新型编队控制器。其中,AUV 的路径跟踪控制采用反步滑模控制器,将 AUV 位置、姿态和时变速度跟踪转化虚拟速度控制,使 AUV 能达到期望的位置、速度等,避免了反步控制中的奇异值问题,并能够很好实现不确定的模型的控制,同时又提高了跟随者协同定位精度;在路径跟踪控制基础上,编队协调控制器将领航者与跟随者的位置误差控制转化为跟随者的速度误差控制,使跟随者能快速达到期望位置,从而使所有 AUV 实现期望的队形并保持。仿真实验对该控制策略进行了可行性验证,结果表明,该算法提高了编队的响应速度、控制精度和稳定性;再应用 3 台 AUV 进行了湖上试验验证,证明了该控制策略的有效性,能有效应用到实际中。

关键词: 自主水下机器人;路径跟踪控制;编队协调控制;滑模控制
中图分类号: TP24 TH701 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.80

Research on multiple AUVs formation control algorithm based on leader-follower method

Li Juan[1,2], Yuan Ruikun[2], Zhang Honghan[2]
(*1.Science and Technology on Underwater Vehicle Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*;
2.College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the formation control problem of AUVs based on leader in a known path, a new formation controller combining AUV path control and formation coordination control is proposed. Firstly, in the controller the backstepping adaptive dynamical sliding mode control method is adopted to achieve the path following control of the AUV, which transforms the position, attitude and time-varying velocity tracking to virtual velocity control, makes the AUVs to reach the expected position and velocity, effectively avoids the singular value problem of backstepping control, nicely realizes the control of the uncertain model, and at the same time improves the accuracy of follower collaborative positioning. Secondly, based on the path tracking control, the formation coordination controller converts the position error control of the leader and follower into speed error control of the follower, enables the followers to quickly reach the desired positions and makes all the AUVs achieve and maintain the expected formation. Simulation experiment was carried out to verify feasibility of the proposed control strategy, the result shows that the proposed algorithm improves the response speed, control accuracy and stability of the formation. The test experiment on the lake with three AUVs was conducted, and the result proves the effectiveness of the proposed control strategy, which can be effectively applied in actual situation.

Keywords: autonomous underwater vehicle(AUV); path following control; formation coordination control; sliding mode control

0 引 言

自主水下机器人(autonomous underwater vehicles, AUV)是水下观测,探寻和开发的水下实验工具,更可应用到军事上,用于侦察,巡逻等方面。而随着水下科学实验与海洋开发项目的增加,AUV 也应用到各个领域,但单个 AUV 由于可携带负载、航程、航速等方面的限制,往

收稿日期:2019-03-25 Received Date:2019-03-25
*基金项目:国家自然科学青年基金(51609046)、水下机器人技术重点实验室研究基金(No.614221502061701)资助项目

往难以胜任十分复杂的任务,于是多 AUV 系统成为研究热点。多 AUV 系统并不是单 AUV 的简单叠加,而是多 AUV 之间的协调合作,具体涉及体系结构、通信等多方面的内容,通过建立合理的多 AUV 之间的编队协同探测机制,改善单个 AUV 的功能缺陷,使其能够更高效且高质量地完成水下作业。

近几年来,许多学者已经对 AUV 的单体路径跟踪控制问题进行了研究,在视线导引法的条件下,对运动误差方程提出了 PID 控制,滑动模块控制,自适应控制,神经网络控制和反步法控制[1-7]等方法。文献[1-2]对 AUV 过去,现在,未来的发展进行了详细的描述。文献[3]中利用 PID 控制器简单高效,结构简单、固有鲁棒性,调整参数简单等特点,一般用于控制 AUV 的航向角,可以让 AUV 实现沿着任何三维空间轨迹运动的控制方法。文献[4]利用滑模控制具有快速响应、系统无需人为辨识,参数变化快、物理实现简单等优点,从而可以根据环境当前的状态变化而使控制器自身结构发生相适应变化;文献[5]自适应控制能不断学习,使系统结构参数能够调整得到实际值。文献[6]神经网络控制是为了解决系统在不确定或未知环境中的控制问题,能够以高精度逼近非线性函数,对复杂的未知问题具有一定自适应和自学习能力,并可以解决大规模实时计算问题,信息综合能力十分强等。文献[7]反步法是利用李亚普诺夫定律设计控制器,并通过李雅普洛夫提供证明,反步法通过增加非线性阻尼项,可以将非线性方程转换成更简单的形式来设计控制器,给控制器的设计带来灵活性。这些控制器均在实际应用中具有优点和缺点。

而在编队控制方面,众多学者提出了多种编队方法,得到广泛研究以及应用的有 3 种,分别为跟随领航者法(leader-following),基于行为法(behavior-based),虚拟结构法(virtual structure)[8-11]。文献[8]对近些年学者们对编队问题进行了研究;文献[9]中领航者-跟随者方法指定某一 AUV 为领航者,其余为跟随者,将编队问题转换为 AUV 间角度和距离控制。文献[10]基于行为将 AUV 控制任务分解为避碰,运动和队形转换的基本行为,从而简化 AUV 的编队控制。文献[11]运用虚拟结构法把 AUV 编队整体看作一个刚体,AUV 只需要跟踪刚体上对应的固定点。

本文针对 AUV 轨迹跟踪控制问题,将姿态误差转化为虚拟速度控制,结合反步技术和自适应滑模控制方法,设计 AUV 轨迹跟踪控制器,而针对 AUV 编队问题上,在领航跟随法的基础上,遵循相同算法设计领航者和跟随者的路径,AUV 轨迹跟踪控制器使所有 AUV 都能实现路径跟踪,然后通过领航者和跟随者“广义沿路路径距离差”来控制跟随者速度,从而实现编队队形控制。最后在在仿真实验和湖上试验均得到了有效验证。

1 AUV 水平面模型的建立

结合受控对象 AUV 的特点,建立 AUV 的数学模型。AUV 是一个空间的六自由度运动载体,为方便描述其运动,其数学模型通常建立在北东坐标系和运动坐标系下。在北东坐标系下定义其位置矢量,运动坐标系下定义其广义速度矢量。建立在 2 坐标系下的运动学和动力学水平面数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = \cos(\psi)u - \sin(\psi)v, \\ \dot{y} = \sin(\psi)u + \cos(\psi)v, \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{u} = \dfrac{m_{22}}{m_{11}}vr - \dfrac{d_{11}}{m_{11}}u + \dfrac{\tau_u + \tau_{w1}}{m_{11}}, \\ \dot{v} = -\dfrac{m_{11}}{m_{22}}ur - \dfrac{d_{22}}{m_{22}}v + \dfrac{\tau_{w2}}{m_{22}}, \\ \dot{r} = \dfrac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}}uv - \dfrac{d_{33}}{m_{33}}r + \dfrac{\tau_r + \tau_{w3}}{m_{33}} \end{cases} \tag{1}$$

式中:x,y 为定义在固定坐标系下 AUV 的纵向位置矢量,横向位置矢量;ψ 为 AUV 的航向角;u,v,r 为 AUV 的纵向速度;横向速度和艏向角速度,τ_u 和 τ_r 表示 AUV 的纵向推力和横向力矩;参数 m_{ii} 和 d_{ii} 是 AUV 的水动力参数;τ_{w1},τ_{w2},τ_{w3} 为外界干扰力或干扰力矩。

2 AUV 反步滑模控制器设计

控制器设计的目的是根据 AUV 的数学模型,设计反步滑模控制率驱动 AUV,使其在期望速度的情况下,达到期望位置或在期望路径上运动。

1)定义误差变量

首先给出误差变量 x_e、y_e、ψ_e,期望艏向角:

$$\psi_d = \arctan\left(\frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d}\right) \tag{2}$$

则误差变量可以写为:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:x_e 为纵向位置误差;y_e 为横向位置误差;ψ_e 艏向角误差。

结合 AUV 式(1)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u - v_p\cos(\psi_e) + ry_e, \\ \dot{y}_e = v + v_p\sin(\psi_e) - rx_e, \end{cases} \tag{4}$$

其中,$v_p = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$。

考虑到式(4),选取李雅普诺夫函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) \tag{5}$$

对式(5)求导并结合(4)可得:

$$\dot{V}_1 = x_e(u - v_p\cos(\psi_e) + ry_e) + y_e(v + v_p\sin(\psi_e) - rx_e) = x_e(u - v_p\cos(\psi_e)) + y_e(v + v_p\sin(\psi_e)) \tag{6}$$

引入虚拟变量 α_v, 并令:

$$\alpha_v = v_p\sin(\psi_e) \tag{7}$$

从式(7)可以看出变量 ψ_e 的控制转换是为了虚拟变量 α_v 的控制。为了保证 $\dot{V}$ 为负,u 和 α_v 认为控制变量,它们的期望变量 u_d 和 α_{vd} 为:

$$u_d = v_p\cos(\psi_e) - k_1x_3/E \tag{8}$$

$$\alpha_{vd} = -v - k_2y_e/E \tag{9}$$

其中, $E = \sqrt{1 + x_e^2 + y_e^2}$, k_1, k_2 为常数。

$$u_e = u - u_d, \alpha_{ve} = \alpha_v - \alpha_{vd} \tag{10}$$

那么:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u_e - k_1x_e/E \\ \dot{y}_e = \alpha_{ve} - k_2y_e/E - rx_e \end{cases} \tag{11}$$

由此可得:

$$\dot{V}_1 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E + u_ex_e + \alpha_{ve}y_e \tag{12}$$

2)稳定虚拟误差变量 u_e

$$\dot{u}_e = \dot{u} - \dot{u}_d = \frac{m_{22}vr - d_{11}u + \tau_{w1} - m_{11}\dot{u}_d + \tau_u}{m_{11}} = \frac{F_1 + \tau_u}{m_{11}} \tag{13}$$

其中, $F_1 = m_{22}vr - d_{11}u + \tau_{w1} - m_{11}\dot{u}_d$

选取李雅普诺夫函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}m_{11}u_e^2 + \frac{1}{2}(F_1 - \hat{F}_1)^2 \tag{14}$$

其中, $\hat{F}$ 是 F_1 的估计值:

$$S_1 = c_1u_e + \dot{u}_e + \frac{x_e}{m_{11}} - \frac{(F_1 - \hat{F}_1)}{m_{11}} = c_1u_e + \frac{(\dot{F}_1 + \tau_u) + x_e}{m_{11}} \tag{15}$$

其中 c_1 是正常量,则 u_e 的导数为:

$$\dot{u}_e = S_1 - c_1u_e - \frac{x_e}{m_{11}} + \frac{(F_1 - \hat{F}_1)}{m_{11}} \tag{16}$$

则 V_2 的导数为:

$$\dot{V}_2 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E + \alpha_{ve}y_e + m_{11}u_eS_1 - c_1m_{11}u_e^2 + (u_e - \dot{\hat{F}}_1)(F_1 - \hat{F}_1) \tag{17}$$

选 $T_1 = \dot{\tau}_u$,那么 $\dot{S}_1$ 则为:

$$\dot{S}_1 = \frac{c_1(F_1 + \tau_u) + T_1 + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{x}_e}{m_{11}} \tag{18}$$

建立李雅普诺夫函数:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}m_{11}S_1^2 \tag{19}$$

式(19)微分为:

$$\dot{V}_3 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E + \alpha_{ve}y_e + m_{11}u_eS_1 - c_1m_{11}u_e^2 + (u_e - \dot{\hat{F}}_1)(F_1 - \hat{F}_1) + S_1[c_1(F_1 + \tau_u) + T_1 + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{x}_e] \tag{20}$$

选择滑模控制率 T_1 为:

$$T_1 = -c_1(\hat{F}_1 + \tau_u) - \dot{\hat{F}}_1 - \dot{x}_e - m_{11}u_e - k_{s1}\mathrm{sgn}(S_1) - w_{s1}S_1 \tag{21}$$

其中, k_{s1} 和 w_{s1} 是正常量,由此可得:

$$\dot{V}_3 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 + \alpha_{ve}y_e + (u_e + c_1S_1 - \dot{\hat{F}}_1)(F_1 - \hat{F}_1) \tag{22}$$

设计 F_1 的自适应控制律为:

$$\dot{\hat{F}}_1 = u_e + c_1S_1 \tag{23}$$

则 V_3 的导数为:

$$\dot{V}_3 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 + \alpha_{ve}y_e \tag{24}$$

3)稳定虚拟速度误差变量 α_{ve}

$$\dot{\alpha}_{ve} = \dot{\alpha}_v - \dot{\alpha}_{vd} = \dot{v}_p\sin(\psi_e) + v_p\cos(\psi_e)(r - \dot{\psi}_d) + \dot{v} + k_2(E^{-1} - y_e^2E^{-3})\dot{y}_e - k_2x_ey_eE^{-3}\dot{x}_e = \dot{v}_p\sin(\psi_e) + v_p\cos(\psi_e)(r - \dot{\psi}_d) + \frac{F_2}{m_{22}} + Q_1 \tag{25}$$

其中, $F_2 = -m_{11}ur - d_{22}v + \tau_{w2}$, $Q_1 = k_2(E^{-1} - y_e^2E^{-3})\dot{y}_e - k_2x_ey_eE^{-3}\dot{x}_e$

为了使 $\dot{V}_3$ 为负,考虑变量 r,设计它的期望变量 r_d 为:

$$r_d = \dot{\psi}_d + \frac{-\dot{v}_p\sin(\psi_e) - \hat{F}/m_{22} - Q_1 - k_3\alpha_{ve} - y_e/m_{22}}{v_p\cos(\psi_e)} \tag{26}$$

其中, $\hat{F}_2$ 是 F_2 估计量, k_3 是正的常量。

所以引入误差变量:

$$r_e = r - r_d \tag{27}$$

则 α_{ve} 的时间导数为:

$$\dot{\alpha}_{ve} = r_ev_p\cos(\psi_e) + (F_2 - \hat{F}_2)/m_{22} - k_3\alpha_{ve} - y_e/m_{22} \tag{28}$$

建立李雅普诺夫函数:

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2}m_{22}\alpha_{ve}^2 + \frac{1}{2}(F_2 - \hat{F}_2)^2 \tag{29}$$

它的时间导数为:

$$\dot{V}_4 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 -$$

$$k_{s1}|S_1| - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 + (\alpha_{ve} - \dot{\hat{F}}_2)(F_2 - \hat{F}) + m_{22}\alpha_{ve}r_e v_p\cos(\psi_e) \tag{30}$$

设计 F_2 的自适应率为：

$$\dot{\hat{F}}_2 = \alpha_{ve} \tag{31}$$

则 V_4 的导数为：

$$\dot{V}_4 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 + m_{22}\alpha_{ve}r_e v_p\cos(\psi_e) \tag{32}$$

4）考虑 r_e 为辅助控制，因此接下来稳定误差变量 r_e

$$\dot{r}_e = \dot{r} - \dot{r}_d = \frac{(m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r + \tau_{w3} - m_{33}\dot{r}_d + \tau_r}{m_{33}} = \frac{(F_3 + \tau_r)}{m_{33}} \tag{33}$$

其中，$F_3 = (m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r + \tau_{w3} - m_{33}\dot{r}_d$

建立如下李雅普诺夫函数：

$$V_5 = V_4 + \frac{1}{2}m_{33}r_e^2 + \frac{1}{2}(F_3 - \hat{F}_3)^2 \tag{34}$$

其中，$\hat{F}_3$ 是 F_3 的估计值。

选择动态滑模函数

$$S_2 = c_2r_e + \dot{r}_e + \frac{m_{22}\alpha_{ve}v_p\cos(\psi_e)}{m_{33}} - \frac{(F_3 - \hat{F}_3)}{m_{33}} = c_2r_e + \frac{(\hat{F}_3 + \tau_r) + m_{22}\alpha_{ve}v_p\cos(\psi_e)}{m_{33}} = c_2r_e + \frac{(\hat{F}_3 + \tau_r)}{m_{33}} + Q_2 \tag{35}$$

其中，$Q_2 = (m_{22}\alpha_{ve}v_p\cos(\psi_e)/m_{33})$，$c_2$ 是正常量。

则：

$$\dot{r}_e = S_2 - c_2r_e - Q_2 + \frac{(F_3 - \dot{\hat{F}}_3)}{m_{33}} \tag{36}$$

求 V_5 对时间的导数 $\dot{V}_5$，并且把式(36)代入：

$$\dot{V}_5 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 + m_{33}r_eS_2 - c_2m_{33}r_e^2 + (r_e - \dot{\hat{F}}_3)(F_3 - \hat{F}_3) \tag{37}$$

求式(35)对时间的导数，并且令 $T_2 = \dot{\tau}_r$，则 $\dot{S}_2$ 为：

$$\dot{S}_2 = \frac{c_2(F_3 + \tau_r) + T_2 + \dot{\hat{F}}_3}{m_{33}} + \dot{Q}_2 \tag{38}$$

其中，$\dot{Q}_2 = (m_{22}/m_{33})(\dot{\alpha}_{ve}v_p\cos(\psi_e) + \alpha_{ve}\dot{v}_p\cos(\psi_e) - \alpha_{ve}v_p\sin(r - \dot{\psi}_d))$

选取李雅普诺夫函数：

$$V_6 = V_5 + \frac{1}{2}m_{33}S_2^2 \tag{39}$$

则：

$$\dot{V}_6 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 - k_3S_1^2 - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 - c_2m_{33}r_e^2 + m_{33}r_eS_2 + (r_e - \dot{\hat{F}}_3)(F_3 - \hat{F}_3) + m_{33}S_2\left(\frac{c_2(F_3 + \tau_r) + T_2 + \dot{\hat{F}}_3}{m_{33}} + \dot{Q}_2\right) \tag{40}$$

选择动态滑模控制率 T_2 为：

$$T_2 = -c_2(\hat{F}_3 + \tau_r) - \dot{\hat{F}}_3 - m_{33}r_e - m_{33}\dot{Q}_2 - k_{s2}\mathrm{sgn}(S_2) - w_{s2}S_2 \tag{41}$$

其中，k_{s2} 和 w_{s2} 是正常量，把式(41)代入式(40)，则

$$\dot{V}_6 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - c_1m_{11}u_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 - c_2m_{33}r_e^2 - k_{s2}|S_2| - w_{s2}S_2^2 + (r_e - \dot{\hat{F}}_3 + c_2S_2)(F_3 - \hat{F}_3) \tag{42}$$

设计 F_3 的自适应率：

$$\dot{\hat{F}}_3 = r_e + c_2S_2 \tag{43}$$

则 V_6 的导数为：

$$\dot{V}_6 = -(k_1x_e^2 + k_2y_e^2)/E - k_3m_{22}\alpha_{ve}^2 - c_1m_{11}u_e^2 - c_2m_{33}r_e^2 - k_{s1}|S_1| - w_{s1}S_1^2 - k_{s2}|S_2| - w_{s2}S_2^2 \leqslant 0 \tag{44}$$

考虑 AUV 水平面模型式(1)，存在滑模自适应律式(23)、(31)、(43)和控制律式(21)、(41)，能够保证最终跟踪上期望轨迹。

3 编队协调控制器设计

3.1 控制器设计原理

首先，定义 2 个名词，路径编号和广义沿路距离。AUV 的路径是由多个点 $\{P_1, P_2, \cdots, P_{k-1}, P_k, \cdots, P_n\}$ 连接组成，其中 P_1 为起始点，P_n 为终点，而相连 2 点组成的线段有一个编号，即路径编号，如图 1 所示，定义 P_1P_2 线段的路径编号为 $PN = 1$，P_2P_3 线段的路径编号为 $PN = 2$，以此类推，P_kP_{k+1} 线段的路径编号为 $PN = K$。

而广义路径距离 ΔS 指的是领航者和跟随者在同一路径编号时，领航者与跟随者的距离在路径上的投影距离即为广义路径距离，如图 2 所示，其中跟随者的路径根据编队队形由领航者路径平移、压缩等方法获得。

将领航者和跟随者分别记为 l、f，文中带有 l、f 下标的参数都是关于领航者和跟随者的参数，例如 $u_{d,l}$ 为领航者的 u_d，$T_{1,f}$ 为跟随者的滑模控制率 T_1。

单体控制器将 AUV 的姿态跟踪转化为虚拟速度控制，结合反步法和滑模控制，本节的协调控制器将编队的问题同样转化为速度控制，由式(44)可知，存在 k_1，k_2 在某一定范围时可保证 $\dot{V}_6$ 为负，保证整个系统稳定，使 AUV 能跟踪期望轨迹，又由式(8)、(9) 知 k_1，k_2 与 AUV 的 u_d 和 α_{vd} 有关，因 k_1，k_2 是有一定范围的，即 AUV 的期

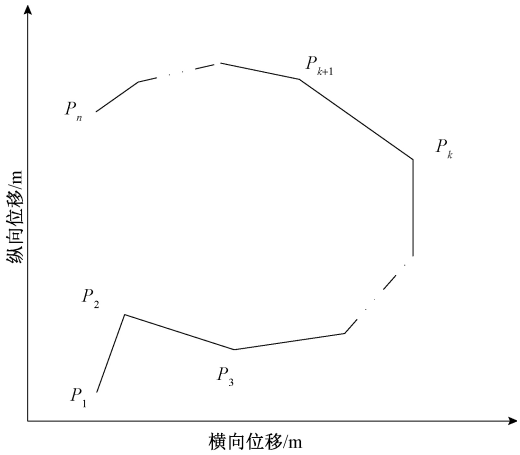


图 1　AUV 路径

Fig.1　The AUV path

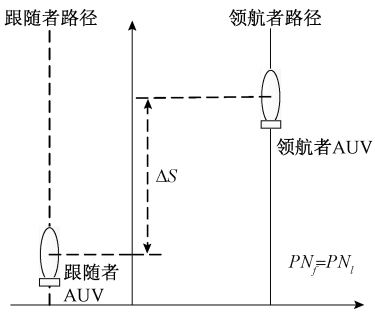


图 2　广义路径距离

Fig.2　The generalized path distance

望速度也同样有范围 $U_{\max} \geqslant u_d \geqslant U_{\min} \geqslant 0$,而当速度 u_d 在$[U_{\min}, U_{\max}]$ 区间内时,单体控制器能够保证 AUV 轨迹跟踪误差系统半全局一致有界,即对任意一个控制量使轨迹跟踪误差趋于 0。

对于多 AUV 的编队协调控制问题, 从多个 AUV 中选择 1 个作为领航者,其余为跟随者。领航者和跟随者都能够跟踪其各自的路径。领航者以设定速度跟踪路径,且设定速度在$[U_{\min}, U_{\max}]$区间内。通过计算领航者和跟随者在路径上运动的距离,可知跟随者相对于领航者的广义沿路距离误差为:

$$\Delta S = \begin{cases} 100 & \text{if } PN_l < PN_f \\ S_l - S_f - S_{e,f} & \text{if } PN_l = PN_f \\ -S_{e,f} & \text{if } PN_l > PN_f \end{cases} \tag{45}$$

式中:$S_{e,f}$为领航者和跟随者保持期望队形时运动方向所需的期望距离;PN_l,PN_f 分别为领航者和跟随者路径编号 S_l,S_f 为领航者和跟随者在路径编号所在路径上走的距离。

3.2　领航者控制器设计

因领航者仅需路径跟踪控制,领航者控制器的建立如下。

由式(8)和(9)可知,AUV 的期望 $u_{d,l}$ 和 $\alpha_{vd,l}$ 为:

$$\begin{cases} u_{d,l} = v_{p,l}\cos(\psi_{e,l}) - k_{1,l}x_{e,l}/E_l \\ \alpha_{vd,l} = -v_l - k_{2,l}y_{e,l}/E_l \end{cases} \tag{46}$$

由式(21)和(41),领航者 AUV 滑模控制率为

$$T_{1,l} = -c_{1,l}(\hat{F}_{1,l} + \tau_{u,l}) - \dot{\hat{F}}_{1,l} - \dot{x}_{e,l} - m_{11,l}u_{e,l} - k_{s1,l}\mathrm{sgn}(S_{1,l}) - w_{s1,l}S_{1,l} \tag{47}$$

$$T_{2,l} = -c_{2,l}(\hat{F}_{3,l} + \tau_{r,l}) - \dot{\hat{F}}_{3,l} - m_{33,l}r_{e,l} - m_{33,l}\dot{Q}_{2,l} - k_{s2,l}\mathrm{sgn}(S_{2,l}) - w_{s2,l}S_{2,l} \tag{48}$$

由式(23),(31)和(41),领航者 AUV 滑模自适应率为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}}_{1,l} = u_{e,l} + c_{1,l}S_{1,l} \\ \dot{\hat{F}}_{2,l} = \alpha_{ve,l} \\ \dot{\hat{F}}_{3,l} = r_{e,l} + c_{2,l}S_{2,l} \end{cases} \tag{49}$$

3.3　跟随者控制器设计

跟随者控制器与领航者类似,但跟随者为了减少与领航者之间的广义沿路距离误差,设计了新的不同于领航者的速度要求,使得跟随者能够“追上”领航者。

跟随者的速度 $u_{d,f}$ 为:

$$u_{d,f} = u_{d,l} + \frac{2\arctan\Delta S}{\pi}\Delta u \tag{50}$$

其中,$\Delta u > 0$ 并且保证 $u_{d,f}$ 在$[U_{\min}, U_{\max}]$ 区间里。

跟随者的期望 $\alpha_{vd,f}$ 为:

$$\alpha_{vd,f} = -v_f - k_{2,f}v_{e,f}/E_f \tag{51}$$

同理,由式(21)和(41),跟随者 AUV 滑模控制率为:

$$T_{1,f} = -c_{1,f}(\hat{F}_{1,f} + \tau_{u,f}) - \dot{\hat{F}}_{1,f} - \dot{x}_{e,f} - m_{11,f}u_{e,f} - k_{s1,f}\mathrm{sgn}(S_{1,f}) - w_{s1,f}S_{1,f} \tag{52}$$

$$T_{2,f} = -c_{2,f}(\hat{F}_{3,f} + \tau_{r,f}) - \dot{\hat{F}}_{3,f} - m_{33,f}r_{e,f} - m_{33,f}\dot{Q}_{2,f} - k_{s2,f}\mathrm{sgn}(S_{2,f}) - w_{s2,f}S_{2,f} \tag{53}$$

由式(23)、(31)和(41),跟随者 AUV 滑模自适应率为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}}_{1,f} = u_{e,f} + c_{1,f}S_{1,f} \\ \dot{\hat{F}}_{2,f} = \alpha_{ve}f \\ \dot{\hat{F}}_{3,f} = r_{e,f} + c_{2,f}S_{2,f} \end{cases} \tag{54}$$

在上述控制器的作用下,领航者和跟随者都能跟踪各自路径并慢慢形成稳定的编队队形,而且跟随者除了知道领航者的位置信息和速度信息外,不需要其它信息,大大减少了编队过程中的通讯需求。

4 试验与分析

4.1 仿真验证与分析

为了验证本文的控制方法是否能够实现多 AUV 的编队队形控制,利用 MATLAB 编写程序,其中 AUV 水平面模型参数为:

$m=185$ kg, $I_z=50$ kgm^2, $X_{\dot{u}}=-30$ kg, $Y_{\dot{v}}=-80$ kg, $N_{\dot{r}}=-30$ kg, $X_u=70$ kg/s, $X_{u|u|}=100$ kg/m, $Y_v=100$ kg/s, $Y_{v|v|}=200$ kg/m, $N_r=50$ kgm^2/s, $N_{r|r|}=100$ kgm^2

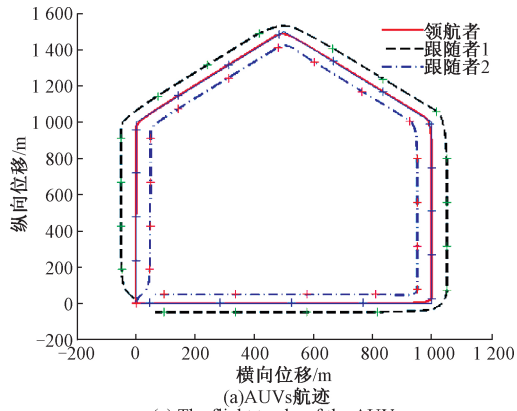
$m_{11}=m-X_{\dot{u}}$, $m_{22}=m-Y_{\dot{v}}$, $m_{33}=I_z-Z_{\dot{r}}$, $d_{11}=X_u+X_{u|u|}|u|$, $d_{22}=Y_v+Y_{v|v|}|v|$, $d_{33}=N_r+N_{r|r|}|r|$

控制器参数为:

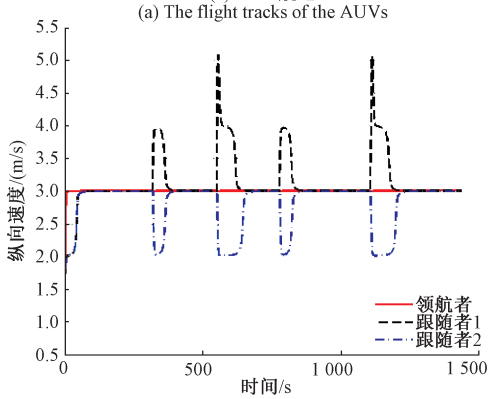
$k_1=1.7$, $k_2=1$, $k_3=0.1$, $c_1=0.8$, $c_2=1.3$, $k_{s1}=k_{s2}=0.5$, $w_{s1}=w_{s2}=1$

领航者的期望路径参数分别为 (0,0)(1 000,0)(1 500,500)(1 000,1 000)(0,1 000)(0,0)的折线段。领航者期望速度为 3 m/s,跟随者速度期望范围为(0,5) m/s,期望编队队形为 3 个 AUV 构成等腰直角三角形,其中领航者位于顶点,两个跟随者构成底边,底边长为 100 m。

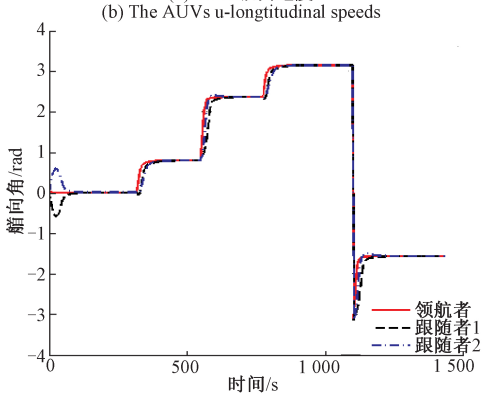
3 个 AUV 初始位置均在(0,0)点,图 3 所示为 AUV 跟踪期望路径时的航迹、速度、艏向角、横向误差和纵向误差,图 3(a)航迹图可以看出,跟随者在初始位置与编队期望位置存在较大误差,但在设计的控制器的作用下,跟随者能快速到达编队期望位置并且所有 AUV 能在运动中保持编队队形。图 3(b)、(c)分别为 AUV 的速度与艏向角,图 3(b)可以看出领航者能在短时间内达到期望速度并保持,跟随者达到期望速度慢于领航者,是因为 2 个跟随者的初始广义沿路距离 0 小于期望广义沿路距离 50 m,跟随者需以低于领航者的速度运行;图 3(b)中跟随者速度发生 4 次变化和图 3(c)中 3 个 AUV 艏向角发生 4 次变化分别对应图 3(a)中编队控制中 4 次路径编号发生变化,其它时刻 AUV 的速度与艏向角均能保持其期望值,证明了 AUV 的反步滑模控制能精确跟踪上期望路径;图 3(d)是 AUV 路径跟踪时的误差,同时这也可以看作编队控制时的横向误差,除了在初始时刻和 AUV 跟踪路径时路径编号时改变有较大误差外,横向误差都接近于 0,再次证明了单个 AUV 路径跟踪能够精确控制,以及 3 个 AUV 在编队控制下横向能保持期望距离。图 3(e)是 AUV 编队控制时跟随者与领航者的纵向误差,是实际广义路径距离与期望广义路径距离的差值,同样,除了在初始时刻和 AUV 跟踪路径时路径编号时改变有较大误差外,纵向误差都接近于 0,说明了 3 个 AUV 在编队控制下的纵向能保持期望距离。结合图 3(d)、(e),3 个 AUV 编队控制下横向与纵向均能保持期望距离,说明了 AUV 能保持期望队形,证明了编队协调控制器能有效使多个 AUV 形成编队并保持。综上所述,仿真结果证明了控制器的有效性,3 个 AUV 在控制器的作用下,领航者能快速并稳定的跟踪期望路径,跟随者也能快速到达期望编队位置,3 个 AUV 能够实现并保持编队队形运动的目的。



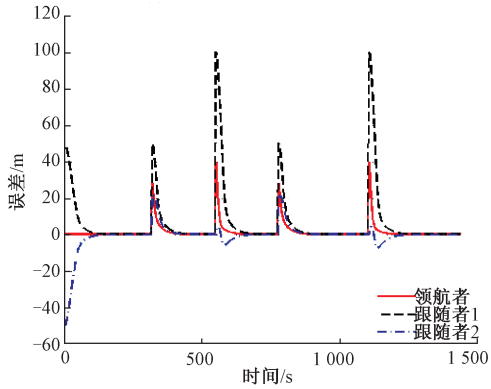
(a)AUVs航迹
(a) The flight tracks of the AUVs



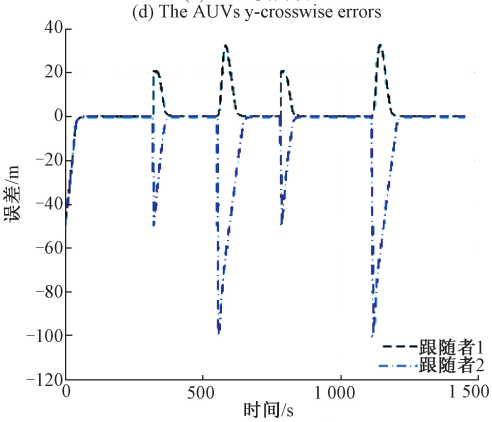
(b)AUVs纵向速度
(b) The AUVs u-longtitudinal speeds



(c)AUVs艏向角
(c) The AUVs heading angles



(d)AUVs横向误差
(d) The AUVs y-crosswise errors



(e)AUVs纵向误差
(e) The AUVs x-longtitudinal errors

图 3　AUVs 编队队形控制仿真实验结果

Fig.3　The AUVs formation control simulation experiment result

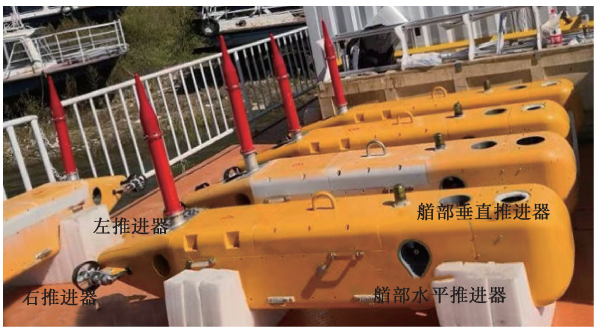


图 4　试验用多个 AUV 图片

Fig.4　The photo of the AUVs used in the test

而值得说明的是,图 3(b)、(d)、(e)中速度变化以及误差突然变大的原因是在编队过程中路径编号发生变化,3 个 AUV 需要重新跟踪新的路径段,计算误差的过程中路径段的参数发生改变,导致误差突变。

4.2　湖上试验验证与分析

如图 4 所示,采用 3 个 AUV 进行了湖上试验,验证了本算法编队队形控制的有效性。单个 AUV 的推进系统结构布置如图 5 所示,需要设计 4 个控制器:分别为 X 位置控制器、Y 位置控制器、航向控制器和深度控制器。4 个控制器产生的推进器推力指令经推力解算与推力分配模块,为每个推进器分配实际的推进器指令,用于单个 AUV 的位置、航向、深度控制。

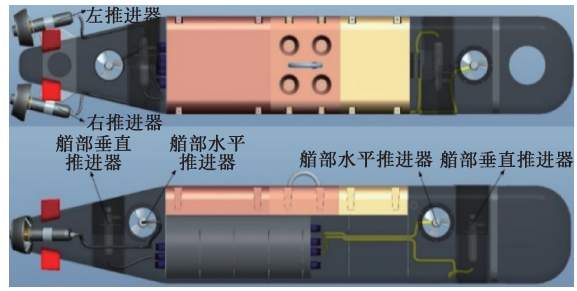


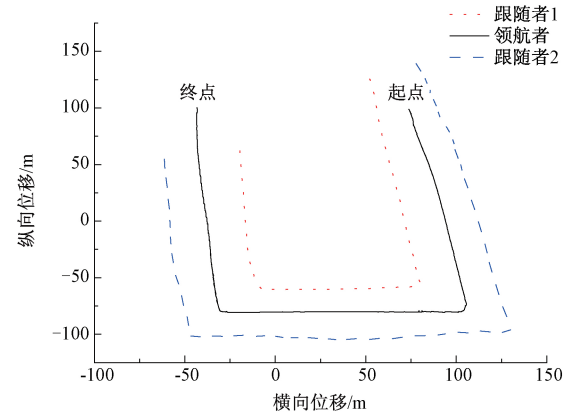
图 5　AUV 执行机构结构布置图

Fig.5　The AUV actuator structure layout

试验区域面积较开阔、视野好,水底较平坦,湖区流速不大于 1 kn、流向稳定,周围水域和岸边无明显持续的噪声源,试验用 3 条 AUV,其中 1 个为领航者,另外 2 个为跟随者。首先通过水面工作站对领航 AUV 设计多边形路径,期望队形为 3 个 AUV 构成等腰直角三角形,其中领航者位于顶点,2 个跟随者构成底边,边长 50 m。领航者期望速度为 0.6 m/s,期望轨迹参数为 4 个点(74,98)、(80,107)、(80,−32)、(100,−40)构成的折线。控制器参数为:

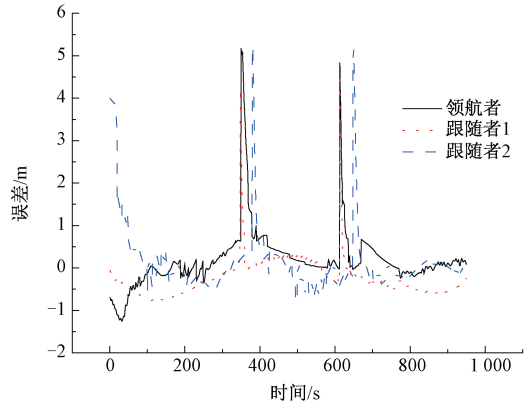
$k_1 = 1.7, k_2 = 1, k_3 = 0.1, c_1 = 0.8, c_2 = 1.3, k_{s1} = k_{s2} = 0.5, w_{s1} = w_{s2} = 1$

试验结束后下载 AUV 的数据,获得 AUV 实际运动信息,包括速度,艏向角,AUV 位置信息等。试验结果如图 6 所示。



(a)多AUV航迹

(a) The flight tracks of multiple AUVs



(b)AUVs横向误差

(b) The AUVs y-crosswise errors

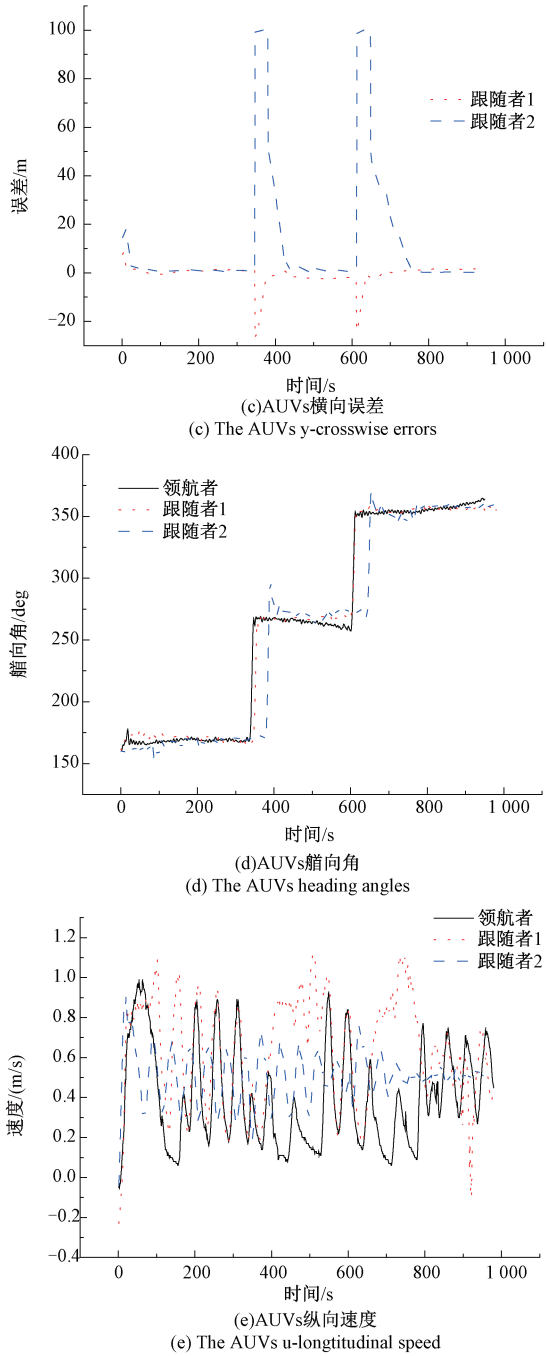


图 6 AUVs 编队湖上试验

Fig.6 The AUVs formation control test on the lake

根据图 6 的试验结果可知,领航者能够在误差允许下跟踪上所设计的路径,3 个 AUV 也能成功实现编队并保持,整个编队运动过程中,误差均满足要求,证实了该算法的有效性,也说明了该策略能有效应用到实际应用中。

5 结 论

本文针对 AUV 编队控制,设置领航 AUV 的期望路径和期望队形,使得每个 AUV 都有自己的路径,通过反步法和滑模结合控制单个 AUV,使其能够跟踪期望路径,通过跟随者 AUV 的速度协调编队控制器使多个 AUV 形成期望编队队形并保持,把整个编队控制转化为速度控制和姿态控制,提高了系统鲁棒性和自适应,满足多 AUV 对速度,姿态,位置的要求。仿真实验和湖试表明:本文方法能快速有效地实现编队队形控制,并解决传统领航跟随法编队在折线切换时出现长时间编队重构并可能相撞等问题。

参考文献

[1] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017(2):5-34.
QIAN D, ZHAO J, YANG Y, et al. Development trend of military UUV (Ⅰ): A review of U. S. military unmanned system development plan [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017(2):5-34.

[2] WYNN R B, HUVENNE V A I, BAS T P L, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. Marine Geology, 2014, 352(2): 451-468.

[3] KHODAYARI M H, BALOCHIAN S. Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(3):559-578.

[4] 马利民. 欠驱动 AUV 全局无抖振滑模轨迹跟踪控制[J]. 智能系统学报, 2016, 11(2):200-207.
MA L M. Global chattering-free sliding mode trajectory tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016, 11(2):200-207.

[5] SARHADI P, NOEI A R, KHOSRAVI A. Model reference adaptive PID control with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle[M]. North-Holland Publishing Co. 2016,83:87-93.

[6] 董早鹏, 刘涛, 万磊,等. 基于 Takagi-Sugeno 模糊神经网络的欠驱动无人艇直线航迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4):863-870.
DONG Z P, LIU T, WAN L, et al. Straight-path tracking control of underactuated USV based on Takagi-Sugeno fuzzy neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4):863-870.

[7] LIANG X, YOU Y, SU L, et al. Path following control for underactuated auv based on feedback gain backstepping[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(4):829-835.

[8] DAS B, SUBUDHI B, PATI B B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: An overview [J]. International Journal of Automation and Computing 2016, 13(3):199-225.

[9] 易国, 毛建旭, 王耀南,等. 非完整移动机器人领航-跟随编队分布式控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9):182-188.
YI G, MAO J X, WANG Y N, et al. Distributed control for leader-follower formation tracking of multiple nonholonomic vehicles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(9):182-188.

[10] 雷艳敏, 冯志彬, 宋继红. 基于行为的多机器人编队控制的仿真研究[J]. 长春大学学报, 2008, 18(8): 40-44.
LEI Y M, FENG ZH B, SONG J H. The simulation study on formation control of multi-robot system based on behaviors[J]. Journal of Changchun University, 2008, 18(8):40-44.

[11] CUI R X, YAN W S, XU D M, et al. Formation control of AUV based on virtual reference point[J]. Fire Control & Command Control, 2008(10):53-57.

[12] PENG Z, WANG D, WANG H, et al. Coordinated formation pattern control of multiple marine surface vehicles with model uncertainty and time-varying ocean currents[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 25(7-8):1771-1783.

[13] BORHAUG E, PAVLOV A, PETTERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]. 47th IEEE Conference on Decision and Control. 2008: 4984-4991.

[14] CAHARIJA W, PETTERSEN K Y, GRAVDAHL J T, et al. Integral LOS guidance for horizontal path following of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of vertical ocean currents[C]. American Control Conference (ACC). 2012: 5427-5434.

[15] 张伟, 郁晨曦, 滕延斌,等. 基于模型预测控制的 UUV 路径跟踪控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2017(11): 2659-2666.
ZHANG W, YU CH X, TENG Y B, et al. Research on UUV path tracking control based on model predictive control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017(11):2659-2666.

[16] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Norwegian University of Science and Technology, 2011:248-252.

[17] ZHANG W, TENG Y, WEI S L, et al. The robust H-infinity control of UUV with Riccati equation solution interpolation [J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 252-262.

[18] 徐健, 汪慢, 乔磊,等. 欠驱动 UUV 三维轨迹跟踪的反步动态滑模控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015(8):107-113.
XU J, WANG M, QIAO L, et al. Backstepping dynamical sliding mode controller for three-dimensional trajectory tracking of underactuated UUV[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology 2015 (8):107-113.

[19] 普湛清, 王巍, 张扬帆,等. UUV 平台 OFDM 水声通信时变多普勒跟踪与补偿算法[J]. 仪器仪表学报, 2017(7):1634-1644.
PU ZH Q, WANG W, ZHANG Y F, et al. Time-variant doppler tracking and compensation in underwater acoustic OFDM communication for UUV platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017(7):1634-1644.

[20] 王宏健, 李村, 么洪飞,等. 基于高斯混合容积卡尔曼滤波的 UUV 自主导航定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2):254-261.
WANG H J, LI C, YAO H F, et al. Gaussian mixture cubature Kalman filter based autonomous navigation and localization algorithm for UUV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2):254-261.

作者简介

李娟,2000 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2003 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,2008 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为哈尔滨工程大学副教授,主要研究方向为船舶智能控制。

E-mail:lijuan041@ hrbeu.edu.cn

Li Juan received her B.Sc. degree in 2000, M.Sc. degree in 2003 and Ph. D. degree in 2008 all from Harbin Engineering University. Now, she is an associate professor in Harbin Engineering University. Her main research interest includes ship intelligent control.

袁锐锟,2017 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大学硕士研究生,主要研究方向为自主水下机器人智能控制和编队控制策略。

E-mail:yuanruikun@ hrbeu.edu.cn

Yuan Ruikun received his B.Sc. degree in 2017 from Harbin Engineering University; now, he is a M.Sc. candidate in Harbin Engineering University. His main research interest includes intelligent control and formation control of AUVs.

张宏瀚(通信作者),2005 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2008 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,2010 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为哈尔滨工程大学讲师,主要研究方向为水下无人航行器智能控制和水下无人系统优化设计。

E-mail:oceanzhh@ hrbeu.edu.cn

Zhang Honghan (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2005, M.Sc. degree in 2008 and Ph.D. degree in 2010 all from Harbin Engineering University. Now, he is a lecturer in Harbin Engineering University. His main research interest includes intelligent control of UUV and optimal design of underwater unmanned system.