

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201012018

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20120423.1518.001.html>

单水泵无人滑行艇航向的反步自适应滑模控制

廖煜雷¹, 庄佳园¹, 庞永杰¹, 杜鑫²

(1. 哈尔滨工程大学 水下智能机器人技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 总参陆航研究所, 北京 100020)

摘要:针对单泵喷水推进型无人滑行艇航向跟踪的非线性系统控制问题,对无人滑行艇的运动稳定性分析表明,其具有水平面内的自动稳定性.考虑建模误差和外界干扰力影响下的滑行艇运动响应模型,基于 backstepping 方法和滑模控制理论,提出了一种自适应滑模控制律.利用 Lyapunov 函数,证明该控制律保证了航向跟踪系统的全局渐近稳定性.仿真对比结果验证了所提出控制器的有效性.

关键词:单泵喷水推进器;无人滑行艇;航向控制;滑模控制;backstepping 法

中图分类号:TP273;U664 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2012)03-0246-05

Backstepping adaptive sliding mode control for an unmanned planning craft course system with single waterjet

LIAO Yulei¹, ZHUANG Jiayuan¹, PANG Yongjie¹, DU Xin²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Army Aviation Institute, Beijing 100020, China)

Abstract: The course-tracking nonlinear control problem of an unmanned planning craft with single waterjet was addressed in this paper. Based on motion stability analysis of the unmanned planning craft, the system had automatic stability on the horizontal plane. Considering the motion response model affected by the modeling errors and external disturbances, an adaptive sliding mode control law was proposed via the sliding mode control theory and backstepping method. By means of the Lyapunov function, it was proven that the proposed control law can render the course-tracking system globally asymptotically stable at the origin. Simulations results illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: single waterjet; unmanned planning craft; course control; sliding mode control; backstepping method

无人水面艇(unmanned surface vehicle, USV),是一种自主式的无人水面小型船舶.文中 USV 是装备单泵喷水推进器的刚性充气滑行艇.在不同航速下,艇体的浸湿面积和吃水等会发生很大变化,其艇体各种水动力系数也将随航速的变化而改变,故该 USV 具有强非线性、不确定性和时变性的特点,同时受风浪流等海洋环境干扰力的影响较大,要建立其精确的 USV 动力学模型非常困难,因此,控制算法必须能够适应被控系统模型参数的变化.作为自主航行的水面智能体,航向控制问题尤为突出,设计具有自适应性的自动驾驶操舵系统显得非常重要.

当前船舶航向的非线性控制方法主要有自适应

控制^[1]、现代鲁棒控制^[2]、滑模变结构控制^[3]、Backstepping 法^[4]、基于人工智能^[5]和以上方法的混合控制策略等^[6-7].在 USV 控制方面,YU 等将鲁棒控制方法应用到 USV 的艏向控制中^[8-9],文献[10]基于 Lyapunov 直接法设计了三体型 USV 的速度控制器,Bao 等针对 USV 的艏向和横向控制问题,基于滑模观测器和滑模控制器设计了艏向和横向联合控制器^[11],文献[12]利用 Lyapunov 直接法和 Backstepping 方法设计了 USV 的速度和艏向联合控制器.

本文讨论了 USV 在未知不确定性影响下的航向跟踪控制问题.首先分析了 USV 的自动稳定性,然后基于 Backstepping 法和滑模控制理论,提出了一种自适应滑模反馈控制律,该控制律能保证航向跟踪系统的全局渐近稳定性,其优点在于具有较短的收敛时间、良好的动态性能和自适应能力.理论分

收稿日期:2010-12-25. 网络出版日期:2012-04-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50909025/E091002);中国博士后科学基金资助项目(20080440838).

通信作者:廖煜雷. E-mail: liaoyulei@hrbeu.edu.cn.

析和仿真对比试验皆表明了文中控制律的正确性和有效性。

1 系统描述和运动稳定性分析

1.1 滑艇操纵运动数学模型

考虑到在大舵角下运动和不稳定船舶的操纵特性,Bech 等在二阶线性 K-T 方程的基础上,进一步发展了非线性响应方程,形成二阶非线性艏摇响应方程^[13]:

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = K\delta + KT_3 \delta. \quad (1)$$

式中: r 是艏摇角速度(顺时针为正), δ 为控制舵角(左舵为正), T_1 、 T_2 、 T_3 为时间常数, K 为回转性指数, α 为模型非线性项系数(Norbbin 系数)。

在操舵不是很频繁的情况下,考虑建模误差和外界干扰力等非匹配不确定性的影响,船舶航向非线性操纵系统可以采用以下的一阶非线性艏摇响应方程(2):

$$T\dot{r} + r + \alpha r^3 = K\delta + TF. \quad (2)$$

式中: T 为时间常数; F 为建模误差 Δ 和未知外界干扰力 ω 的不确定性总和,即 $F = \Delta(\psi, \dot{\psi}) + \omega$,假设不确定性的上界为 $|F| \leq \bar{F}$,且为慢变过程 $\dot{F} = 0$ 。

USV 艏向角 ψ 与艏摇角速度 r 的关系为

$$\dot{\psi} = r. \quad (3)$$

1.2 航向稳定性分析

2010 年 5 月,该 USV 在山东省蓬莱海域进行了大量的直航、回转和 Z 型机动等操纵性试验,如图 1 所示。对试验数据进行系统辨识得到了艇体的水动力系数,文中的 USV 操纵性参数分别为 $K = -2.364$ 、 $T = 5.489$ 、 $T_1 = 6.255$ 、 $T_2 = 0.331$ 。

船舶在水平面内的航向稳定性包括自动稳定性和控制稳定性^[13]。

首先研究自动稳定性,忽略式(1)的非线性项,其特征方程式为

$$T_1 T_2 \lambda^2 + (T_1 + T_2) \lambda + 1 = 0. \quad (4)$$

式(4)的 2 个特征根 λ_1 、 λ_2 可按韦达定理求得

$$\lambda_1 = -\frac{1}{T_1}, \lambda_2 = -\frac{1}{T_2}.$$

为了判断水平面的自动稳定性,只需判断特征方程(4)的根的符号,而并不需要解方程式的根。采用古尔维茨判别法,式(4)的两根都具有负实部的充要条件是方程式的系数全部大于零,即

$$\begin{cases} T_1 T_2 > 0, \\ T_1 + T_2 > 0. \end{cases}$$

也即要求 $T_1 > 0$, $T_2 > 0$ 。因为 $T_1 = 6.255 > 0$, $T_2 = 0.331 > 0$,由古尔维茨判别法可知,该 USV 具有水平面

内的直线自动稳定性,习惯上也常称为航向稳定性。

与常规水面船舶相比,如“育龙”号实习船^[7]中, $K = -0.48$ 、 $T = 216.8$,文中 USV 的 T 值较小,因此具有较好的稳定性;而 K 较大,因此回转性能也更好。可见该艇具有良好的机动性能,这是由艇型和操舵方式决定的,即 USV 动力装置为喷水推进器,它通过改变喷嘴转角来进行艏向控制(对喷嘴转角的操纵,按习惯称为舵角操纵)。

显然,USV 航向跟踪控制系统(2)、(3)是单输入单输出的不确定性非线性系统,控制问题可描述为设计反馈控制律,保证 USV 的艏向跟踪误差有界且收敛到零。



图1 试验中的 USV

Fig.1 Unmanned surface vessel operating in the sea

2 反步自适应滑模控制器

2.1 反步自适应滑模控制器设计

首先,定义如下状态变换:

$$\begin{cases} z_1 = \psi - \psi_d, \\ \chi = c_1 z_1, \\ z_2 = \dot{z}_1 + \chi = r + c_1 z_1 - \dot{\psi}_d. \end{cases}$$

式中: ψ_d 为期望艏向角,满足二阶可导的光滑函数; χ 为稳定项辅助方程; c_1 为正常数。

定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2.$$

对 V_1 求导,则

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 - c_1 z_1^2.$$

定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_2 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} \sigma^2.$$

式中: σ 为滑模切换函数。定义切换函数为

$$\sigma = k_1 z_1 + z_2.$$

式中: k_1 为正常数。对 V_2 求导,则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \sigma \dot{\sigma} = & -c_1 z_1^2 + z_1 \dot{z}_2 + \\ & \sigma [k_1 (z_2 - c_1 z_1) + f + b\delta + F + \dot{\chi} - \dot{\psi}_d]. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $f = -r/T - \alpha r^3/T$, $b = K/T$ 。

取反馈控制律为

$$\delta = b^{-1} [\ddot{\psi}_d - k_1 (z_2 - c_1 z_1) - f -$$

$$\bar{F}\text{sgn}(\sigma) - \dot{\chi} - h(\sigma + \beta\text{sgn}(\sigma))]. \quad (6)$$

式中: h, β 皆为正常数. 将式(6)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \\ & |\sigma| (|F| - \bar{F}) - h\sigma^2 - h\beta|\sigma| \leq \\ & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - h\sigma^2 - h\beta|\sigma|. \end{aligned} \quad (7)$$

取矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} c_1 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix}, \quad (8)$$

由于

$$\begin{aligned} Z^T Q Z &= [z_1 \ z_2] \begin{bmatrix} c_1 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix} [z_1 \ z_2]^T = \\ & (c_1 + hk_1^2)z_1^2 + (2hk_1 - 1)z_1 z_2 + h z_2^2. \end{aligned}$$

式中: $Z = [z_1 \ z_2]^T$. 则当 $|Q| = h(c_1 + k_1) - 1/4 > 0$ 时, 式(7)有

$$\dot{V}_2 \leq -Z^T Q Z - h\beta|\sigma| \leq 0.$$

那么只要选取适当的 h, c_1, k_1 使得 $|Q| > 0$, 从而保证 Q 为正定矩阵, 则必有 $\dot{V}_2 \leq 0$ 成立. 也就保证了 USV 航向跟踪系统是 Lyapunov 意义下全局渐近稳定的.

在实际控制中, USV 航态复杂多变, 因此具有强非线性, 这导致航向非线性系统的模型参数很难精确获得且具有较大不确定性; 同时, USV 航行于复杂海洋环境中, 经常受到未知外加干扰力的影响. 因此, 总不确定性 F 的上界很难确定. 为了避免 F 上界带来的抖振等问题, 采用自适应算法对 F 进行估计^[14].

设 \hat{F} 为 F 的估计值, 估计误差 $\tilde{F} = F^* - \hat{F}$. 定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{F}^2. \quad (9)$$

式中: γ 为正常数. 对式(9)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F}(\dot{\tilde{F}} - \gamma\sigma) + \\ & \sigma[k_1(z_2 - c_1 z_1) + f + b\delta + \hat{F} + \dot{\chi} - \dot{\psi}_d]. \end{aligned} \quad (10)$$

设计自适应反馈控制律为

$$\begin{aligned} \hat{\delta} &= b^{-1}[\dot{\psi}_d - k_1(z_2 - c_1 z_1) - f - \\ & \hat{F} - \dot{\chi} - h(\sigma + \beta\text{sgn}(\sigma))]. \end{aligned} \quad (11)$$

定义不确定性 F 的自适应律为

$$\dot{\hat{F}} = \gamma\sigma. \quad (12)$$

将式(11)和(12)代入式(10), 且由式(8)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - h\sigma^2 - h\beta|\sigma| = \\ & -Z^T Q Z - h\beta|\sigma| \leq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

2.2 Backstepping 控制器设计

为了与文中自适应反步(Backstepping)滑模控制器的控制效果进行对比, 下面利用 Backstepping

法设计 USV 航向跟踪控制器, 其中假设不确定性 $F=0$.

引入如下 2 个误差变量:

$$\begin{cases} x_1 = \psi - \psi_d, \\ x_2 = r - \dot{\psi}_d - \eta. \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\eta = -n_1 x_1$ 为虚拟控制输入, n_1 为正常数.

定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_4 = \frac{1}{2} x_1^2. \quad (15)$$

对式(15)求导可得 $\dot{V}_4 = -n_1 x_1^2 + x_1 x_2$. 如果 $x_2 = 0$, 则 $\dot{V}_4 \leq 0$, 为此需要进行下一步设计. 定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_5 = V_4 + \frac{1}{2} x_2^2. \quad (16)$$

对式(16)求导可得

$$\dot{V}_5 = -n_1 x_1^2 + x_1 x_2 + x_2(f + b\delta - \dot{\psi}_d - \dot{\eta}).$$

为使 $\dot{V}_5 \leq 0$, 设计反馈控制律为

$$\delta = b^{-1}(\dot{\psi}_d + \dot{\eta} - f - x_1 - n_2 x_2). \quad (17)$$

式中: n_2 为正常数, 将控制律(14)代入式(13)可得

$$\dot{V}_5 = -n_1 x_1^2 - n_2 x_2^2 \leq 0.$$

由设计过程可知, 系统满足 Lyapunov 稳定性理论条件, 因此误差变量 x_1, x_2 是渐近稳定的, 这保证了 USV 航向跟踪系统是全局渐近稳定的.

2.3 稳定性分析

由上面的设计过程可知, Backstepping 法是一种由前向后递推的设计方法, 通过逐步迭代设计 Lyapunov 函数使系统的误差渐近稳定, 最终实现对原系统的全局渐近镇定.

定理 1 考虑存在不确定性影响的航向非线性系统(2)、(3), 在自适应反馈控制律(11)和不确定性自适应控制律(12)的作用下, 误差变量 z_1, z_2, σ 是全局渐近稳定的, 保证了 USV 航向跟踪系统的全局渐近稳定性, 实现了航向的自适应控制.

证明 由 2.1 节的设计过程得证.

定理 2 在反馈控制律(17)的作用下, 误差变量 x_1, x_2 全局渐近收敛到零, 即 USV 状态误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\psi - \psi_d| = \lim_{t \rightarrow \infty} |r - \dot{\psi}_d| = 0$, 这保证了 USV 航向跟踪控制系统是全局渐近稳定的.

证明 由 2.2 节的设计过程得证.

3 仿真结果与分析

根据海试操纵性试验结果, 文中 USV 操舵系统的参数为 $K = -2.364, T = 5.489, \alpha = 0.000\ 094$. 为了方便阐述, 反步自适应滑模控制器称为控制律 1, Backstepping 控制器称为控制律 2. 控制律 1 的设计参数为 $c_1 = 0.9, k_1 = 0.15, h = 0.26, \beta = 0.002, \gamma = 0.000\ 1$. 控制律 2 的设计参数为 $n_1 = 0.03, n_2 = 7$.

在下面的仿真对比试验中,初始值均取为: $\psi_0 = 30^\circ, r_0 = 0$,同时文中考虑舵角饱和限制条件为 $-30^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$,不确定性设为建模误差 $\Delta = \sin 2\pi t (^\circ \cdot s^{-2})$ 和干扰力 $\omega = \pm 1 (^\circ \cdot s^{-2})$ 的正态白噪声.设置期望航向为谐波航向 $\psi_d = \sin(t/40)$ 和直航 $\psi_d = 0$ 2种情形,使用 Matlab Simulink 软件进行数值仿真,仿真试验结果如图2~9所示.

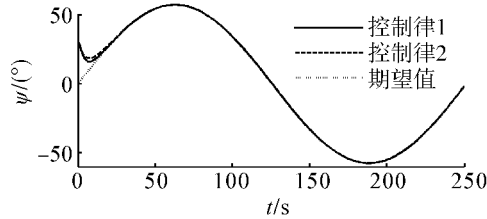


图2 艏向角 ψ 响应曲线(直航)
Fig.2 The response graph of yaw ψ (straight)

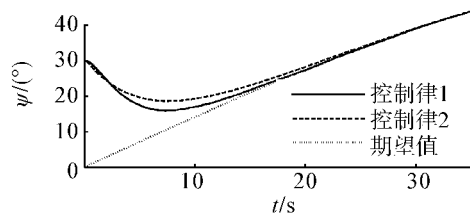


图3 艏向角 ψ 响应曲线(起始到35 s)
Fig.3 The response graph of yaw ψ (start to 35 s)

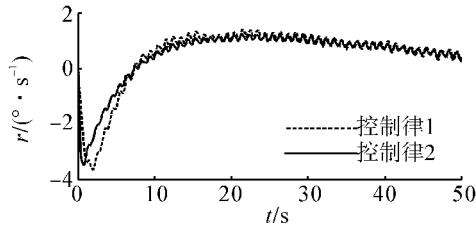


图4 角速度 r 响应曲线(直航)
Fig.4 The response graph of angular velocity r (straight)

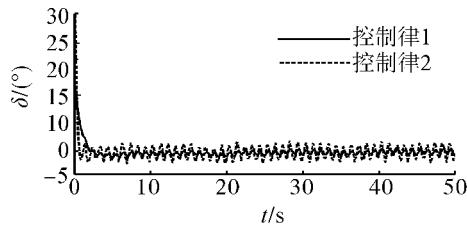


图5 控制舵角 δ 响应曲线(直航)
Fig.5 The response graph of control rudder δ (straight)

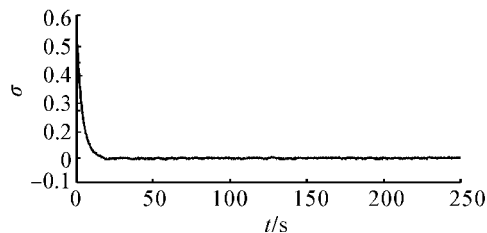


图6 滑模面 σ 响应曲线
Fig.6 The response graph of sliding mode surface σ

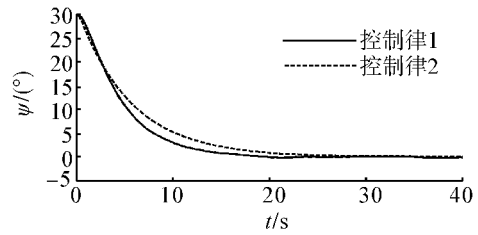


图7 艏向角 ψ 响应曲线(谐波)
Fig.7 The response graph of yaw ψ (harmonic)

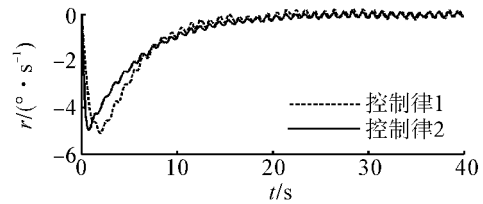


图8 角速度 r 响应曲线(谐波)
Fig.8 The response graph of angular velocity r (harmonic)

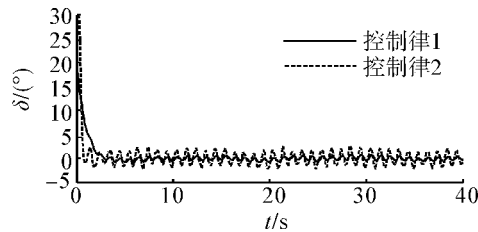


图9 控制舵角 δ 响应曲线(谐波)
Fig.9 The response graph of control rudder δ (harmonic)

谐波航向跟踪的试验结果如图2~6所示.由图3、5可知,对比控制律2,控制律1有更短的收敛时间和更小的控制舵角(意味着更小的能量消耗);同时,在不确定性的影响下,舵角振荡较小、输出平缓,这意味着控制律1有较好的动态性能和自适应能力.直航控制的试验结果如图7~9所示,与控制律2相比,控制律1有较好的控制性能和自适应能力.从图2、7可看出,2种控制律皆能完成航向跟踪,这验证了定理1和定理2.图6也说明了跟踪系统的滑模切换面 σ 是渐近稳定的.

表1中列出了2种控制律的航向控制效果对比数据,其中, T_s 为镇定时间; $W_e = \int_0^\infty |\varphi - \varphi_d| dt$ 为艏向跟踪误差代价函数; $J_E = \int_0^\infty |\delta| d\tau$ 为输出舵角代价函数,即控制能量函数.显然,控制律1比控制律2有更高的控制精度和跟踪性能,以及较小的控制能量消耗,且镇定时间更短.

表1 控制效果对比

控制律	谐波跟踪			直航镇定		
	T_s/s	$W_e/(^\circ)$	J_E	T_s/s	$W_e/(^\circ)$	J_E
控制律1	18	152	129	19	144	27
控制律2	31	174	298	25	173	56

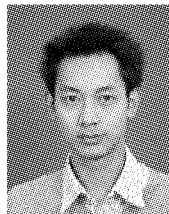
4 结束语

文中讨论了在模型不确定性和外界干扰下, USV 航向非线性系统的控制问题. 对试验数据的分析表明, 该 USV 在水平面内运动是静不稳定的, 但具有运动稳定性, 基于滑模控制理论和 Backstepping 法, 提出了一种反步自适应滑模控制器. 通过理论证明, 在该控制律作用下 USV 的航向跟踪控制系统是全局渐近稳定的. 数值仿真对比试验表明所提控制律具有良好的自适应性和跟踪性能, 该方法也可推广到其他海洋运载系统. 探讨更复杂环境下的航向控制问题, 将是未来的研究重点.

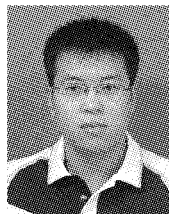
参考文献:

- [1] SKJETNEA R, FOSSEN T I, KOKOTOVIC P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory [J]. *Automatica*, 2005, 41 (2): 289-298.
- [2] HU S S, YANG P H, JUANG J Y, et al. Robust nonlinear ship course keeping control by H_∞ I/O linearization and μ -synthesis [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 13(1): 55-70.
- [3] 刘雨, 郭晨, 吕进. 基于 backstepping 的船舶航向滑模控制 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2007, 38(增刊1): 278-279.
LIU Yu, GUO Chen, LÜ Jin. Sliding-mode control of ship course tracking based on backstepping [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38 (suppl. 1): 278-279.
- [4] 朱齐丹, 周芳, 赵国良, 等. 基于反步法和滑模观测器的船舶航向控制 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(4): 122-125.
ZHU Qidan, ZHOU Fang, ZHAO Guoliang, et al. Control of ship courses using backstepping and sliding mode observer [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(4): 122-125.
- [5] 汪洋, 郭晨, 孙富春, 等. 基于动态神经模糊算法的船舶航向自适应控制 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(10): 1159-1164.
WANG Yang, GUO Chen, SUN Fuchun, et al. Adaptive control of ship course using a dynamic neural fuzzy algorithm [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30 (10): 1159-1164.
- [6] 罗伟林, 邹早建, 李铁山. 船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(8): 893-895.
LUO Weilin, ZOU Zaojian, LI Tieshan. Robust tracking control of nonlinear ship steering [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 893-895.
- [7] 袁雷, 吴汉松. 船舶航向非线性系统的多滑模自适应模糊控制 [J]. *智能系统学报*, 2010, 5(4): 308-312.
YUAN Lei, WU Hansong. Multiple sliding mode adaptive fuzzy controller for nonlinear marine autopilot systems [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2010, 5(4): 308-312.
- [8] YU Z, BAO X, NONAMI K. Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors [J]. *Journal of System Design and Dynamics*, 2008, 2(1): 389-400.
- [9] YU Z, BAO X, NONAMI K. Mixed H_2/H_∞ based course following control for a small low cost autonomous boat [J]. *ICGST International Journal on Automatic Control and Systems Engineering*, 2007, 7(1): 51-59.
- [10] KUMARAWADU S, KUMARA K J C. On the speed control for automated surface vehicle operation [C]//The Third International Conference on Information and Automation for Sustainability. Melbourne, Australia, 2007: 135-140.
- [11] BAO X, NONAMI K, YU Z. Combined yaw and roll control of an autonomous boat [C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan, 2009: 188-193.
- [12] LIAO Yulei, PANG Yongjie, WAN Lei. Combined speed and yaw control of underactuated unmanned surface vehicles [C]//The 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Wuhan, China, 2010: 157-161.
- [13] 范尚雍. 船舶操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 30-39.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 240-247.

作者简介:



廖煜雷, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要研究方向为 USV 基础运动控制和欠驱动船舶运动控制, 发表学术论文 10 余篇。



庄佳园, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要研究方向为水面 USV 路径规划和运动控制。



庞永杰, 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 第 3、4 届海洋工程学会理事, 主要研究方向为水下机器人总体设计与运动控制技术. 目前主持和参与省部级以上科研项目多项, 获得国家科技进步二等奖 1 次, 国防科学技术一、二、三等奖各 1 次, 发表学术论文 50 余篇。