

无人水面艇复合自适应轨迹跟踪控制^{*}

王亮, 孙太任, 卫毓骊

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 针对存在模型参数不确定性和极易受到风、浪、流等时变干扰的欠驱动无人水面艇的轨迹跟踪控制问题, 根据扰动观测器能对不确定项和外界干扰进行估计和补偿且具有鲁棒性的特点, 提出一种基于复合扰动观测器的自适应轨迹跟踪控制方法。该复合自适应观测器利用跟踪误差和估计误差共同调节自适应参数, 在不激励高频未建模动态的情况下, 该复合自适应闭环控制系统可得到更快的收敛速度和更高的跟踪精度。理论分析和仿真实验证明了所提出的无人水面艇复合自适应控制方法的有效性。

关键词: 无人水面艇; 轨迹跟踪; 扰动观测器; 自适应控制

中图分类号: TP393.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1437-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.034

Composite adaptive trajectory tracking control for unmanned surface vessels

Wang Liang, Sun Tairen, Wei Yuli

(School of Electronic & Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Considering the model parametric uncertainties and time-varying disturbances induced by waves, wind, and ocean current in the trajectory tracking control of underactuated surface vessels, this paper proposed a novel adaptive trajectory tracking control based on disturbance observer, in view of the composite disturbance observer's robustness in estimating and compensating uncertainties and external disturbance. The composite adaptive disturbance observer used estimation errors and tracking errors to adjust the adaptive parameters simultaneously, the proposed composite adaptive disturbance observer-based tracking control for the unmanned surface vessel could achieve faster convergence speed and higher tracking accuracy without exciting high-frequency unmodeled ship dynamics. Theoretical analysis and simulation results show the effectiveness of the proposed composite adaptive control for unmanned surface vessel.

Key words: unmanned surface vessel; trajectory tracking; disturbance observer; adaptive control

0 引言

无人水面艇在军事和农用方面都有广泛的运用,如海上侦察、海洋资源探测、海上救援和天气预测等^[1,2]。无人水面艇的轨迹跟踪控制问题是实现无人水面艇智能化运行的关键问题。随着海洋工程技术的发展,对无人水面艇进行轨迹跟踪控制已经成为一个重要的研究方向^[3-5]。轨迹跟踪控制(trjectory tracking control)是指在设定时间内控制对象从初始位置到达参考轨迹设定的位置,且参考轨迹一般表示为时间的函数^[6]。对欠驱动无人水面艇进行轨迹跟踪控制对参考模型的要求较高,控制器设计也较复杂,而无人水面艇所处环境的复杂性导致其极易受外界环境的干扰,由此建立的参考模型也存在诸多的不确定性,所以对无人水面艇进行鲁棒控制是很重要的研究课题。

目前,在无人水面艇的鲁棒控制方面已取得很多卓有成效的成果,文献[7]基于 back-stepping 技术设计了一种自适应控制器,实现了在常值扰动干扰下船舶跟踪控制。文献[8]在外界干扰未知的情况下,将近似估计方法和控制设计技术相结合用来估计外界干扰的变化,采用全状态反馈和输出反馈对扰动进行补偿。文献[9]采用神经网络反馈前馈补偿器对外界未

知扰动进行补偿,设计基于神经网络反馈前馈补偿器的自适应输出反馈控制器对高速船舶进行轨迹跟踪控制。

扰动观测器作为一种抑制扰动的工具,其计算量小且不需要添加额外的传感器,能明显提高运动控制系统的抗干扰能力^[10-12]。文献[13]基于干扰观测器、反步法和李雅普诺夫直接法,设计了能应对时变干扰的轨迹跟踪控制器。文献[14]设计了一种终端滑模干扰观测器,能保证所得到的估计误差在有限的时间内收敛到零。上述扰动观测器仅仅是基于估计误差进行设计,在控制器设计时需采用大增益对外界扰动进行补偿,控制输入的绝大部分用来进行扰动补偿,小部分用来进行轨迹跟踪,这使得跟踪控制时间长、精度低。

复合自适应控制将跟踪误差和估计误差相结合共同调节参数估计,它是一种直接/间接自适应控制。由于在复合自适应中采用高自适应增益,控制响应的光滑性是复合自适应控制的一大优点。所以,在不激励高频未建模动态的情况下,复合自适应闭环控制系统可得到更快的收敛速度和更高的跟踪精度^[15]。在复合自适应神经网络控制和模糊控制等方面,已取得很多重要成果^[16-19]。但是,在复合自适应扰动观测器的复合自适应控制方面成果尚未见到。

基于此,本文利用扰动观测器控制的优点并基于复合自适

收稿日期: 2017-01-04; **修回日期:** 2017-02-21 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61503158);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130536, BK20130533);农业工程江苏省优势学科资助项目;广东省自然科学基金—博士启动资助项目(2014A030310257)

作者简介: 王亮(1993-),男,江苏常州人,硕士,主要研究方向为机器人控制(1165233571@qq.com);孙太任(1985-),山东临沂人,副教授,主要研究方向为机器人控制、智能控制;卫毓骊(1989-),江苏宿迁人,硕士,主要研究方向为机器人控制。

应控制的思想,为无人水面艇提出基于复合自适应扰动观测器的轨迹跟踪控制方法。基于扰动观测器的控制是一种前馈扰动补偿控制,而本文提出的复合自适应扰动观测器将估计误差和轨迹跟踪误差相结合,共同调节自适应参数。因此,本文提出的复合自适应控制是一种前馈—反馈复合控制。

1 问题描述

带扰动的无人水面艇的三自由度的欧拉—拉格朗日模型形式为

$$\dot{\eta} = J(\psi)v \quad (1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau + d(\eta, v, t) \quad (2)$$

其中: M 表示正定常数惯性矩阵; $C(v)$ 表示科里奥利/向心力矩阵; $D(v)$ 为阻尼参数矩阵; $\eta = [x, y, \psi]^T \in \mathbb{R}^3$ 为位置向量; ψ 为无人水面艇在地球坐标系中的方向; $v = [u, v, r]^T$ 为速度向量; $J(\psi)$ 为体坐标系到惯性坐标系的变换矩阵; $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 为控制输入向量; $d(\eta, v, t)$ 为不确定的结构化扰动和未知的外部扰动。

变换矩阵 $J(\psi)$ 的形式如下且 $J(\psi)^{-1} = J(\psi)^T$:

$$J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设 1 扰动 $d(\eta, v, t)$ 对时间 t 的导数是有界的,即 $\dot{d} = h$ 且 $\|M^{-1}\dot{d}\| = \|M^{-1}h\| \leq H_1$, H_1 为一个正的常值。

假设 2 参考轨迹 $\eta_d(t)$ 是两次可微的。

本文的目的是在假设 1 和 2 的前提下,为无人水面艇设计一种复合自适应控制来精确地跟踪参考轨迹 $\eta_d(t)$ 。

2 基于复合自适应扰动观测器的无人水面艇轨迹跟踪控制

定义 e_η 为轨迹跟踪误差,即 $e_\eta = \eta - \eta_d$,结合式(1)可得轨迹跟踪误差的动力学表达式为

$$\dot{e}_\eta = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d = J(\psi)v - \dot{\eta}_d \quad (4)$$

记 $\xi = J(\psi)v$, 那么将 ξ 的期望信号设计为

$$\xi_d = \dot{\eta}_d - k_1 e_\eta \quad (5)$$

记 $e_\xi = \xi - \xi_d$ 为信号的跟踪误差,可得

$$\dot{e}_\eta = \xi - \dot{\eta}_d = \xi - (\xi_d + k_1 e_\eta) = e_\xi - k_1 e_\eta \quad (6)$$

那么 e_ξ 的导数可以表示为

$$\dot{e}_\xi = J(\psi)\dot{v} + \dot{J}(\psi)v - \ddot{\eta}_d + k_1 \dot{e}_\eta \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)可得

$$\dot{e}_\xi = J(\psi)[-M^{-1}(C(v)v + D(v)v + M^{-1}\tau + d_1) + \dot{J}(\psi)v - \ddot{\eta}_d + k_1 \dot{e}_\eta] + \quad (8)$$

其中:

$$\dot{J}(\psi) = \begin{bmatrix} -r \sin \psi & -r \cos \psi & 0 \\ r \cos \psi & -r \sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = J(\psi) \begin{bmatrix} 0 & -r & 0 \\ r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将控制律设计为

$$M^{-1}\tau = M^{-1}((C(v)v + D(v)v) - \hat{d} - J^T(\psi)(\dot{J}(\psi)v - \ddot{\eta}_d + k_1 \dot{e}_\eta) - k_2 J^T(\psi)e_\xi) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$\dot{e}_\xi = -k_2 e_\xi + (d_1 - \hat{d}) = -k_2 e_\xi + \tilde{d} \quad (10)$$

由于矩阵 M 为正定常数矩阵且假设 1 成立,那么传统的

扰动观测器设计为

$$\hat{d} = \beta + K_0 v \quad (11)$$

$$\dot{\beta} = -K_0 \beta - K_0[-M^{-1}(C(v)v - D(v)v + \tau) + K_0 v] \quad (12)$$

受传统的扰动观测器式(11)(12)的启发,将轨迹跟踪误差加入到扰动观测器的设计中,所以对基于无人水面艇模型式(1)(2)设计如下复合自适应扰动观测器:

$$\hat{d} = \beta + K_0 v + k_3 e_\eta \quad (13)$$

$$\dot{\beta} = -K_0 \beta - K_0[-M^{-1}(C(v)v - D(v)v + \tau) + K_0 v + k_3 e_\eta] \quad (14)$$

其中: \hat{d} 表示外界时变扰动的估计值; $K_0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为对称正定的观测器增益矩阵; β 为中间辅助向量。

对式(13)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}} &= \dot{\beta} + K_0 \dot{v} + k_3 \dot{e}_\eta = -K_0 \beta - K_0[-M^{-1}(C(v)v - D(v)v + \tau) + \\ &K_0 v + k_3 e_\eta] + K_0[-M^{-1}(C(v)v - D(v)v + \tau) + d_1] + k_3 \dot{e}_\eta = \\ &K_0[d_1 - (\beta + K_0 v + k_3 e_\eta)] + k_3(e_\xi - k_1 e_\eta) = \\ &K_0[d_1 - \hat{d}] + k_3 e_\xi - k_1 k_3 e_\eta = K_0 \tilde{d} + k_3 e_\xi - k_1 k_3 e_\eta \end{aligned}$$

定义扰动估计误差由 $\tilde{d} = d_1 - \hat{d}$ 。根据上式可得扰动估计误差的动态模型为

$$\dot{\tilde{d}} = \tilde{d}_1 - K_0 \tilde{d} - k_3 e_\xi + k_1 k_3 e_\eta \quad (15)$$

将式(6)(10)(15)进行联立可得

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\eta^T \\ \dot{e}_\xi^T \\ \dot{\tilde{d}}^T \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_\eta^T \\ e_\xi^T \\ \tilde{d}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{d}_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} -k_1 I & I & 0 \\ 0 & -k_2 I & I \\ k_1 k_3 I & -k_3 I & -K_0 I \end{bmatrix}$; $I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为三阶单位矩阵。

记 $X = [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T$, 则式(14)可表示为 $\dot{X} = AX + B$, $B = [0, 0, \tilde{d}_1]^T$ 。矩阵 A 的特征多项式为

$$|\lambda I - A| = [\lambda^3 + (K_0 + k_1 + k_2)\lambda^2 + (K_0 k_1 + K_0 k_2 + k_1 k_2)\lambda + (K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3)]^3$$

根据劳斯—霍尔维茨(routh-hurwitz)稳定性定理,当满足 $K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3 > 0$ 时,矩阵 A 是稳定的。

定理 1 考虑无人水面艇模型式(1)(2)且假定假设 1、2 成立。为无人水面艇设计复合自适应扰动观测器(见式(13)和(14))和复合自适应轨迹跟踪控制式(9),如果选择合适的参数 $K_0, k_1, k_2, k_3 > 0$ 且满足 $K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3 > 0$, 则跟踪误差 e_η 和 e_ξ 将一致收敛到零点的邻域,且可通过选取合适的参数将该邻域调到较小的范围。

证明 选取 K_0, k_1, k_2, k_3 使得矩阵 A 最稳定,那么对于任何正定常数矩阵 Q ,存在正定常数矩阵 P 使得 $A^T P + PA = -Q$ 。

设计如下 lyapunov 函数:

$$V(X) = X^T P X \quad (17)$$

对式(17)求关于时间的导数可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(X) &= \dot{X}^T P X + X^T P \dot{X} = (AX + B)^T P X + X^T P (AX + B) = \\ &(A^T X^T + B^T) P X + X^T P A X + X^T P B = \\ &X^T (A^T P + PA) X + B^T P X + X^T P B = -X^T Q X + 2X^T P B \leq \\ &-\lambda_{\min}(Q) \|X\|^2 + 2X^T P B \end{aligned}$$

其中: $\lambda_{\min}(Q)$ 表示正定矩阵 Q 的最小特征值。

由假设 1 可知 $\tilde{d}_1 = M^{-1}h$, $\|M^{-1}h\| < H_1$, 将 $X = [e_\eta^T, e_\xi^T,$

$\tilde{d}^T]^T$ 和 $B=[0,0,\dot{d}_1]^T$ 代入上式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(X) \leq & -\lambda_{\min}(Q) \| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \|^2 + 2 [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T P [0, 0, \dot{d}_1]^T \leq \\ & -\lambda_{\min}(Q) \| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \|^2 + 2 \| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \| \| P \| H_1 \leq \\ & - \| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \| [\lambda_{\min}(Q) \| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \| - 2 \| P \| H_1] \quad (18) \end{aligned}$$

由式(16)可看出,如果 $\| [e_\eta^T, e_\xi^T, \tilde{d}^T]^T \| > \frac{2 \| P \| H_1}{\lambda_{\min}(Q)} > 0$, 那

么 Lyapunov 函数 $V(X)$ 对时间的导数将小于零。因此, $\dot{V}(X)$ 在一个紧集外为负值,从而可知 e_η, e_ξ 和 \tilde{d} 一致最终有界。

说明1 传统的扰动观测器利用建模误差对扰动进行估计,并在控制器中以前馈的形式对扰动进行前馈补偿。为获得较高的扰动估计精度,可能需要高增益来对建模误差进行调节,这容易激励高频未建模动态,影响系统的控制精度。本文提出的复合自适应扰动观测器利用扰动估计误差和轨迹跟踪误差共同调节对扰动的估计。因此,所设计的复合自适应控制方法在不激励高频未建模动态的情况下,可得到更快的收敛速度和更高的跟踪精度。

说明2 在基于扰动观测器的轨迹跟踪控制中,如果跟踪误差的系数为0,将无法保证闭环系统的稳定性。在本文提出的复合自适应控制方法中,如果跟踪误差的系数为0,即式(9)中 k_2 为0,且设计 $k_1 < 1$ 来保证 $K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3 > 0$, 那么闭环控制系统仍可达到稳定。

3 仿真分析

在仿真中,选取如下的矩阵参数^[20]:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} 25.8 & 0 & 0 \\ 0 & 33.8 & 1.0115 \\ 0 & 1.0115 & 2.76 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0.72 & 0 & 0 \\ 0 & 0.86 & -0.11 \\ 0 & -0.11 & 0.5 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -33.8v - 1.0115r \\ 0 & 0 & 25.8u \\ 33.8v + 1.0115r & -25.8u & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

仿真所选择的时变扰动为

$$d(\eta, \nu, t) = \begin{bmatrix} 1.3 + 2\sin(0.02t) + 1.5\sin(0.1t) \\ -0.9 + 2\sin(0.02t - \pi/6) + 1.5\cos(0.3t) \\ -\sin(0.09t + \pi/3) - 4\sin(0.01t) \end{bmatrix}$$

无人水面艇的初始位置、航向角以及航行速度分别设置为 $\eta(0) = [1, 1, \pi/4]^T$ 和 $\nu(0) = [0, 0, 0]^T$, 选定的参考轨迹为 $\eta_d = [4\sin(0.02t), 2.5(1 - \cos(0.05t)), 0.02t]^T$ 。

首先采用传统扰动观测器对无人水面艇进行轨迹跟踪控制仿真,当 $K_0 k_1 k_2 > 0$ 时系统稳定,仿真时选定的参数为 $k_1 = 2, k_2 = 2, K_0 = \text{diag}[10, 10, 10]$ 。其次采用复合自适应扰动观测器对无人水面艇进行轨迹跟踪控制仿真,当满足 $K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3 > 0$ 时系统稳定,仿真时选取的参数为 $k_1 = k_2 = 2, k_3 = 8, K_0 = \text{diag}[10, 10, 10]$ 。仿真结果如图1~3所示。图1为扰动观测器控制下无人水面艇轨迹跟踪曲线,在初始阶段跟踪较慢,在一段时间后可以快速并且稳定地进行轨迹的跟踪,最终在5s左右完全跟踪上参考轨迹。图2为扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪误差曲线,初始阶段的跟踪误差较大,但是误差范围有界且逐渐收敛,最终跟踪误差值收敛到零,表示所设计的控制器能对轨迹进行有效的跟踪。图3为扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪控制输入曲线。

其次采用复合自适应扰动观测器对无人水面艇进行轨迹跟踪控制仿真,当满足 $K_0 k_1 k_2 + k_3 - k_1 k_3 > 0$ 时系统稳定,仿真时选取的参数为 $k_1 = k_2 = 2, k_3 = 8, K_0 = \text{diag}[10, 10, 10]$ 。仿真结果如图4~6所示。图4为复合自适应扰动观测器控制下无

人水面艇的轨迹跟踪曲线,能够在短时间内达到稳定跟踪,最终在3s左右跟踪上参考轨迹,相较于传统的扰动观测器,其稳定跟踪上轨迹的时间缩短了2s。图5为复合自适应扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪误差曲线,跟踪误差能快速收敛到接近0的小邻域内,跟踪速度和精度相较于传统的扰动观测器都有明显的提升。图6为复合自适应扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪控制输入曲线,能快速的进行稳定的控制输出,跟踪控制的稳定性进一步提升。

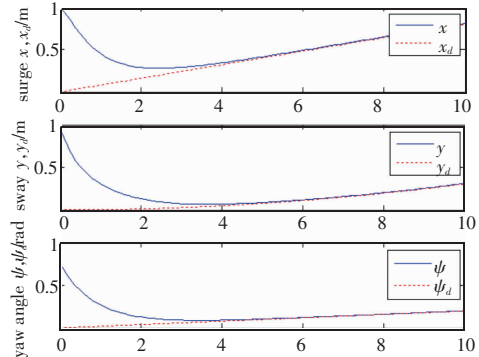


图1 扰动观测器控制下无人水面艇轨迹跟踪曲线

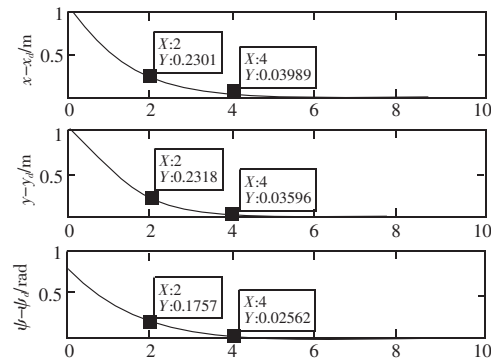


图2 扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪误差

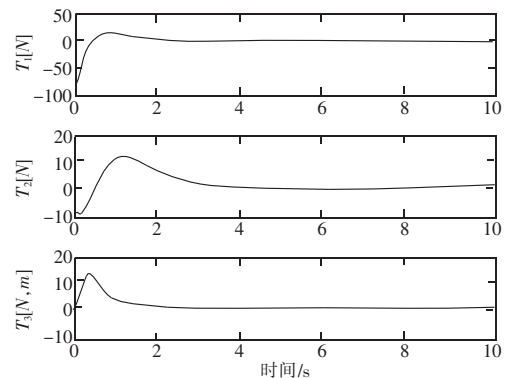


图3 扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪控制输入

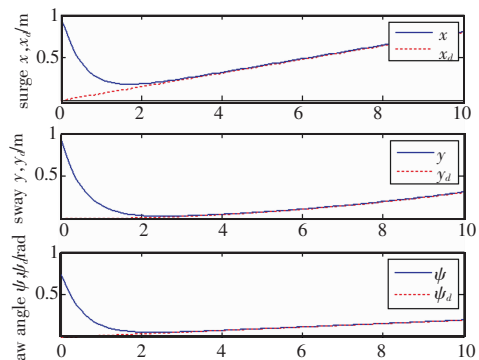


图4 复合自适应扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪曲线

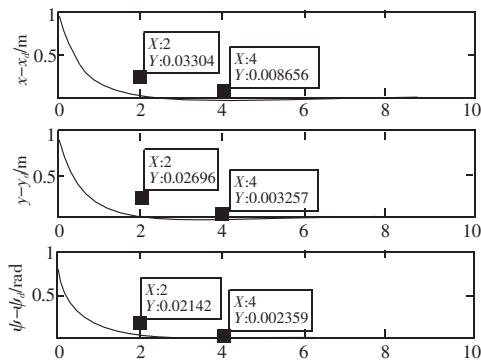


图5 复合自适应扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪误差

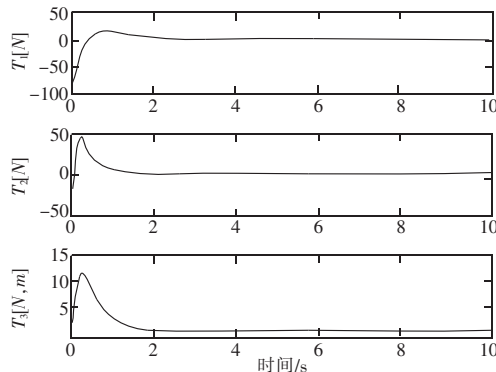


图6 复合自适应扰动观测器控制下无人水面艇的轨迹跟踪控制输入

相较于传统的扰动观测器,采用高增益的复合自适应扰动观测器,其对外界扰动的估计更迅速、更精确,能短时间内对扰动进行精确估计,在轨迹的跟踪控制方面,其具有跟踪速度更快、跟踪精度更高和控制输入快速稳定的优势。

4 结束语

本文研究了带模型参数不确定性和外界扰动的无人水面艇的轨迹跟踪问题,设计了基于复合自适应扰动观测器的轨迹跟踪控制。该复合自适应扰动观测器将估计误差和跟踪误差相结合共同调节自适应参数。通过理论分析和仿真实验研究表明,相较于基于传统扰动观测器的轨迹跟踪控制方法,本文提出的复合自适应控制方法可使无人水面艇具有更高的控制精度和更快的跟踪速度。

参考文献:

- [1] 郭晨,汪洋,孙富春,等. 欠驱动水面船舶运动控制研究综述[J]. 控制与决策,2009,24(3):321-329.
- [2] Do K D, Jiang Z P, Pan J. Global partial-state feedback and output-feedback tracking controllers for underactuated ships[J]. Systems & Control Letters,2005,54(10):1015-1036.

- [3] Švec P, Thakur A, Raboin E, et al. Target following with motion prediction for unmanned surface vehicle operating in cluttered environments[J]. Autonomous Robots,2014,36(4):383-405.
- [4] Dong Wenjie, Yi Guo. Global time-varying stabilization of underactuated surface vessel[J]. IEEE Trans on Automatic Control,2005,50(6):859-864.
- [5] 朱齐丹,马俊达,刘志林. 未知扰动下自主水面船自适应有限时间轨迹跟踪[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(2):368-374.
- [6] Lefeber E, Pettersen K Y, Nijmeijer H. Tracking control of an underactuated ship[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology,2003,11(1):52-61.
- [7] 程金. 水面船舶的非线性控制研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.
- [8] Tee K P, Ge S S. Control of fully actuated ocean surface vessels using a class of feedforward approximators[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology,2006,16(4):750-756.
- [9] Zhang Lijun, Jia Heming, Qi Xue. NNFFC: adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed[J]. Ocean Engineering,2011,38(13):1430-1438.
- [10] Shim H, Jo N H, Son Y I. Disturbance observer for non-minimum phase linear systems[J]. International Journal of Control, Automation and Systems,2010,8(5):994-1002.
- [11] 贾松涛,朱煜,杨开明,等. 精密工作台扰动观测器的设计[J]. 微细加工技术,2007,25(4):39-42.
- [12] White M T, Tomizuka M, Smith C. Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics,2000,5(1):3-11.
- [13] Yang Yang, Du Jialu, Guo Chen, et al. Trajectory tracking control of nonlinear full actuated ship with disturbances[C]//Proc of International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press,2011:318-323.
- [14] 付明玉,刘佳,吴宝奇. 基于扰动观测器的动力定位船终端滑模航迹跟踪控制[J]. 中国造船,2015,56(4):33-45.
- [15] Pan Yongping, Yu Haoyong. Composite learning from adaptive dynamic surface control[J]. IEEE Trans on Automatic Control,2016,61(9):1.
- [16] 潘永平,黄道平,孙宗海. 欠驱动船舶航迹 Backstepping 自适应模糊控制[J]. 控制理论与应用,2011,28(7):907-914.
- [17] Pan Yongping, Zhou Yu, Sun Tairen, et al. Composite adaptive fuzzy H_∞ tracking control of uncertain nonlinear systems[J]. Neurocomputing,2013,99:15-24.
- [18] Xu Bin, Shi Zhongke, Yang Chenguang, et al. Composite neural dynamic surface control of a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form[J]. IEEE Trans on Cybernetics,2014,44(12):2626-2634.
- [19] Li Yongming, Tong Shaocheng, Li Tieshan. Composite adaptive fuzzy output-feedback control design for uncertain nonlinear strict-feedback systems with input saturation[J]. IEEE Trans on Cybernetics,2015,45(10):2299-2308.
- [20] Skjetne R, Smogeli, Fossen T I. Modeling, identification, and adaptive maneuvering of cyberShip II: a complete design with experiments[J]. IFAC Conference on Control Application Marine Systems,2004,37(10):203-208.

(上接第1420页)

- [13] Zeng Daojian, Liu Kang, Lai Siwei, et al. Relation classification via convolutional deep neural network[C]//Proc of the 25th International Conference on Computational Linguistics. 2014:2335-2344.
- [14] Hopfield J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1982,79(8):2554.
- [15] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory[J]. Neural Computation,1997,9(8):1735-1780.
- [16] Sundermeyer M, Schlüter R, Ney H. LSTM neural networks for language modeling[C]//Proc of the 13th Annual Conference on Inter-

Speech. 2012:601-608.

- [17] 任智慧,徐浩煜,封松林,等. 基于 LSTM 网络的序列标注中文分词法[J]. 计算机应用研究,2017,34(5):1321-1324,1341.
- [18] Miwa M, Bansal M. End-to-end relation extraction using LSTMs on sequences and tree structures[J/OL]. (2016-03-19). <https://arxiv.org/pdf/1601.00770v2.pdf>.
- [19] Luong M T, Pham H, Manning C D. Effective approaches to attention-based neural machine translation[J/OL]. (2015-09-22). <https://arxiv.org/abs/1508.04025>.
- [20] ACL SigLex, SemEval-2010 task 8[EB/OL]. https://drive.google.com/file/d/0B_jQiLugGTakMDQ5ZjZiMTUzMzQ1Yy00YWNmLWJlZDY-tOWY1ZDMwY2U4YjFk/view?layout=list&sort=name&num=50.