

文章编号:1671-1637(2014)03-0120-07

基于神经网络稳定自适应的欠驱动水面 船舶编队控制方法

刘 杨^{1,2}, 郭 晨¹, 刘正江¹, 范云生¹

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连交通大学 电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要:考虑具有不确定动态和外界环境干扰的欠驱动水面船舶编队控制问题,提出一种基于领导/跟随和目标跟踪机制的神经网络稳定自适应控制方法。基于目标跟踪误差设计了运动学跟踪控制器,推导出跟踪误差的动力学方程,并利用自适应神经网络估计动力学方程中的不确定项,构造了神经网络稳定自适应动力学跟踪控制器。应用 Lyapunov 稳定性理论和串接系统稳定性定理设计了船舶控制器,并计算了自适应律,在线调整神经网络权值,保证编队控制闭环系统跟踪误差一致最终有界。以3艘船舶组成的编队为例,对控制方法进行了仿真验证。在曲率半径为3倍船长的圆形跟踪路径上,转向角误差小于 15° ,队形跟踪误差的F-范数小于1 m;在直线跟踪路径上,转向角误差小于 1° ,队形跟踪误差F-范数小于0.1 m。

关键词:船舶控制;欠驱动水面船舶;神经网络自适应控制;编队控制;不确定非线性系统

中图分类号:U661.33

文献标志码:A

Control method of underactuated surface ship formation based on stable adaptive neural network control law

LIU Yang^{1,2}, GUO Chen¹, LIU Zheng-jiang¹, FAN Yun-sheng¹

(1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract: Considering the control problems of underactuated surface ship formation with uncertain dynamics and external environment disturbances, a stable adaptive neural network control method was proposed based on leader/follower method and target tracking mechanism. A kinematics formation tracking controller was presented based on target tracking error, the dynamics equations of tracking error were derived, adaptive neural network was used to estimate the uncertainties of dynamics equations, and a stable adaptive neural network dynamics tracking controller was constructed. The Lyapunov stability theory and the series-system stability theory were used to design ship control laws and calculate ship adaptive laws so as to online adjust the weights of neural network and ensure the formation tracking error of closed loop system uniformly ultimately bounded. The formation with three ships was as an example, and the control method was tested. On circular tracking path with the radius of curvature of three times of hull length, the steering angle error is less than 15° , and the F-norm of formation tracking

收稿日期:2014-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(61074053,61374114);交通运输部科技项目(2011 329 225 390);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132014321)

作者简介:刘 杨(1981-),女,吉林四平人,大连交通大学讲师,大连海事大学博士后,从事船舶智能控制研究。

error is less than 1 m. On straight tracking path, the steering angle error is less than 1° , and the F-norm of formation tracking error is less than 0.1 m. Obviously, the method is reliable. 4 tabs, 3 figs, 15 refs.

Key words: ship control; underactuated surface ship; neural network adaptive control; formation control; uncertain nonlinear system

Author resume: LIU Yang(1981-), female, lecturer, PhD, +86-411-84106709, muxiaoyi123@sina.com.

0 引言

近年来,随着计算机技术和无线通信技术在运动控制领域的快速发展,编队控制问题备受广大研究者的关注。多艘欠驱动水面船舶的编队控制虽然起步较晚,但在军事和民用领域都具有很大的应用潜力,如舰队协同作战、大洋航行补给、自动牵引作业、环境监测、石油和天然气探测等,因此,实现一个合理、有效的欠驱动船舶编队控制方法具有重要的理论与现实意义。编队控制结构主要有:行为控制^[1]、虚拟结构控制^[2-3]和领导/跟随控制^[4-7]。Balch等针对机器人的编队控制,提出行为控制方法,当系统中个体的动力学模型相对于系统编队控制的影响可以忽略时,可以把整个编队的动力学模型简化^[1],但这种方法很难定量分析,事实上基于行为的编队控制并不多见;袁健等采用一致性算法和虚拟结构方法设计了水下航行器的编队控制^[2];何真等采用虚拟结构的方法设计了多机器人的编队控制^[3],易于刻画整个编队的几何构型,并保持准确的编队,但是,由于虚拟结构方法需要集中处理数据,仅适用于小型编队系统;Sheikholeslam等基于领导/跟随控制方法,解决了高速车辆拥挤问题^[4];Takahashi等针对移动机器人的运动学模型设计了基于领导/跟随控制方法的编队控制,并考虑了输入速度受限的情况^[5];Consolini等通过设计领导船舶的速度和跟踪路径解决输入受限问题^[6],但并没有考虑移动机器人的动力学模型;吴孔逸等采用自适应模糊方法对动力学模型进行估计^[7]。

在单艘水面船舶的跟踪控制领域中,Do等分析了船体坐标系下横向速度项的无源有界性^[8];刘杨等在此基础上,在船舶模型中引入非线性水动力阻尼项和船体坐标系下横向速度项,采用串接系统稳定性分析方法,设计的控制器可使船舶在低速和高速航行,并可跟踪任意曲线航迹^[9-10]。在多艘船舶的编队控制领域,有协调路径跟踪和协调目标跟踪。协调路径跟踪是指需要跟踪一个参数化的预定路

径,协调目标跟踪指的是船舶需要追踪领导船舶附近的一个参考点或目标点,后者有更好的灵活性^[11]。相比协调路径跟踪,协调目标跟踪控制的研究相对较少,Cui等研究了水下航行器编队的目标点跟踪问题,并提出了一种仅依赖虚拟目标位置信息的鲁棒自适应跟踪控制器^[12];Peng等设计了鲁棒自适应领导/跟随编队控制方法,实现了对目标点的跟踪,并利用SHL神经网络对系统不确定动态进行逼近,但是要求螺旋桨主推进控制器输出有较大的变化频率^[13],实际上船舶的主推进器执行机构一般不可能提供大频率变化输出,特别地,当控制命令超出执行机构执行能力时有可能造成系统控制不稳定;丁磊等设计了一种基于领导/跟随和Back-stepping技术的船舶编队控制器^[14],但没有考虑模型参数不确定性和外界干扰的情况。

本文将领导/跟随控制结构和神经网络稳定自适应跟踪控制相结合,提出一种基于领导/跟随目标跟踪机制的多艘欠驱动水面船舶编队跟踪控制方法,并且考虑了船舶模型不确定性和外界环境干扰的情况。针对运动学模型特性,基于领导/跟随控制结构,选择跟随船舶与参考点的坐标差作为队形跟踪误差,建立运动学跟踪方程,设计了运动学队形跟踪非线性控制器。针对目标跟踪误差扩展出动力学跟踪方程,利用RBF神经网络逼近动力学方程中不确定项,补偿建模误差对系统稳定性的影响,并对外部扰动等不确定因素进行自适应补偿。船舶控制器和自适应律都是基于Lyapunov稳定性理论而设计,因此,可以在线调整神经网络权值,并且保证所有编队船舶的闭环系统跟踪误差一致最终有界。

1 船舶数学模型

船舶编队系统可由多艘三自由度欠驱动水面船舶组成,每艘欠驱动水面船舶系统都可由运动学模型和动力学模型描述。建立在大地球坐标系下的运动学模型具有精确性和非完整性,可描述为^[8,15]

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为地球南北方向船舶位移; y 为地球东西方向船舶位移; ψ 为大地坐标系和船体坐标系相对偏角, 一般称为船舶的航向角或转向角; u 、 v 、 r 分别为船体坐标系下的纵向速度、横向速度和转向角速度。

建立在船体坐标系下的动力学模型具有非线性、不确定性和链式结构, 可描述为^[8]

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}vr}{m_{11}} - \frac{d_{11}u}{m_{11}} - \frac{d_{12}|u|u}{m_{11}} - \frac{d_{13}u^3}{m_{11}} + \frac{\tau_u}{m_{11}} + b_u \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}ur}{m_{22}} - \frac{d_{21}v}{m_{22}} - \frac{d_{22}|v|v}{m_{22}} - \frac{d_{23}v^3}{m_{22}} + b_v \\ \dot{r} = \frac{(m_{11} - m_{22})uv}{m_{33}} - \frac{d_{31}r}{m_{33}} - \frac{d_{32}|r|r}{m_{33}} - \frac{d_{33}r^3}{m_{33}} + \frac{\tau_r}{m_{33}} + b_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_{11} 、 m_{22} 、 m_{33} 分别为 3 阶质量矩阵的 3 个对角参数, 一般认为 m_{11} 、 m_{22} 、 m_{33} 分别为船舶纵向、横向和转向角速度方向上的惯性质量参数; d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 分别为纵向速度方向上变量 u 、 $|u|u$ 、 u^3 的水动力阻尼参数; d_{21} 、 d_{22} 、 d_{23} 分别为横向速度方向上变量 v 、 $|v|v$ 、 v^3 的水动力阻尼参数; d_{31} 、 d_{32} 、 d_{33} 分别为转向角速度方向上变量 r 、 $|r|r$ 、 r^3 的水动力阻尼参数; τ_u 、 τ_r 分别为纵向和转向角速度方向上系统的控制输入; b_u 、 b_v 、 b_r 分别为纵向、横向和转向角速度方向上未建模不确定项。

惯性质量参数和水动力阻尼参数为船舶的建模参数, 是船舶速度和航行工况的函数, 是估计值, 本文假设这些参数未知。

由 2 艘船舶组成的领导/跟随基本队形参数向量为

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}_L(\mathbf{P}_R - \mathbf{P}_L) \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_L = \begin{bmatrix} \cos(\psi_L) & \sin(\psi_L) \\ -\sin(\psi_L) & \cos(\psi_L) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_L = (x_L, y_L)^T$$

$$\mathbf{P}_R = (x_R, y_R)^T$$

式中: \mathbf{B} 为期望的队形参数向量^[10]; ψ_L 为领导船舶的转向角; \mathbf{R}_L 为 ψ_L 的旋转矩阵; \mathbf{P}_L 为领导船舶的位置向量; x_L 、 y_L 为领导船舶在大地坐标系下的位

置坐标; \mathbf{P}_R 为参考点的位置向量; x_R 、 y_R 为参考点在大地坐标系下的位置坐标。

为了便于研究, 不失一般性做如下假设。

假设 1: 船舶可以通过 GPS 测量跟随船舶的姿态和速度信息, 并且跟随船舶可以通过通信设备获得目标参考点的位置和速度信息。

假设 2: 存在有界正常数 δ_0 和 δ_1 , 使得

$$\|\mathbf{B}\| \leq \delta_0$$

$$\|\mathbf{P}_L - \mathbf{P}_F\| \leq \delta_1$$

$$\mathbf{P}_F = (x_F, y_F)^T$$

式中: \mathbf{P}_F 为跟随船舶的位置向量; x_F 、 y_F 为跟随船舶在大地坐标系下的位置坐标; 本文向量范数均为 F-范数。

假设 3: 本文只考虑船舶向前航行时的编队控制, 即船舶前进速度 $u > 0$ 。

假设 4: 跟随船舶未建模不确定项是有界变量。

2 控制器设计与稳定性分析

在领导/跟随结构中, 领导船舶负责引导整个编队跟踪参考轨迹, 并根据期望队形信息给出目标参考点的位置信息, 跟随船舶跟踪参考点, 从而与领导船舶组成期望队形。单艘欠驱动水面船舶跟踪控制已经被广泛研究^[8-11], 故本文只研究跟随船舶的队形跟踪控制问题。

2.1 运动学控制器设计

为实现跟随船舶对参考点的跟踪, 定义队形跟踪误差为

$$(e_1, e_2)^T = \mathbf{R}_R(\mathbf{P}_F - \mathbf{P}_R) \quad (4)$$

$$\phi_R = \arctan(\dot{y}_R / \dot{x}_R)$$

$$\mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} \cos(\phi_R) & \sin(\phi_R) \\ -\sin(\phi_R) & \cos(\phi_R) \end{bmatrix}$$

式中: e_1 、 e_2 分别为队形跟踪误差 $x_F - x_R$ 和 $y_F - y_R$ 的转换误差; ϕ_R 为参考点转向角; \mathbf{R}_R 为 ϕ_R 的旋转矩阵。

基于领导/跟随目标跟踪机制的编队控制目标为在满足假设 1~4 的前提下使得 e_1 和 e_2 收敛到原点的邻域内。根据式(4)可以导出领导/跟随目标跟踪误差方程, 即运动学控制跟踪方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \dot{\phi}_R + U_F \cos(\phi_D) - \sqrt{\dot{x}_R^2 + \dot{y}_R^2} \\ \dot{e}_2 = -e_1 \dot{\phi}_R + U_F \sin(\phi_D) \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi_D = \phi_F - \phi_R + \arctan(v_F / u_F)$$

$$U_F = \sqrt{u_F^2 + v_F^2}$$

式中: ϕ_D 为跟随船舶的期望转向角; u_F 、 v_F 分别为跟随船舶在船体坐标系下纵向和横向速度; ϕ_F 为跟随船舶在大地坐标系下的转向角。

设计运动学控制律为

$$\begin{cases} U_c = (-k_1 e_1 + \sqrt{\dot{x}_R^2 + \dot{y}_R^2}) I[\cos(\phi_D)] \\ \phi_c = -\arctan(k_2 e_2) \end{cases} \quad (6)$$

其中: U_c 为控制速度; ϕ_c 为控制转向角; k_1 和 k_2 为正数, 分别为 U_c 和 ϕ_c 的设计参数; $I(\cdot)$ 为伪逆函数^[15], 其值有界。

以下定理保证了 Follower 运动学跟踪器的性能。

定理 1: 针对运动学跟踪误差系统式(5), 在假设 1~4 均满足的前提下, 若跟随船舶 ϕ_D 和 U_F 分别用式(6)中的 ϕ_c 和 U_c 定义, 则队形跟踪误差 $(e_1, e_2)^T$ 是全局指数渐进稳定的。

证明: 定义 Lyapunov 备选函数为 V_1 , 对其求时间导数, 并把式(6)代入式(5)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -k_1 e_1^2 - \frac{U_F e_2^2}{\sqrt{1+k_2 e_2^2}} \leq -k_1 e_1^2 - \\ &\quad \frac{U_0 e_2^2}{\sqrt{1+k_2 e_2^2}} \leq -\mu_1 V_1 \\ V_1 &= \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) \\ \mu_1 &= \min\{2k_1, 2U_0/\sqrt{1+k_2 e_2^2}\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: U_0 为有界正常数, 有 $U_F > U_0$ 。

根据式(7)有

$$V_1 \leq V_{1,0} e^{-\mu_1 t} \quad (8)$$

式中: $V_{1,0}$ 为时间 $t=0$ 时 V_1 的值。

根据式(8)可知 V_1 是全局指数渐进稳定的, 证毕。

2.2 动力学控制器设计

定义 Δ_u 和 Δ_ψ 分别为跟随船舶动力学速度和转向角跟踪误差, 由此可以推导出动力学跟踪误差方程为

$$\begin{cases} \dot{\Delta}_u = f_1 + g_1 \tau_u - \dot{u}_c + b_1 \\ \dot{s} = f_2 + g_2 \tau_r - \ddot{\phi}_R + \ddot{\beta} - \ddot{\phi}_c + k_3 \dot{\Delta}_\psi + b_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta_u = u_F - u_c$$

$$\Delta_\psi = \phi_D - \phi_c$$

$$s = k_3 \Delta_\psi + \dot{\Delta}_\psi$$

$$u_c = U_c \cos(\phi_D)$$

$$\beta = \arctan(v_F/u_F)$$

$$f_1 = \frac{m_{22} v_F r_F - d_{11} u_F - d_{12} |u_F| u_F - d_{13} u_F^3}{m_{11}}$$

$$f_2 = \frac{(m_{11} - m_{22}) u_F v_F}{m_{33}} - \frac{d_{31} r_F}{m_{33}} - \frac{d_{32} |r_F| r_F}{m_{11}} -$$

$$\frac{d_{33} r_F^3}{m_{11}}$$

$$g_2 = \frac{1}{m_{33}}$$

$$g_1 = \frac{1}{m_{11}}$$

式中: f_1 、 g_1 、 b_1 分别为跟随船舶在体坐标系下 u 方向上的模型不确定动态、控制增益和未建模不确定项; f_2 、 g_2 、 b_2 分别为跟随船舶在船体坐标系下 r 方向上的模型不确定动态、控制增益和未建模不确定项; s 为变量 Δ_ψ 滤波误差, 即 s 与 Δ_ψ 有相同的收敛特性^[15]; u_c 、 β 分别为跟随船舶待跟踪的参考速度和偏向角; k_3 为正数, 是 s 的设计参数; r_F 为跟随船舶的转向角速度。

f_1 、 g_1 、 f_2 和 g_2 为船舶速度和航行工况的光滑函数, 可采用文献[9]中的 RBF 神经网络对其进行估计; b_1 与 b_2 为未建模不确定项, 可以采用自适应理论对其进行逼近。选取动力学控制律和自适应律分别为

$$\begin{aligned} \tau_u &= \frac{1}{w_3^T \phi_3} (-w_1^T \phi_1 + \dot{u}_c - k_5 \Delta_u - \\ &\quad 0.25 b_3 \Delta_u / \delta) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tau_r &= \frac{1}{w_4^T \phi_4} (-w_2^T \phi_2 + \ddot{\phi}_R - \ddot{\beta} + \ddot{\phi}_c - \\ &\quad k_3 \dot{\Delta}_\psi - k_4 s - 0.25 b_4 s / \delta) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{w}_1 = h_1 [\phi_1 \Delta_u - \sigma_1 (w_1 - w_{1,0})] \quad (12)$$

$$\dot{w}_2 = h_2 [\phi_2 s - \sigma_2 (w_2 - w_{2,0})] \quad (13)$$

$$\dot{w}_3 = h_3 [\phi_3 \Delta_u \tau_u - \sigma_3 (w_3 - w_{3,0})] \quad (14)$$

$$\dot{w}_4 = h_4 [\phi_4 s \tau_r - \sigma_4 (w_4 - w_{4,0})] \quad (15)$$

$$\dot{b}_3 = h_5 [0.25 \Delta_u^2 / \delta - \sigma_5 (b_3 - b_{3,0})] \quad (16)$$

$$\dot{b}_4 = h_6 [0.25 s^2 / \delta - \sigma_6 (b_4 - b_{4,0})] \quad (17)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 分别为 f_1 、 f_2 、 g_1 和 g_2 的神经网络权值向量的估计值; ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 和 ϕ_4 分别为 f_1 、 f_2 、 g_1 和 g_2 的神经网络函数^[9]; b_3 和 b_4 分别为 b_1 和 b_2 最大估计值; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 b_3 和 b_4 的设计参数; $w_{1,0}$ 、 $w_{2,0}$ 、 $w_{3,0}$ 、 $w_{4,0}$ 、 $b_{3,0}$ 和 $b_{4,0}$ 分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 b_3 和 b_4 的初始值; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 σ_5 、 σ_6 、 k_4 、 k_5 分别为 $w_1 - w_{1,0}$ 、 $w_2 - w_{2,0}$ 、 $w_3 - w_{3,0}$ 、 $w_4 - w_{4,0}$ 、 $b_3 - b_{3,0}$ 、 $b_4 - b_{4,0}$ 、 τ_r 和 τ_u 的设计参数; δ 为 Δ_u 和 s 的设计参数; 设计参数都为正数。

以下定理保证了跟随船舶动力学跟踪器的性能。

定理 2: 针对动力学跟踪误差系统式(9), 在假设 1~4 均满足的前提下, 若跟随船舶采用神经网络稳定自适应控制律式(10)、(11)和估计函数自适应

率式(12)~(17),则跟踪误差 $\Delta_u, \Delta_\psi, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ 和 Δ_6 一致最终有界。

证明:选取 Lyapunov 函数 V_2 为

$$V_2 = \frac{1}{2} \left(\Delta_u^2 + s^2 + \frac{\Delta_1^T \Delta_1}{h_1} + \frac{\Delta_2^T \Delta_2}{h_2} + \frac{\Delta_3^T \Delta_3}{h_3} + \frac{\Delta_4^T \Delta_4}{h_4} + \frac{\Delta_5^2}{h_5} + \frac{\Delta_6^2}{h_6} \right) \quad (18)$$

$$(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4) = (w_1, w_2, w_3, w_4) - (w_{1,1}, w_{2,1}, w_{3,1}, w_{4,1})$$

$$(\Delta_5, \Delta_6) = (b_3, b_4) - (b_{3,1}, b_{4,1})$$

式中: $w_{1,1}, w_{2,1}, w_{3,1}$ 和 $w_{4,1}$ 分别为 f_1, f_2, g_1 和 g_2 的神经网络权值向量; $b_{3,1}$ 和 $b_{4,1}$ 分别 b_1 和 b_2 的最大值; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ 和 Δ_6 分别为 w_1, w_2, w_3, w_4, b_3 和 b_4 的估计误差。

对 V_2 求时间导数,并把式(10)~(17)代入式(18)得

$$\dot{V}_2 = -\Delta_u b_{3,1} (0.25\Delta_u/\delta - 1) - s b_{4,1} (0.25s/\delta - 1) + \epsilon \leq k_5 \Delta_u^2 - k_4 s^2 - \sum_{i=1}^4 \sigma_i \Delta_i^T (w_i - w_{i,0}) - \sigma_5 \Delta_5 (b_3 - b_{3,0}) - \sigma_6 \Delta_6 (b_4 - b_{4,0}) + (b_{3,1} + b_{4,1}) \delta + \epsilon \leq -k_5 \Delta_u^2 - k_4 s^2 - \sum_{i=1}^4 \sigma_i \| \Delta_i \|^2 - \sigma_5 \Delta_5^2 - \sigma_6 \Delta_6^2 + |\epsilon| + (b_{3,1} + b_{4,1}) \delta + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sigma_i (\| \Delta_i \|^2 + \| w_i - w_{i,0} \|^2) + \frac{1}{2} \sigma_5 [\Delta_5^2 + (b_3 - b_{3,0})^2] + \frac{1}{2} \sigma_6 [\Delta_6^2 + (b_4 - b_{4,0})^2] \leq -\mu_2 V_2 + \rho \quad (19)$$

$$\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2 \tau_u) \Delta_u + (\epsilon_3 + \epsilon_4 \tau_r) s$$

$$\mu_2 = \min \{ 2k_5, 2k_4, \sigma_1 h_1, \sigma_2 h_2, \sigma_3 h_3, \sigma_4 h_4, \sigma_5 h_5, \sigma_6 h_6 \}$$

$$\rho = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sigma_i (\| \Delta_i \|^2 + \| w_i - w_{i,0} \|^2) + \frac{1}{2} \sigma_5 [\Delta_5^2 + (b_3 - b_{3,0})^2] + \frac{1}{2} \sigma_6 [\Delta_6^2 + (b_4 - b_{4,0})^2] + |\epsilon| + (b_{3,1} + b_{4,1}) \delta$$

式中: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 和 ϵ_4 分别为 f_1, f_2, g_1 和 g_2 的神经网络建模误差。

根据式(19)有

$$V_2 \leq \rho / \mu_2 + (V_{2,0} - \rho / \mu_2) e^{-\mu_2 t} \quad (20)$$

式中: $V_{2,0}$ 为时间 $t=0$ 时 V_2 的值。

由式(20)可知 V_2 是一致最终有界的,证毕。

根据以上分析,可以提出以下定理来保证跟随船舶运动学和动力学闭环目标跟踪器的性能。

定理 3:考虑由式(1)描述的欠驱动水面船舶组成的领导/跟随编队队形跟踪误差系统式(5),在假

设 1~4 均满足的前提下,若跟随船舶采用神经网络稳定自适应控制律式(10)、(11)和估计函数自适应率式(12)~(17),则队形跟踪误差 $(e_1, e_2)^T$ 一致最终有界。

证明:定义误差向量为

$$E_1 = (e_1, e_2)^T$$

$$E_2 = (\Delta_\psi, \dot{\Delta}_\psi, \Delta_u, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6)^T$$

对 E_1 和 E_2 求时间导数可得

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \eta_1(E_1, E_2) \\ \dot{E}_2 = \eta_2(E_2) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\eta_1(E_1, E_2)$ 为关于 E_1 和 E_2 的光滑函数; $\eta_2(E_2)$ 为关于 E_2 的光滑函数; \dot{E}_1, \dot{E}_2 为 2 个串接子系统。

根据定理 1 可知, $\dot{E}_1 = \eta_1(E_1, 0)$ 中各状态是全局指数渐进稳定的;根据定理 2 可知 $\dot{E}_2 = \eta_2(E_2)$ 中各状态一致最终有界;根据串接子系统的稳定性定理^[15]可知,运动学和动力学闭环跟踪系统 $(\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_2)$ 各状态一致最终有界,证毕。

3 仿真结果分析

考虑 3 艘相同的欠驱动水面船舶组成的编队,由 1 艘领导船舶和 2 艘跟随船舶组成三角编队,仿真中采用的某型船舶模型参数见表 1~3。

表 1 船舶模型参数

Tab. 1 Ship model parameters

m_{11}, m_{22}, m_{33}	$1.20 \times 10^5, 1.78 \times 10^5, 6.36 \times 10^7$
d_{11}, d_{12}, d_{13}	$2.15 \times 10^4, 2.15 \times 10^3, 4.32 \times 10^3$
d_{21}, d_{22}, d_{23}	$1.47 \times 10^5, 1.47 \times 10^4, 2.94 \times 10^4$
d_{31}, d_{32}, d_{33}	$8.02 \times 10^6, 8.02 \times 10^5, 1.60 \times 10^6$

表 2 船舶的初始状态与队形参数

Tab. 2 Initial states and formation parameters of ships

初始状态 (x, y, ψ, u, v, r) ^T	领导船舶	(0, 0, 0, 4, 0, 0) ^T
	跟随船舶 1	(-40, -30, 0, 4, 0, 0) ^T
	跟随船舶 2	(-60, 60, 0, 4, 0, 0) ^T
队形参数 B	领导船舶	(0, 0) ^T
	跟随船舶 1	(-40, -40) ^T
	跟随船舶 2	(-40, 40) ^T

图 1 为编队船舶航行轨迹,期望队形为等腰三角形,其中领导船舶为顶角位置,2 艘跟随船舶为底角位置。可以看出编队船舶初始位置并不是期望队形,利用本文设计控制器能实现队形控制的目标,实现了编队对曲线和直线的跟踪控制。

表 3 控制参数
Tab. 3 Control parameters

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5	0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.2
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$	0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1
$h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$	0.1, 1.0 $\times 10^7$, 0.1, 1.0 $\times 10^9$, 0.2, 0.2
$w_{1,0}, w_{2,0}, w_{3,0}, w_{4,0}, b_{3,0}, b_{4,0}$	5.5 $\mathbf{0}$, 1.5 $\mathbf{0}$, 5.5 $\mathbf{0}$, 1.5 $\mathbf{0}$, 0.5, 0.5
δ, \mathbf{O}	0.9, (1, 1, 1, 1, 1)

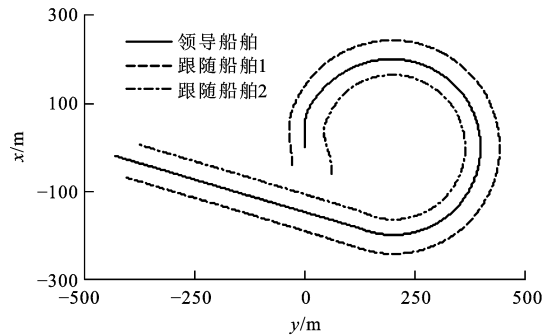


图 1 船舶编队航行轨迹

Fig. 1 Trajectory of ship formation

图 2 为船舶跟踪误差曲线,图 2(a)队形跟踪误差的 F-范数为 $\sqrt{e_1^2 + e_2^2}$ 。可以看出所有跟踪误差是渐进稳定收敛到零点附近,且是一致最终有界的。从图 1 可以看出,当 $t \in (0, 250)$ s 时,跟踪路径为曲率半径约为 3 倍船长的圆形路径;当 $t \in (250, 400)$ s 时,跟踪路径为直线路径。从图 2 中可以看出,当 $t \in (100, 250)$ s 时曲线跟踪稳定;当 $t \geq 340$ s 时直线跟踪稳定。

表 4 为不同时刻船舶队形跟踪误差的定量表

表 4 船舶跟踪误差

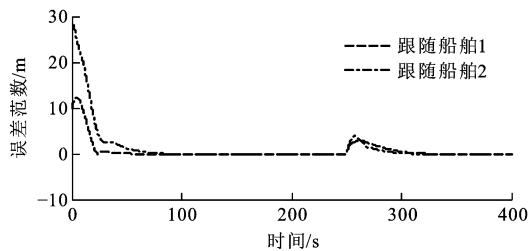
Tab. 4 Tracking errors of ships

跟踪误差		时间/s					
		0	50	100	250	300	400
队形跟踪误差 F-范数/m	跟随船舶 1	10.00	0.30	0.09	0.07	0.74	0.01
	跟随船舶 2	28.30	1.49	0.10	0.04	0.39	0.01
转向角误差/($^{\circ}$)	跟随船舶 1	0.00	-9.13	-9.26	-9.28	-0.33	-0.81
	跟随船舶 2	0.00	-15.30	-14.20	-14.10	0.68	-0.80

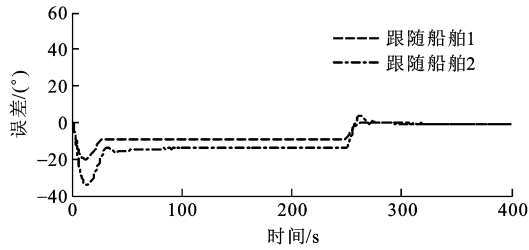
为了比较算法的有效性,为考虑控制律对不确定参数 f_1 和 f_2 的自适应估计,定义了比较控制器,比较控制律为

$$\tau_u = \frac{1}{w_3^T \phi_3} (\dot{u}_c - k_5 \Delta_u - 0.25 b_3 \Delta_u / \delta) \quad (22)$$

$$\tau_r = \frac{1}{w_4^T \phi_4} (\ddot{\psi}_R - \ddot{\beta} + \ddot{\psi}_c - k_3 \dot{\Delta}_\psi - k_4 s - 0.25 b_4 s / \delta) \quad (23)$$



(a) 队形误差



(b) 转向角误差

图 2 船舶跟踪误差曲线

Fig. 2 Tracking error curves of ships

示,当跟踪稳定时,转向角误差小于 15° ,队形跟踪误差的 F-范数小于 1 m;跟踪直线路径的转向角误差小于 1° ,直线航行队形跟踪误差的 F-范数小于 0.1 m。从表 1 和图 2 中可以看出当 $t \in (100, 250)$ s 时,船舶的转向角误差比较大,这是因为此时船舶的横向速度不为 0。为了使船舶航行稳定,本文设计参考转向角时考虑了由横向速度引起的偏向角 β ,是船舶的航行方向(船舶的合速度方向)与船舶转向角的角度差,当船舶转向或者外界干扰造成横向速度较大时,船舶的航行方向去跟踪参考转向角 ψ_D ,可避免了转向角的抖动^[15]。

图 3 为比较控制律控制下各跟踪误差状态变量的历时曲线。曲线跟踪时,队形跟踪误差不稳定,跟踪误差较大,但有收敛的趋势,转向角跟踪误差基本稳定;直线跟踪时,各跟踪误差都收敛到零域附近,但队形跟踪误差收敛速度较慢。比较可知各个跟踪误差变量收敛特性较差,但是由于本文的控制器设计基于 Lyapunov 稳定性理论,因此,具有鲁棒性,当某个神经网络估计器失效时,仍然可以使控制船

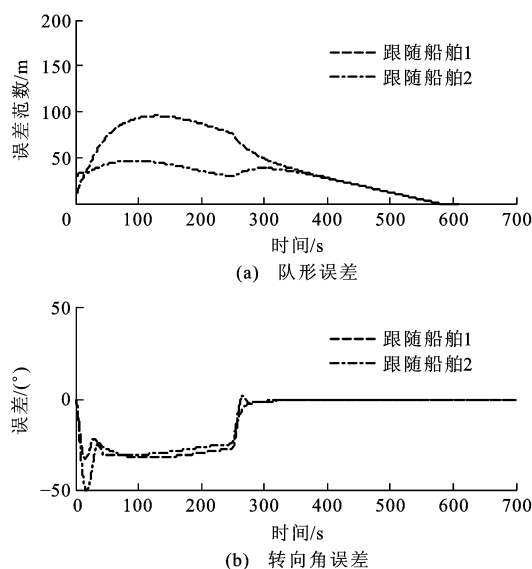


图3 基于比较控制器的船舶跟踪误差曲线

Fig. 3 Tracking error curves of ships based on comparing controller

船舶跟踪误差渐进收敛。

4 结 语

针对具有三自由度欠驱动水面船舶编队控制问题,提出一种基于领导/跟随目标跟踪机制的神经网络稳定自适应控制方法。应用 Lyapunov 稳定性理论对采用本文设计控制器的闭环误差系统进行了稳定性分析,得出以下结论:定理 1 保证了运动学模型的队形跟踪误差全局指数渐进稳定;定理 2 保证了动力学模型的转向角和速度跟踪误差一致最终有界;定理 3 保证了由运动学模型和动力学模型组成的船舶编队队形跟踪误差一致最终有界。仿真验证结果表明:当存在模型参数不确定和外界干扰时,基于领导/跟随目标跟踪机制的神经网络稳定自适应控制方法可以使跟踪误差收敛到原点附近的小邻域内,可以使船舶编队按照期望队形航行。船舶执行器时延和船舶间通信网络故障造成的自时延和通信时延,以及多船舶编队的运动规划将是下一步研究方向。

参 考 文 献 :

References :

[1] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.

[2] 袁 健,唐功友.采用一致性算法与虚拟结构的多自主水下航行器编队控制[J].智能系统学报,2011,6(3):248-253.

YUAN Jian, TANG Gong-you. Formation control of autonomous underwater vehicles with consensus algorithms and virtual structure[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems,

2011, 6(3): 248-253. (in Chinese)

[3] 何 真,陆宇平,刘燕斌.基于虚拟结构的分布式编队控制方法[J].应用科学学报,2007,25(4):387-391.

HE Zhen, LU Yu-ping, LIU Yan-bin. Distributed control of formation maneuvers based on virtual structures[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(4): 387-391. (in Chinese)

[4] SHEIKHOLESLAM S, DESOER C A. Control of interconnected nonlinear dynamical systems: the platoon problem[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(6): 806-810.

[5] TAKAHASHI H, NISHI H, OHNISHI K. Autonomous decentralized control for formation of multiple mobile robots considering ability of robot[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1272-1279.

[6] CONSOLINI L, MORBIDI F, PRATTICIZZO D. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints[J]. Automatica, 2008, 44(5): 1343-1349.

[7] 吴孔逸,霍 伟.不确定移动机器人编队间接自适应模糊动力学控制[J].控制与决策,2010,25(12):1769-1774,1781.

WU Kong-yi, HUO Wei. Indirect adaptive fuzzy dynamical formation control of uncertain mobile robots[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1769-1774, 1781. (in Chinese)

[8] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Robust adaptive path following of underactuated ships[J]. Automatica, 2004, 40(6): 929-944.

[9] 刘 杨,郭 晨,沈智鹏,等.欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制[J].控制理论与应用,2010,27(2):169-174.

LIU Yang, GUO Chen, SHEN Zhi-peng, et al. Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships [J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(2): 169-174. (in Chinese)

[10] LIU Yang, GUO Chen. Trajectory tracking control for underactuated surface vessels using neural network [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(S1): 32-35.

[11] BREIVIK M. Topics in guided motion control of marine vehicles[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.

[12] CUI R X, GE S S, HOW B V E, et al. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(17/18): 1491-1502.

[13] PENG Z, WANG D, HU X. Robust adaptive formation control of underactuated autonomous surface vehicles with uncertain dynamics[J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(12): 1378-1387.

[14] 丁 磊,郭 戈.一种编队控制的 Backstepping 方法[J].控制与决策,2012,27(2):299-303.

DING Lei, GUO Ge. Formation control for ship fleet based on backstepping[J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 299-303. (in Chinese)

[15] 刘 杨.欠驱动水面船舶的非线性自适应控制研究[D].大连:大连海事大学,2010.

LIU Yang. The nonlinear adaptive control for underactuated surface vessels [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)