

文章编号: 1002-0446(2004)06-0515-04

基于观测器的水下机器人神经网络自适应控制*

高建树^{1,2}, 邢志伟^{1,2}, 张宏波¹

(1. 中国民用航空学院, 天津 300300; 2. 中国民航特种设备研究基地, 天津 300300)

摘要: 给出了基于观测器的水下机器人神经网络自适应控制算法. 控制算法由 3 部分组成: 输出反馈控制、神经网络以及滑模项, 其中输出反馈控制为了保证系统的初始稳定性; 神经网络用于逼近系统的非线性动力学; 滑模项用于补偿和抑制系统的外部扰动、神经网络逼近误差等. 控制算法中所需要的速度量由状态观测器来提供. 基于 Lyapunov 稳定理论给出了系统闭环稳定条件和稳定域. 水池试验结果验证了算法的有效性.

关键词: 水下机器人; 神经网络; 控制; 观测器

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Observer-based Neural Network Adaptive Control of Underwater Vehicles

GAO Jiān shù^{1,2}, XING Zhī wēi^{1,2}, ZHANG Hōng bō¹

(1. Civil Aviation University of China, Tianjing 300300, China; 2. Special Equipment Research Base, CAAC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Observer based neural network adaptive control (OBNC) algorithm for underwater vehicles is provided in this paper. The algorithm is composed of three parts: output feedback control, neural network and sliding mode item. Among them, the output feedback control is used to guarantee the stability of the system in initial phase, the neural network is used to approach the nonlinear dynamics of underwater vehicles, and the sliding mode item is used to compensate and bate the internal and external disturbances. The stable conditions and attraction region of the proposed observer based NN control algorithm is provided with Lyapunov based approach. The effectiveness of this control scheme is demonstrated with pool experiment.

Keywords: underwater vehicles; neural network; control; observer

1 引言(Introduction)

水下机器人是复杂的非线性系统, 它具有的本质未建模动力学以及非结构的不确定性, 给控制带来很多挑战, 至今仍然没有一个很好的解决办法. 目前已经提出的各种水下机器人自适应控制算法^[1-5]在一定程度上克服了由于模型非结构不确定性所带来的相关控制问题. 但是, 上述所有的自适应控制算法实现的前提是需要知道水下机器人系统的所有状态信息, 即各个回路的位置及速度信息. 对水下机器人来说, 前向、侧移及深度方向的速度则很难直接测量, 这也给上述自适应算法的实现带来困难. 一个可行的非差分办法是根据系统中可以直接测量的状态变量, 如位置、姿态和角速度等, 根据状态观测器理论重构所需的速度信号, 使得重构的速度信号在一定的准则下等价于系统的真实速度信号. 目前很多

研究人员针对不同的研究对象提出多种基于观测器的稳定控制策略^[6-10]. 文[6]提出了基于无源性 (passivity) 理论和观测器 (observer) 的机器人控制算法, 根据不同的控制器和观测器结构给出了稳定条件和稳定域. 在此基础上, 孙富春^[7]等又提出了基于观测器的机械手神经网络自适应控制策略, 同样给出了各种条件下的稳定条件和稳定域. 文[8, 9]在船舶动力定位控制系统设计中, 提出了基于无源性理论的非线性观测器算法, 该算法可以保证观测器的渐进指数稳定, 并在此基础上提出了基于观测器和逐步后退算法的输出反馈控制器. 文[10]在文[8, 9]研究的基础上, 在观测器设计中增加滑模项, 提高了系统的鲁棒性. 本文在上述研究成果的基础上, 给出了基于观测器的水下机器人神经网络自适应控制算法 (observer based neural network adaptive control, OB-

* 基金项目: 中国科学院创新基金资助项目 (A010603).

NC), 并通过理论分析给出了算法的稳定条件和稳定域. 水池实验验证了算法的有效性.

2 水下机器人动力学 (Underwater vehicle's dynamics)

载体坐标系下, 包含未知扰动的水下机器人动力学及运动学模型可以描述为:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) + \tau_d = \tau$$

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

其中, $\eta = [X, Y, Z, \Psi]^T$, $v = [u, v, w, r]^T$ 为水下机器人在大地坐标系下的位置及姿态以及载体坐标系下的线速度和角速度矢量, $M = M_{RB} + M_A > 0$ 是系统的惯性矩阵, M_{RB} 是系统的静惯性阵, 其值为常量, M_A 是系统的水动力质量, $C(v)$ 为系统的向心力和哥氏力矩阵, $D(v)$ 是系统的阻尼矩阵, $g(\eta)$ 为系统的重力及重力矩矢量, τ 为控制输入矢量, τ_d 为未知干扰矢量. 根据式(1), 在静坐标系下水下机器人动力学方程为:

$$M_{\eta}(\eta)\dot{\eta} + C_{\eta}(\eta, v)\eta + D_{\eta}(\eta, v)\eta + g_{\eta}(\eta) + \tau_{d\eta} = \tau_{\eta} \quad (2)$$

对于式(1)、(2)有如下特性:

$$J^{-1}(\eta) = J^T(\eta)$$

$$\|J(\eta)\| = \|J^{-1}(\eta)\| = 1$$

$$J(\eta) = J(\eta)S(r) \quad (3)$$

其中, $S(r)$ 为斜对称算子:

$$C(v) = -C^T(v), M = M^T > 0, \dot{M} = 0 \quad (4)$$

$$C(x)y = -C(y)x, \forall x, y \in R^4 \quad (5)$$

$$M_{\eta} = M_{\eta}^T(\eta) > 0, \dot{M}_{\eta}(\eta) \neq 0 \quad (6)$$

$$x^T(\dot{M}_{\eta}(\eta) - 2C_{\eta}(\eta, v))x = 0, \forall x \in R^4 \quad (7)$$

同时, 对于式(1)、(2)作如下假设:

$$M_m < \|M\| < M_M, M_m, M_M > 0 \quad (8)$$

$$\|C(v)\| \leq C_M \|v\|, C_M > 0 \quad (9)$$

$$0 < \|\tau\| < \tau_M, 0 < \|r\| \leq r_M, \tau_M, r_M > 0 \quad (10)$$

$$D_{\eta}(\eta, v)\dot{\eta} = D_v\dot{\eta} + D_s\eta, \text{ 且}$$

$$0 < D_m < D_v < D_M, D_s(\eta) > 0 \quad (11)$$

3 控制器观测器结构与系统误差动力学 (Controller and observer & error dynamics)

$$\begin{cases} K_{dm} > \Lambda_{1M}M_M - D_m + \frac{11}{2}C_MV_M + \frac{5}{2}M_Mr_M + \frac{3}{2}D_M + 2C_M\|x(0)\| \sqrt{\frac{P_M}{P_m}} \\ l_d > 2M_m^{-1}K_{dM} \end{cases} \quad (23)$$

在下述收敛域:

of system)

水下机器人系统的期望轨迹定义为 $[\eta_d, \dot{\eta}_d, \ddot{\eta}_d]^T$, 并且:

$$\|\eta_d\| \leq V_M, \|\dot{\eta}_d\| \leq A_M \quad (12)$$

令:

$$e = \eta - \eta_d, \dot{\eta} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d \quad (13)$$

其中, $e, \dot{\eta}$ 分别为水下机器人系统的输出误差和观测器的观测误差; $\dot{\eta}_d$ 为观测器输出, η 为系统的真实输出; η_d 为水下机器人系统的期望输出. 误差矢量为:

$$S_1 = \eta - \eta_r, S_2 = \eta - \eta_o, S = S_1 + S_2 \quad (14)$$

其中:

$$\eta_r = \eta_d - \Lambda_1 e, \eta_o = \dot{\eta} - \Lambda_2 \dot{\eta} \quad (15)$$

其中 $0 < \Lambda_{1m} \leq \Lambda_1 = \Lambda_1^T \leq \Lambda_M, 0 < \Lambda_{2m} \leq \Lambda_2 = \Lambda_2^T \leq \Lambda_{2M}$.

(15) 式中的 η_r, η_o 满足如下关系:

$$\dot{\eta}_r = J(\eta)v_r \quad (16)$$

$$\dot{\eta}_o = J(\eta)v_o \quad (17)$$

其中, v_r, v_o 为相应载体坐标系下的速度.

对于式(2), 设控制量 τ_{η} 定义为:

$$\tau_{\eta} = M_{\eta}\dot{\eta}_d + C_{\eta}(\eta, v_o)\dot{\eta}_d + D_v\dot{\eta}_d + D_s(\eta) + g_{\eta}(\eta) - K_d(S_1 - S_2) \quad (18)$$

其中:

$$v_o = J^{-1}(\eta)\eta_o, K_{dm} \leq K_d \leq K_{dM} \quad (19)$$

系统的速度观测器定义为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}} = J(\eta)\hat{v} + K_1\dot{\eta} \\ \dot{\hat{v}} = \hat{v}_d + S(r)(v_d - \hat{v}) + K_2\dot{\eta} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $K_1 = K_1^T \geq 0, K_2 = K_2^T \geq 0$, 令:

$$K_1 = l_d I + \Lambda_2 \quad (21)$$

$$K_2 = J^{-1}(\eta)l_d\Lambda_2 \quad (22)$$

其中, $l_d > 0$. 对于控制器(18)和观测器(20), 有如下定理:

定理 1 对于式(1)、(2)定义的水下机器人系统, 考虑采用式(18)所示的控制器和式(20)所示的观测器, 当控制器和观测器的参数满足:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} x \in R^{4 \times 3} \mid \|x\| < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_m}{P_M}} \\ \frac{K_{dm} + D_m - \Lambda_{1M}M_M - \frac{5}{2}M_{M^T}M_M - \frac{3}{2}D_M}{C_M} - \frac{11}{2}V_M \end{array} \right\} \quad (24)$$

内, 该系统是闭环局部指数稳定的.

(证明过程略)

4 基于观测器的水下机器人神经网络自适应控制 (Observer based neural network adaptive control of underwater vehicles)

一般情况下, 对于式(18)中, 水下机器人的动力学模型很难预知, 这也给控制器的实现带来一定困难, 由于式(18)给出的动力学模型是具有有界输入的连续函数, 所以可以考虑采用下述的三层神经网络逼近该函数, 具有 p 个输入、 m 个输出和 l 个隐藏节点的多层神经网络定义为:

$$\begin{aligned} u_c(W, z) &= W^T \sigma(V^T z) \\ W &\in R^{p \times l}, V \in R^{l \times m}, z \in R^m \\ \sigma(V^T z) &\in R^l \\ \sigma(x) &= [\sigma_1(x), \sigma_2(x), \dots, \sigma_l(x)]^T \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $u_c(W, z)$ 为神经网络输出; $\sigma(x)$ 为隐藏层的输出; $\sigma(\cdot)$ 为光滑非线性函数(S 函数, 双曲正切, RBF 等函数). 式(35)所定义的神经网络满足 Stone-Weierstrass 定理^[11]条件, 因此可以在一个紧集上逼近任何一个连续函数. 即:

$$\begin{aligned} M\dot{v}_d + C(v_o)v_d + D_s v_d + D_s(\eta) \\ + g(\eta) = W^T \sigma(V^T z) + \varepsilon(z) \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $z = [\dot{v}_d, v_d, v_o, \eta, 1]^T$ 为神经网络输入; $0 < \|\varepsilon(z)\| < \varepsilon_M$, ε_M 为给定常数, 参考文[7], 定义:

$$\dot{S}_1 = \dot{\eta} - \dot{\eta}_r, \dot{S}_2 = \dot{\eta} - \dot{\eta}_o, S = \dot{S}_1 + \dot{S}_2$$

选择神经网络控制器为:

$$\tau = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T z) - J^T [K_d(S_1 - S_2)] - \varepsilon_M \operatorname{sgn}(J^T \dot{S}) \quad (27)$$

自适应算法选择为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}} &= -\Gamma_V (\sigma^T \hat{V}^T \sigma - \sigma B (J^{-1} S))^T - \Gamma_V k_V \hat{V} \\ \dot{\hat{W}} &= -\Gamma_W (\sigma (J^{-1} S))^T + k_W \hat{W} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\sigma = \sigma(\hat{V}^T z)$, Γ_W, Γ_V 为学习速率, $\|B\| \leq k_m$, 其余为设计参数. 对于以上神经网络控制器以及式(20)所示的状态观测器, 有如下定理.

定理 2 对于式(37)所示的神经网络控制器, 其参数自适应律满足式(28), 其速度估计由式(20)

所示的观测器确定, 当控制器和观测器参数满足式(23)时, 则在式(24)所定义的邻域内, 式(27)所示闭环系统是一致有界稳定的.

(证明过程略)

5 实验结果 (Experiment result)

本实验用“CR-02”6000m 自治水下机器人对上述控制算法进行验证. 控制的目标是使该水下机器人的航向角跟踪给定的轨迹. 目标轨迹定义为: 当前角度(约 317°) $\rightarrow 340^\circ \rightarrow 290^\circ \rightarrow 340^\circ$. OBNC 控制器参数取为:

$$\begin{aligned} K_d &= 500, \Lambda_1 = \Lambda_2 = 0.5, l_d = 100 \\ \Gamma_W &= \operatorname{diag}\{10, \dots, 10\}, \Gamma_V = \operatorname{diag}\{2, \dots, 2\} \\ k_W &= 0.02, k_V = 0.05 \end{aligned} \quad (29)$$

选一组典型的 PID 参数, 取 $K_p = 250, K_i = 2, K_d = 140$, 航向跟踪效果如图 1 所示. 采用 OBNC 控制, 航向角跟踪效果如图 2 所示, 取 $K_d = 500, \Lambda_1 = \Lambda_2 = 0.5, l_d = 100$. 观测器的速度估计效果如图 3 所示, 取 $K_d = 500, \Lambda_1 = \Lambda_2 = 0.5, l_d = 100$. 可见, 采用 OBNC 控制较 PID 控制在调整时间、超调量以及稳态精度方面都具有很大的优越性.

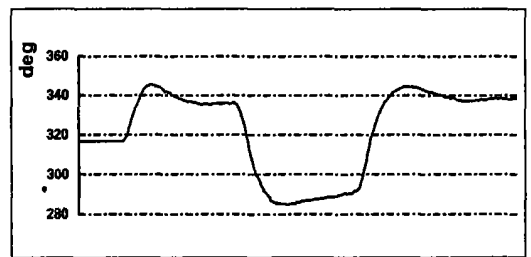


图 1 PID 控制水下机器人的航向跟踪效果

Fig. 1 Heading tracking performance with PID control

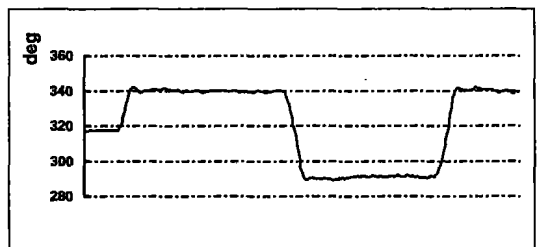


图 2 OBNC 控制水下机器人航向跟踪效果

Fig. 2 Heading tracking performance with OBNC control

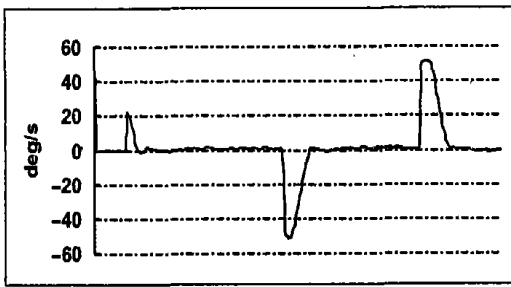


图 3 观测器输出

Fig. 3 Output of observer

6 结论 (Conclusion)

本文给出了基于观测器水下机器人神经网络自适应控制(OBNC)策略. 该算法无需系统的动力学模型, 只需要测量系统的位置信息. 控制算法由三部分组成: 输出反馈控制、神经网络以及滑模项, 其中, 输出反馈控制保证系统的渐进稳定性, 神经网络用来逼近系统的非线性特性, 而滑模项用于补偿和抑制系统的外部扰动、神经网络逼近误差等. 控制器中所需要的速度量由状态观测器提供. 基于 Lyapunov 稳定理论给出了系统闭环稳定条件和稳定域. 该算法中的神经网络无需离线过程而直接进行控制. 水池实验结果验证了算法的有效性.

致谢: 感谢中科院沈阳自动化研究所封锡盛院士、燕奎臣研究员在理论和实验研究中给予的指导和协助.

参考文献 (References)

[1] Yoerger D R, Slotine J J E. Robust trajectory control of underwater vehicles [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1985, 10(4): 462-470.

- [2] Fossen T I, Sagatun S I. Adaptive control of nonlinear systems: a case study of underwater robotic systems [J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(3): 393-412.
- [3] Roberto C, Papoulias F A, Healey A J. Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(3): 52-160.
- [4] Conradini M L, Orlando G. A discrete adaptive variable structure controller for MIMO systems and its application to an underwater ROV [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5(3): 349-359.
- [5] Antonelli G, Chiaverini S, Sarkar N, et al. Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on ODIN [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(5): 756-765.
- [6] Berghuis H, Nijmeijer H. A passive approach to controller observer design for robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(6): 740-754.
- [7] Sun F C, Sun Z Q, Woo P Y. Neural network based adaptive controller design of robotic manipulators with an observer [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2001, 12(1): 54-67.
- [8] Fossen T I. Nonlinear passive control and observer design for ships [J]. Modeling, Identification and Control, 2000, 14(3): 129-184.
- [9] Fossen T I, Strand J P. Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: experimental results with a supply vessel (Regular Paper) [J]. Automatica, 1999, 35(1): 3-16.
- [10] Kim M H. Nonlinear control and robust observer design for marine vehicles [D]. USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [11] Funahashi K I. On the approximate realization of continuous mapping by neural networks [J]. Neural Network, 1989, 2(3): 183-192.

作者简介:

高建树 (1966), 男, 工学硕士. 研究领域: 仪表与检测技术.