

控制与决策

Control and Decision

一种无人船动力定位跨平台实时控制模型

朴在吉, 郭晨

引用本文:

朴在吉, 郭晨. 一种无人船动力定位跨平台实时控制模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 909–916.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0960>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法

Autonomous obstacle avoidance algorithm designed for UAV based on convex circular trajectory

控制与决策. 2021, 36(3): 653–660 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0768>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于强化学习的倒立摆分数阶梯度下降RBF控制

Reinforcement learning based fractional gradient descent RBF neural network control of inverted pendulum

控制与决策. 2021, 36(1): 125–134 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0816>

基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计

Finite time control based on reinforcement learning for a small-size unmanned helicopter

控制与决策. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

一种无人船动力定位跨平台实时控制模型

朴在吉, 郭晨[†]

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了更好地将实时控制算法应用于无人船的自动导航, 针对以往跨平台实时控制的数据类型不统一、通信不可靠等问题, 根据日本国立水产工学研究所进行无人船水池实验的研究模式, 建立一种基于用户数据报协议(UDP)的远程控制模型, 该模型在服务器端使用 python 编写, 在客户端使用 Matlab/Simulink. 为验证控制的实时性, 在实验水池进行基于自抗扰控制技术的航向控制实船实验, 同时验证所设计控制系统的实时性和控制算法的有效性. 在系统测试时, 采用基于 RBF 神经网络抗扰算法对无人船动力定位系统进行仿真, 并对所设计的控制器进行稳定性分析. 仿真实验结果表明, 应用不同编程环境进行复杂远程控制 UDP 通信是平稳的, 过程控制结果令人满意, 为后续进行复杂无人船实船实验奠定了基础.

关键词: 实时控制; 无人船; 用户数据报协议; 神经网络; 动力定位系统; 跨平台通信

中图分类号: TP273.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0960

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 朴在吉, 郭晨. 一种无人船动力定位跨平台实时控制模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 909-916.

Real-time cross-platform control system for unmanned ship dynamic positioning

PIAO Zai-ji, GUO Chen[†]

(School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to better apply the real-time control algorithm to the automatic navigation of unmanned ships, a remote control system based on user datagram protocol (UDP) is established according to the Japanese national research institute of fisheries engineering (NRIFE), the system uses python on the server side and Matlab/Simulink on the client side. Aiming at the problems of inconsistent data types and unreliable communication of cross-platform real-time control in the past, specific solutions are proposed. In order to verify the real-time performance of the control, a real-time course control experiment based on the active disturbance rejection control (ADRC) technology is carried out in the experimental tank, which verifies the real-time performance of the designed control system and the effectiveness of the control algorithm. When testing the system, the simulation of the unmanned ship dynamic positioning system is carried out using the RBF neural network disturbance rejection algorithm, and the stability of the controller is analyzed. The experimental results show that the UDP communication of remote control is smooth and the control results are satisfactory, which provides the foundation for subsequent complex unmanned ship experiments.

Keywords: real-time control; unmanned ship; user datagram protocol; neural network; dynamic positioning system; cross-platform communication

0 引言

无人船因具有高出航率、低成本、恶劣情况下能够替代人进行各种活动等优点, 已成为船舶未来重要的发展趋势, 对其航迹控制、动力定位、路径跟踪等运动控制问题进行研究具有极其重要的价值. 世界各国竞相发展无人船技术, 其中美国和以色列在该方面处于世界领先地位^[1-3]. 无人船有其独特的通信

系统, 由于船上没有人, 它与岸上的信息交流显得极为重要, 常见的通信协议包括下 TCP/IP 协议、UDP、串口通信协议、无线网络协议等. 船舶动力定位系统能够依靠自身设备自动检测出船舶的当前位置, 计算出与目标值的偏差, 并根据船舶所受外环境(如风、浪、流等)的影响, 由控制器计算得到船舶恢复到目标位置所需要的力和回转力矩, 并将推力指令发

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879027, 51579024, 61374114, 51809028); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(3132019318).

[†]通讯作者. E-mail: dmuguoc@126.com.

送给动力定位的推进系统,由推进系统动作产生相应推力和回转力矩,完成动力定位的要求^[4-6]. Matlab作为一种通用控制系统仿真软件,以其强大的功能得到了广泛的应用,在控制理论的研究过程中可以利用 Matlab/Simulink 方便地进行控制规律的设计与仿真. 仿真实验中还经常需要连接外部硬件仿真设备进行实时仿真研究,但是因为过去 Matlab/Simulink 缺乏实时仿真的能力,需要另外编写能进行实时仿真的应用程序进行这项工作. 这种方式下,实时仿真软件功能比较单一,重复性工作较多,且调试困难. 另外, Matlab 与其他平台之间的通信也研究得较少,不利于直接应用 Matlab 进行实际控制,因此有必要对如何在 Matlab/Simulink 环境下进行实时仿真/控制进行探索. 研究发现,利用 Matlab/Simulink 与外部程序的接口通过共享内存与外部控制程序进行数据交换,可以实现跨平台的实时通信,以及精度较高实时控制仿真.

本文针对以往跨平台实时控制的数据类型不统一、通信不可靠等问题,根据日本国立水产工学研究所进行无人船水池实验的研究模式,建立一种基于用户数据报协议(UDP)的远程控制模型,该模型在服务器端使用 python 编写,在客户端使用 Matlab/Simulink. 为验证控制的实时性,在实验水池进行基于自抗扰控制技术的航向控制实船实验,同时验证所设计控制系统的实时性和控制算法的有效性. 在系统测试时,采用基于 RBF 神经网络抗扰算法对无人船动力定位系统进行仿真,并对所设计的控制器进行稳定性分析. 仿真实验结果表明,应用不同编程环境进行复杂远程控制 UDP 通信是平稳的,过程控制结果令人满意,为后续进行复杂无人船实船实验奠定了基础.

1 用户数据报协议

用户数据报协议(UDP)适合一些实时的应用,如 IP 电话、视频会议,它们要求源主机以恒定的速率发送数据,并且在网络出现拥塞时可以丢失一些数据,

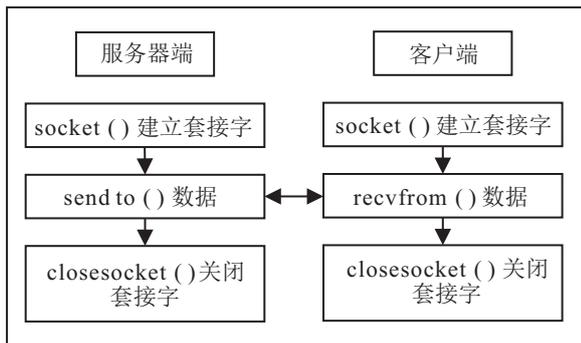


图 1 UDP 套接口通信模型

但是延迟不能太大^[7-9]. UDP 通信需要编写客户端和服务端两个程序,使得两者建立连接,通信模型如图 1 所示.

2 服务器平台

2.1 船舶运动数学模型

船舶动力定位是船舶运动的重要执行机构,按照国际海事组织给出的定义,是指船舶能够只依靠其自身的推进系统来达到指定航线或者停止在某一位置. 动力定位系统对于无人船自主航行、靠离泊、完成海上作业均具有重要意义. 在服务器端可以通过编写船舶运动数学模型模拟真实的船舶以发布船舶的相关数据,如航向角、舵角、位置等. 研究中采用 MMG 模型^[10],即

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)V, \\ M\dot{V} + DV = \tau_T + \tau_W + w. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\eta = [x_{G0}, y_{G0}, \psi]^T$ 为位置向量; $V = [u, v, r]^T$ 为船舶低频运动下的速度向量; $R(\psi) =$

$$\begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为船舶位置坐标与船舶运动状态之间的转换矩阵; $\tau_T = [X_T \ Y_T \ N_T]^T$ 为由控制器在动态定位系统中计算的控制量; $\tau_W =$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ N_w \end{bmatrix}$$

为海洋环境中的扰动力

$$\begin{bmatrix} X_{wave} + X_{wind} + X_{current} \\ Y_{wave} + Y_{wind} + Y_{current} \\ N_{wave} + N_{wind} + N_{current} \end{bmatrix}$$

$$\text{和力矩; } M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}; D =$$

$\begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}$. 本文根据克拉克总结的一系列线性水动力方程计算 M 值和 D 值.

2.2 在 PyCharm 中的数据发布系统

服务器端除了需要通过编程建立船舶运动数学模型外,还需要接收客户端发布的数据以及向外部发布船舶数据. 由于实验水池的船舶数据发布系统由 python 语言编写,为了更好地实际应用,本文应用 python 语言在 PyCharm 中进行服务器数据发布系统的建立.

首先,UDP 根据不同设备的 IP 和端口进行通信.

1) 在 Windows 系统中,端口号只有整数,范围从

0~65535. 在使用UDP通信过程中,必须使用大于1024的端口号,因为小于1024的端口大多为系统调用,可以通过在Windows命令窗口输入netstat-ano查看列出的所有端口的情况。

2) IP地址:用来在网络中标记一台电脑的一串数字,如192.168.1.1,在本地局域网上是惟一的.值得注意的是,127.0.0.1通常表示本机IP,0.0.0.0表示全部网络,即广播发布。

船舶服务器端程序设置了“开始”“暂停”和“停止”功能,数据接收情况如图2所示。

```

↑ ship model sever recv data: 1 0 300 client: (*150.84.118.30*, 10017)
1 1 32 3 17 6 37 606 3036 -144 0 671 6133 0 0 0 300 300
↓ ship model sever recv data: 1 0 300 client: (*150.84.118.30*, 10017)
|| ship model sever recv data: 1 0 300 client: (*150.84.118.30*, 10017)
1 1 32 3 17 6 37 668 3036 -144 0 671 6133 0 0 0 300 300
|| ship model sever recv data: 1 0 300 client: (*150.84.118.30*, 10017)
1 1 32 3 17 6 37 731 3036 -144 0 671 6133 0 0 0 300 300

```

图2 PyCharm中数据接收情况

3 客户端平台

3.1 控制算法

本文提出一种RBF神经网络抗扰控制器,是自抗扰控制^[11-12]和RBF神经网络^[13-14]两种智能控制技术的有机结合,各自发挥其主要的功能,形成互补,从而组成性能更好的控制方式^[15-16]。

本文以二阶系统为例介绍自抗扰控制器原理,结构图如图3所示.二阶受控系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (2)$$

以二阶跟踪微分器为例,其微分方程如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2. \\ \dot{v}_2 = -fst(v_1, v_2, v, r, h_0). \\ d = r \cdot h, d_0 = d \cdot h. \\ y = x_1 - u + h \cdot x_2. \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|}. \\ fst = \begin{cases} \frac{-r \cdot a}{d}, & |a| \leq d; \\ -r \cdot \text{sgn}(a), & |a| > d. \end{cases} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0; \\ x_2 + 0.5(a_0 - d) \cdot \text{sgn}(y), & |y| > d_0. \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中: v 为目标信号, v_1 、 v_2 分别为目标信号的估计值及其一阶微分,fst为非线性函数^[11]。

针对式(2)的二阶系统,引入 $x_3(t)$ 并令 $\dot{x}_3 =$

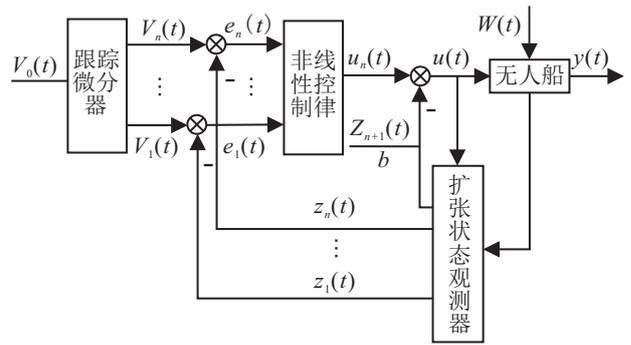


图3 自抗扰控制器结构

$\varphi(t)$,则式(2)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu, \\ \dot{x}_3 = \varphi(t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (4)$$

令 $e = z_1 - y$,构造非线性连续观测器^[17]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e, \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}\text{fal}(e, a_1, \delta_1) + bu, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}\text{fal}(e, a_2, \delta_2). \end{cases} \quad (5)$$

其中: z_1 、 z_2 分别为控制量输出及其一阶微分, z_3 为对于内、外部总扰动的估计, β_{01} 、 β_{02} 和 β_{03} 为输出误差矫正增益.fal函数^[11]如下:

$$\text{fal}(e, a, \delta) = \begin{cases} |e|^a \text{sgn}(e), & |e| > \delta; \\ e/\delta^{1-a}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad \delta > 0. \quad (6)$$

非线性控制律采用如下公式:

$$u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_1, a_1, \delta_1) + \beta_2 \text{fal}(e_2, a_2, \delta_2). \quad (7)$$

将神经网络抗扰控制器设计的步骤归纳如下。

step 1: 选取合适的参数,使得自抗扰控制器能够基本控制被控系统。

step 2: 从状态观测器中取出输出量 z_1 、 z_2 、 z_3 后进行保存.本文以将 z_1 、 z_2 、 z_3 导入Matlab状态变量空间的方式保存数据。

step 3: 训练神经网络,采用RBF神经网络, z_1 、 z_2 为输入, z_3 为希望输出.训练过程中给出一定的训练参数和终止条件。

step 4: 将训练好的神经网络以非线性函数 f_{ANN} 的形式嵌入到图4中相应的位置,观察控制结果。

RBF神经网络是一种前向神经网络,由3层结构组成,其整体是非线性结构,但第2层隐含层到第3层输出层的关系是线性的,这样可以在加快学习速度的情况下有效避免局部极小的问题,其网络结构见图5。

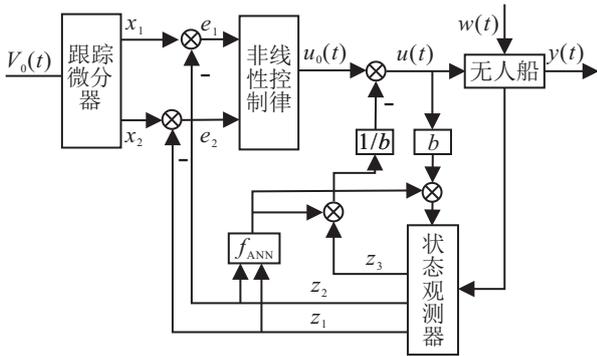


图4 神经网络抗扰控制器结构

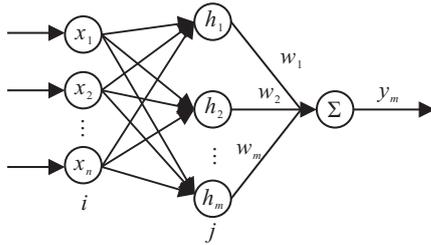


图5 RBF神经网络结构

在RBF网络结构中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量. 设RBF径向基向量 $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$, h_1 为高斯基函数, 有

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

其中网络第 j 个节点的中心矢量为 $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]^T, i = 1, 2, \dots, n$. 设网络基宽向量为 $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T, b_j$ 为节点 j 的基宽度参数, 是大于零的数. 网络的权向量为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$, 辨识网络的输出为

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m. \quad (9)$$

辨识器的性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2}(y(k) - y_m(k))^2. \quad (10)$$

根据梯度下降法, 相应参数的迭代算法如下:

$$\begin{cases} \Delta w_j(k) = \eta(y(k) - y_m(k))h_j, \\ w_j(k) = w_j(k-1) + \Delta w_j(k) + \\ \quad a(w_j(k-1) - w_j(k-2)), \\ \Delta b_j(k) = \eta(y(k) - y_m(k))w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3}, \\ b_j(k) = b_j(k-1) + \Delta b_j(k) + \\ \quad a(b_j(k-1) - b_j(k-2)), \\ \Delta c_{ji}(k) = \eta(y(k) - y_m(k))w_j \frac{x_j - c_{ji}}{b_j^2}, \\ c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji}(k) + \\ \quad a(c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)). \end{cases} \quad (11)$$

其中: η 为学习速率, a 为动量因子. Jacobian阵(即对象输出对控制输入变化的灵敏度信息)算法为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{ji} - x_1}{b_j^2}, \quad (12)$$

其中 $x_1 = \Delta u(k)$.

应用神经网络的逼近能力可以使状态观测器的精度提高, 相当于系统的稳定性程度得到了提高, 在一定扰动的作用下系统的变化减小, 提高了控制效果.

由于在自抗扰控制器中参数较多, 且一些参数的物理意义并不明确, 也没有对于各个参数计算的准确公式, 一些参数只能靠经验取得, 参数的整定问题较为困难. 因此有学者提出将扩张状态观测器线性化, 并与积分微分控制相结合设计出线性自抗扰控制器.

将式(5)中的fal函数全部取为 $\text{fal}(e, 1, 0, \delta) = e$, 可以得到线性扩张状态观测器的状态方程为

$$\begin{cases} e = z_1 - y, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e, \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}e + bu, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}e. \end{cases} \quad (13)$$

其特征表达式为

$$\lambda(s) = s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}.$$

通常情况下, $\lambda(s) = (s + \omega)^3$ 形式的特征方程稳定性较好, 且具有较好的过渡过程, 所以将 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 表示为

$$\beta_{01} = 3\omega_0, \quad \beta_{02} = 3\omega_0^2, \quad \beta_{03} = \omega_0^3,$$

其中 ω_0 为扩张状态观测器带宽.

线性误差状态反馈控制律表达如下:

$$u_0 = k_p(r - z_1) + k_d z_2. \quad (14)$$

其中: r 为期望值, k_p, k_d 分别为比例、微分系数, 取 $k_p = \omega_c^2, k_d = 2\omega_c, \omega_c$ 为状态反馈系统的带宽. 由于动态扰动补偿的需要, 控制量 u 表示为

$$u = \frac{u_0 - (z_3 + f_{\text{ANN}}(z_1, z_2))}{b}. \quad (15)$$

神经网络线性自抗扰控制器稳定性分析: 本文所证明的稳定性是BIBO稳定性, 是指在有界输入的情况下产生有界输出.

定理1^[17] 设线性扩张状态观测器的估计误差满足 $\dot{\tilde{e}} = A_0 \tilde{e} + B_0 H$, 假定 H 是有界的, 则总有线性观测器存在使估计误差有界, 即存在正数 M 使得 $\|\tilde{e}\| \leq M$ 成立.

动力定位问题有3个自由度的控制量, 每个控制量可以看作是一个单输入单输出一阶系统, 可写作

$$\dot{y}(t) = f(y(t), w(t)) + bu. \quad (16)$$

根据扩张状态观测器作如下反馈:

$$u = \frac{\ddot{r} - (z_3 + f_{ANN})}{b} + \frac{k_p(r - z_1)}{b} + \frac{k_d(\dot{r} - z_2)}{b}. \quad (17)$$

则式(16)可以写成

$$\dot{y}(t) = f - (z_3 + f_{ANN}) + k_p(r - z_1) + k_d(\dot{r} - z_2) + \ddot{r}. \quad (18)$$

由于 f_{ANN} 与 z_3 具有相同特性,可以令 $r_1 = r, r_2 = \dot{r}, r_3 = \ddot{r}, z_3 + f_{ANN} = \tilde{z}_3$ 作为扰动的估计量,且 $\varepsilon_i = r_i - x_i, i = 1, 2, 3$. 则有

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \dot{r}_1 - \dot{x}_1 = r_2 - x_2 = \varepsilon_2, \\ \dot{\varepsilon}_2 = \dot{r}_2 - \dot{x}_2 = r_3 - y = -k_p\varepsilon_1 - k_d\varepsilon_2 - k_p\tilde{e}_1 - k_d\tilde{e}_2 - \tilde{e}_3. \end{cases} \quad (19)$$

其中: z_i 为控制量 x_i 的估计值, $\tilde{e}_i = x_i - z_i (i = 1, 2, 3)$ 为估计误差. 令 $\tilde{e} = (\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_3)^T, \varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2)^T, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_p & -k_d \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -k_p & -k_d & 1 \end{bmatrix}$, 则式(19)可以写成矩阵形式

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + B\tilde{e}. \quad (20)$$

在定理1成立的前提下,对于该形式的闭环系统有如下定理2.

定理2 假定线性扩张状态观测器的估计误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{e}\|_2 = 0$, 则存在大于零的参数 k_i 使闭环系统的跟踪误差趋于零. 从而对于有界输入, 闭环系统的输出有界, 即系统是BIBO稳定的.

证明 式(20)的解为

$$\varepsilon(t) = \exp(At)\varepsilon(0) + \int_0^t \exp(A(t-\tau))B\tilde{e}d\tau. \quad (21)$$

由于

$$|\lambda I_n - A| = k_p + k_d\lambda + \lambda^2, \quad (22)$$

可以通过选择适当的 $k_i (i = p, d)$, 使 A 具有 n 个不同的特征值, 从而 A 可以对角化, 即存在可逆矩阵 T , 使 $A = T \text{diag}\{-\lambda_n\} T^{-1}$, 所以有

$$\exp(At) = T \text{diag}\{\exp(-\lambda_n t)\} T^{-1}. \quad (23)$$

对于任意正数 $t > 0$, 有

$$\|\exp(At)\|_2 \leq \|T\|_2 \|T^{-1}\|_2 \exp(-\lambda_1 t) = \beta \exp(-\lambda_1 t). \quad (24)$$

当 λ 选定后, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\exp(At)\|_2 = 0. \quad (25)$$

所以同样的, 有

$$\|\exp(A(t-\tau))\|_2 \leq \beta \exp(-\lambda_1(t-\tau)),$$

$$t \geq \tau. \quad (26)$$

由定理1, \tilde{e} 的二范数有上界 η , 于是有

$$\begin{aligned} & \left\| \int_0^t \exp(A(t-\tau))B\tilde{e}d\tau \right\|_2 = \\ & \left\| \int_0^{t_0} \exp(A(t-\tau))B\tilde{e}d\tau \right\|_2 + \\ & \left\| \int_{t_0}^t \exp(A(t-\tau))B\tilde{e}d\tau \right\|_2 \leq \\ & \beta \|B\|_2 a \exp(-\lambda_1 t) \int_0^{t_0} \exp(\lambda_1 \tau) d\tau + \\ & \beta \|B\|_2 a \exp(-\lambda_1 t) \eta \int_{t_0}^t \exp(\lambda_1 \tau) d\tau \leq \\ & C_1 \exp(-\lambda_1 t) + C_2 \eta. \end{aligned} \quad (27)$$

其中: $C_1 = \beta \|B\|_2 a \int_0^{t_0} \exp(\lambda_1 \tau) d\tau, C_2 = \beta \|B\|_2 / \lambda_1$, 均为常数. 由于 $\exp(-\lambda_1 t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left\| \int_0^t \exp(A(t-\tau))B\tilde{e}d\tau \right\|_2 = 0. \quad (28)$$

进而由式(25)和(28)可以得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\varepsilon\|_2 = 0. \quad \square$$

3.2 在 Matlab / Simulink 中的实时控制系统

使用 Matlab 的 Simulink 进行 UDP 通讯需要注意数据的打包和解包^[18-20]. 如图6所示, 通过 UDP receive 模块接收指定 IP 和 port 的数据, 通过 Byte unpack 进行数据的解码, 其中 length 输出的是接收数据的位数. 经过控制模块的计算, 通过 data type conversion 模块进行数据类型的转换, 应用 Byte pack 进行数据的打包, 最后通过 UDP send 模块设定 IP 和 port, 发送处理好的数据.

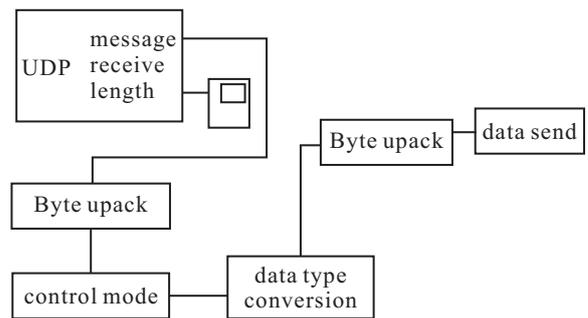


图6 Simulink 客户端简单框图

在以往的研究中, simulink 中的仿真时间由仿真步长决定, 并不是由实际时间决定, 这虽然有利于进行科研工作, 可以提高计算速度, 但是不能进行实时控制. 为解决该问题, 本文采用 RTW 工具箱统一 Simulink 中的仿真时间与实际时间.

4 模型实时性验证

为验证所设计系统的实时性, 在日本国立水产工学研究所进行一次水池实验以测试系统的有效性, 实

验相关照片如图7所示。

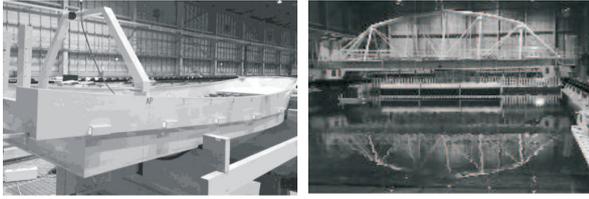
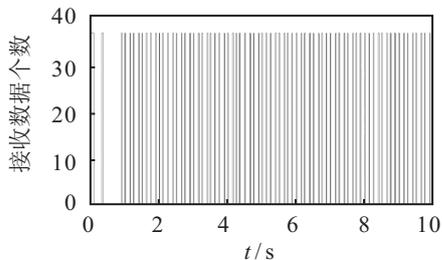
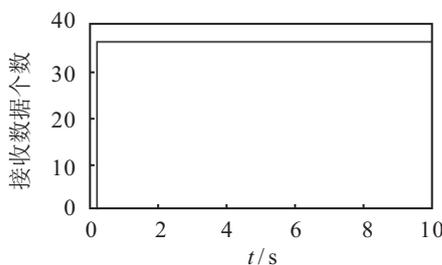


图7 水池实验照片

该测试平台的运行过程如下,运行python编写的服务器端,该服务器端与船舶通过WIFI连接接收船舶的实时数据并对外发布.在实际的通信过程中,所谓实时就是要在特定的时间间隔内完成特定的任务,双方的通信频率是一个非常重要的因素.如果通信频率不合适,则会导致丢包和控制效果减弱.通信频率测试如下:服务器向网络发送数据的时间为0.05 s,客户端分别为0.025 s和0.125 s(进行多次调试选取其中两种说明问题).接收数据数量如图8所示.



(a) 客户端采样时间 0.025 s



(b) 客户端采样时间 0.125 s

图8 不同采样时间下的客户端接收数据个数

如图8所示,客户采样时间越大,数据损失越小.在0.125 s时数据没有损失,达到实时控制要求,所以在控制中采用此采样时间.数据传输有丢失,则会减弱控制信号,严重时会导致控制失效.此外,为了保证实时控制,测试中采用了一种策略,即如果有一个数据损失,则保持上一时刻接收到的数据.实验用的无人船舶为7.2倍比例缩小的一艘日本渔船,名字是kosoko,参数如下:length为12.00 m, breadth为5.10 m, design draught为1.00 m.

实时性控制的验证方法为应用UDP通信控制模式进行ADRC控制器的航向控制实船实验.目标航向70°,结果如图9所示,舵角曲线如图10所示.

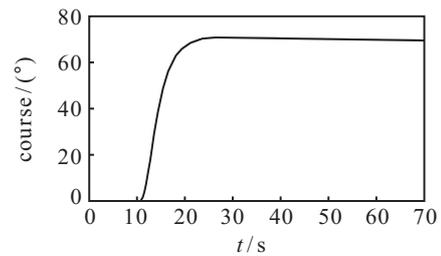


图9 实时性测试实验船舶航向曲线

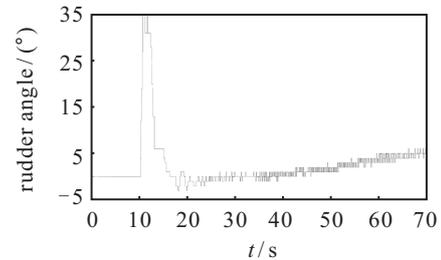


图10 实时性测试实验船舶舵角曲线

由实验结果可见,客户端与服务器端通信良好,不存在数据丢失的情况,保证了控制的连续性和有效性,证实了Matlab可以作为客户端控制器应用于该模式下的实时控制,同时也证实了自抗扰控制器在航向控制中的稳定性.

5 无人船跨平台远程控制仿真

仿真采用的无人船舶仍为前文提到的kosoko.仿真中干扰信号为

$$(1.1 + 1.2 \sin(0.02t) + 1.5 \sin(0.1t)) \text{ kN};$$

$$13(-1.1 + 2.0 \sin(0.02t - \pi/6) + 1.5 \sin(0.3t)) \text{ kN};$$

$$200(\sin(0.09t + \pi/3) + 3 \sin(0.01t)) \text{ kN} \cdot \text{m};$$

相当于4级海况^[21].服务器端发送的船舶数据为:校验位首部、船舶ID、小时、分钟、秒、微秒、位置X、位置Y、船首方向、转首角速度、舵角、螺旋桨转速、校验位尾部,转换成二进制共为36字节.接收的数据为:船舶编号、舵角命令、螺旋桨转速命令.客户端接收全部服务器端发布的数据,并通过控制算法得到命令舵角和螺旋桨转速来控制船舶.首先进行神经网络抗扰控制器与自抗扰控制器在一定干扰下的航向控制抗干扰能力仿真对比分析,目标航向为20°.状态观测器输出 z_1 、 z_2 、 z_3 的对比曲线如图11所示,舵角的对比曲线如图12所示.

由图11可见,加入神经网络后使得 z_3 的变化范围减小,从而使得自抗扰航向控制器具有更好的自适应能力,能够使扩张状态观测器的观测效果更为准确.由图12可见,转向角的大致变化范围基本不变,保持了较小的转向角,不仅可以降低转向电机的损耗,还能减少航行阻力,提高航行的经济性.航向控制结果的对比曲线如图13所示.

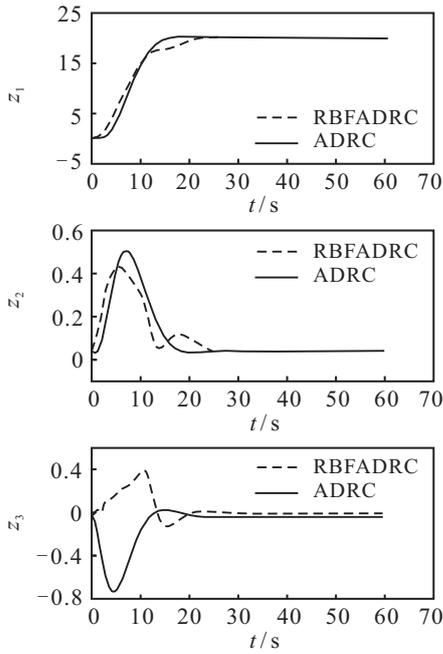


图 11 z_1, z_2, z_3 对比曲线

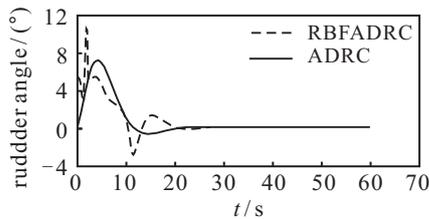


图 12 舵角对比曲线

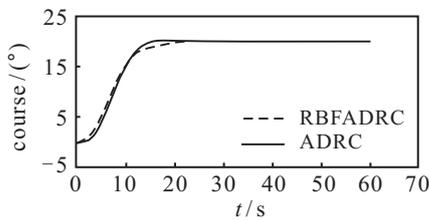


图 13 航向控制结果对比曲线

由图 13 可见,神经网络自抗扰航向控制器在没有减弱原 ADRC 控制品质的基础上改善了航向控制效果,有效地减小了超调量,达到了预期的控制效果。

下面进行船舶动力定位系统仿真研究.神经网络抗扰控制器的参数为: $r = 100, h = 2, a_{01} = 0.5, a_{02} = 0.25, \delta_1 = 0.03, \beta_{01} = 50, \beta_{02} = 30, \beta_{03} = 100, b = 1, a_1 = 0.7, a_2 = 2.75, \delta_2 = 5, \beta_1 = 0.35, \beta_2 = 0.01$.无人船采用 ADRC 控制器的结果如图 14 所示。

由图 14 可见,控制结果存在高频抖振,这在实际控制过程中是极其不利的,如果系统是大惯性系统,即响应有一定的延时,则影响较小,但是若系统反应较为灵敏则会造成控制失效,可以通过加入先进的高频滤波器解决这一问题.采用 RBFADRC 后的结果如图 15 所示。

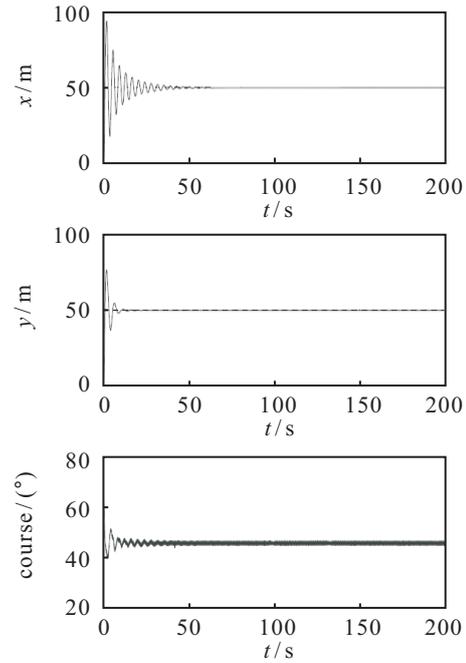


图 14 ADRC 控制结果

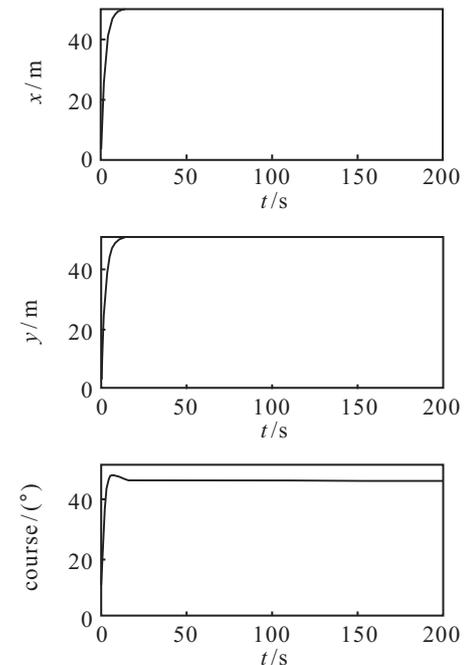


图 15 RBFADRC 控制结果

由图 15 可见, RBFADRC 控制器可以控制船舶到达所需位置,航向和位置误差可以收敛到零.所设计控制器的响应时间约为 20s,具有补偿未知动态引起的不确定性与未知时变环境扰动的能力.因此,所提出的神经网络抗扰控制器对船舶动力定位系统更为有效,对于未测量的船舶状态和未知的动态模型参数以及时变环境干扰有更好的鲁棒性。

6 结论

本文针对无人船跨平台远程控制提出了一种利用 Matlab 作为客户端、python 作为服务器端的控制策略.控制结果表明,当通信频率匹配正确,网络畅通

时,服务器端能够顺利接收到连续的控制信号,实现了对于船舶动力定位的控制.同时在这种模式下测试了神经网络抗扰算法在动力定位过程中的抗干扰能力,进一步验证了所提出算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Wróbel K, Montewka J, Kujala P. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 165: 155-169.
- [2] Larrazabal J M, Peñas M S. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 55: 106-117.
- [3] Yan R J, Pang S, Sun H B, et al. Development and missions of unmanned surface vehicle[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2010, 9(4): 451-457.
- [4] Sørensen A J. A survey of dynamic positioning control systems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2011, 35(1): 123-136.
- [5] Loria A, Fossen T I, Panteley E. A separation principle for dynamic positioning of ships: Theoretical and experimental results[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(2): 332-343.
- [6] Pettersen K Y, Fossen T I. Underactuated dynamic positioning of a ship-experimental results[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(5): 856-863.
- [7] Rosenberg J, Weinberger J, Huitema C, et al. STUN-simple traversal of user datagram protocol (UDP) through network address translators (NATs)[J]. *RFC*, 2003, 228: 397-416.
- [8] Garcia N M, Gil F, Matos B, et al. Keyed user datagram protocol: Concepts and operation of an almost reliable connectionless transport protocol[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18951-18963.
- [9] Huh J H. Reliable user datagram protocol as a solution to latencies in network games[J]. *Electronics*, 2018, 7(11): 295.
- [10] Yasukawa H, Sakuno R. Application of the MMG method for the prediction of steady sailing condition and course stability of a ship under external disturbances[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2020, 25(1): 196-220.
- [11] Han J, Wang H, Jiao G, et al. Research on active disturbance rejection control technology of electromechanical actuators[J]. *Electronics*, 2018, 7(9): 174.
- [12] Lei Z L, Guo C, Fan Y S. Dynamic positioning system based on active disturbance rejection technology[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(4): 636-644.
- [13] Mizuno N, Kuroda M, Okazaki T, et al. Minimum time ship maneuvering method using neural network and nonlinear model predictive compensator[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(6): 757-765.
- [14] Ahmed Y A, Hasegawa K. Automatic ship berthing using artificial neural network trained by consistent teaching data using nonlinear programming method[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(10): 2287-2304.
- [15] Sun K K, Mou S S, Qiu J B, et al. Adaptive fuzzy control for non-triangular structural stochastic switched nonlinear systems with full state constraints[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(8): 1587-1601.
- [16] Qiu J B, Sun K K, Wang T, et al. Observer-based fuzzy adaptive event-triggered control for pure-feedback nonlinear systems with prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(11): 2152-2162.
- [17] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. *自动化学报*, 2013, 39(5): 574-580. (Chen Z Q, Sun M W, Yang R G. Study on stability of linear ADRC[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 574-580.)
- [18] Zan Y F, Han D F, Yuan L H, et al. Research on real-time simulation system of ship motion based on simulink[J]. *Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8(1): 820-827.
- [19] Tannuri E A, Morishita H M. Experimental and numerical evaluation of a typical dynamic positioning system[J]. *Applied Ocean Research*, 2006, 28(2): 133-146.
- [20] Im N, Hasegawa K. A study on automatic ship berthing using parallel neural controller[J]. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 2001(236): 65-70.
- [21] Wu D F, Ren F K, Qiao L, et al. Active disturbance rejection controller design for dynamically positioned vessels based on adaptive hybrid biogeography-based optimization and differential evolution[J]. *ISA Transactions*, 2018, 78: 56-65.

作者简介

朴在吉(1990—),男,博士生,从事先进控制理论、船舶运动控制的研究, E-mail: 874885171@qq.com;

郭晨(1956—),男,教授,博士生导师,从事船舶自动控制系统、船舶轮机系统仿真、智能控制理论与应用、虚拟现实技术及应用等研究, E-mail: dmuguoc@126.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)