DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312059

基于跟踪误差约束的机器鱼抗扰动路径跟踪控制*

李东方[1], 张滨新[1], 曾林林[1], 黄　捷[1], 宋爱国[2]
(1. 福州大学电气工程与自动化学院　福州　350108; 2. 东南大学仪器科学与工程学院　南京　214135)

摘　要: 为了解决机器鱼在扰动下跟踪效率低的问题,本工作提出了一种抗扰动和自适应的误差约束控制方案。首先,通过设计虚拟控制输入,并利用积分环节更新了自适应视线制导律,消除了侧滑导致的运动位置偏离,增强了机器人的抗干扰能力。其次,通过构造机器鱼的偏航和浪涌自适应控制器,使神经网络函数拟合模型的不确定项和水流扰动,并用逼近值补偿系统的控制输入。这提升了机体的环境适应性。最后,利用障碍 Lyapunov 理论,机器鱼跟踪位置和角度的一致最终有界性被证明。通过模拟和实验,与经典制导方案相比,所提方案提高了机器鱼的跟踪效率和稳态性能,使机器鱼的位置误差收敛速率平均提升了 14.57%。

关键词: 机器鱼; 误差约束; 自适应视线制导; 抗扰动; 路径跟踪
中图分类号: TP242　TH39　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 590.1　460.40

Disturbance-resistant path-tracking control method for robotic fish with tracking error constraints

Li Dongfang[1], Zhang Binxin[1], Zeng Linlin[1], Huang Jie[1], Song Aigou[2]
(*1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;*
2. College of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 214135, China)

Abstract: To address the issue of low tracking efficiency of robot fish under disturbance, this study proposes an anti-disturbance and adaptive error constraint control scheme. Firstly, by designing a virtual control input and updating the adaptive line-of-sight guidance law using integral link, the motion position deviation caused by side slip is eliminated and the robot's anti-interference ability is enhanced. Secondly, by constructing an adaptive controller for yaw and surge of the robot fish, the neural network function fits uncertainties and flow disturbances in the model, compensating for system control input with an approximation value. This improves the body's adaptability to environmental conditions. Finally, utilizing obstacle Lyapunov theory, consistent final boundedness of robot fish tracking position and angle is proven. Through simulation and experiment, compared with the classical guidance scheme, the proposed scheme improves the tracking efficiency and steady-state performance of the robot fish, and the position error convergence rate of the robot fish is increased by 14.57% on average.

Keywords: robotic fish; error constraint; adaptive LOS; anti-interference; path-tracking

0　引　言

仿生机器人可在担任军事侦察、人员搜救、地形勘探与水域巡检等重要任务发挥着不可替代的作用[1-2]。然而,在执行任务期间,往往碰到环境恶劣、空间狭窄、可见度低和地形崎岖等障碍[3-4]。其中,仿生鱼机器人具有体积小、灵活性高、高机动性、强适应性等特点,目前有螺旋桨式、尾鳍式和胸鳍式等推进技术。但是,由于水中的环境变幻莫测,导致未知的外部干扰和非线性从而无法构建精确的数学模型。不仅如此,模型的不确定性和侧滑扰动造成机体无法实施有效的运动控制而偏离轨迹[5]。

收稿日期:2023-10-23　　Received Date: 2023-10-23
*基金项目:国家自然科学基金(62302117)项目、全国博士后"香江学者"计划(XJ2023018)、第 71 批中国博士后科学基金面上一等(2022M710093)项目、福州大学启动基金(XRC21061)资助

因此,研究仿生鱼机器人模型干扰自适应和抗抖动的控制方法成为了一个热点。

1) 动力学建模:对于仿生鱼机器人的研究历程中,取得过令人瞩目的成果[6-8]。其中,对于机器人的推进力学方程,Wu[9]提出了“二维波动板理论”,建立了扁平鱼类模型的力学推动模型。同时,Lighthill[10]根据鱼体模型特点,利用空气动力学原理提出了“细长体理论”。进一步推出了鳗鲡科式机器鱼的动力学方程。以此为基础,再次提出了“大摆幅细长体理论”,优化了机器鱼横向位移偏差[11]。在此基础上,王洋等[12]将仿生鱼机器人的运动机理与中心模式发生器,推导出了参数优化的正向推力模型。在此期间,Yu 等[13]考虑具有不规则几何轮廓和众多非均匀水动力参数,利用数据驱动方法,得到了机器鱼的动态模型。刘锦豪等[14]将利用牛顿欧拉方程,得出仿生鱼的鱼尾游动的水平动力学模型。但是,机器鱼在水中完成特定任务,需要按照规划航线前行,这需要研究路径跟踪策略。

2) 路径跟踪控制:根据动力学模型,众多学者在机器鱼的路径跟踪控制领域展开了相关研究。在之前的工作中,仿生机器人的跟踪方案被设计[15-16]。但是,将这些方法应用在机器鱼上,还存在特定的局限性。Bal 等[17]将模糊逻辑控制运用到机器人的路径跟踪控制中,使机体可以自动执行给定的任务。但是,路径跟踪需要仿生机器鱼精确的运动控制。因此,基于模糊自适应串级 PID 机器鱼的运动控制方法,宋英杰等[18]实现了机器鱼的位姿控制。不过在面对由外部环境的不可预测性时,导致机器鱼的运动控制受扰明显。为解决该问题,李江浩[19]利用了滑模变结构控制器,减小了干扰带来的抖振影响。同时,Liu 等[20]在机器鱼模型中附加了扰动消除环节。该方案在一定程度上对流体扰动有抑制作用。

3) 制导律与抗干扰方法:实现机器鱼的路径跟踪,还需要制导律的控制。典型的制导方法包括视距、自主式和恒定方位制导等。在先前的工作中,一种积分形式的侧滑角补偿的视线制导策略被提出[21]。该方法以消除机体侧滑角为目的,避免了机体与参考路径的方向偏离。王潋等[22]提出基于前瞻距离的视线制导律,提高了轨迹跟踪的精度要求。但是,前瞻距离具有时变特性,无法在现实情况下普遍适用。Caharija 等[23]提出了积分视线制导律,方案嵌入了一个积分模块解决了时变特性所带来的参数干扰。但是,在现实情况下,外部环境扰动将导致机器人直接偏离预定轨迹。针对扰动处理,王常顺等[24]利用参数化视线制导律与双种群遗传算法,提出了一种具有参数在线优化的自抗扰控制器。但是,由于参数的实时更新,跟踪效率得不到实际保障。因此,Fossen[25]提出了一种自适应视线制导策略,可根据外部扰动所产生的飘移力进行自适应补偿,同时,当时变扰动所造成机器侧滑时,自适应制导律也具有很好的鲁棒性。不足的是,无法避免机器人在跟踪过程中发生抖动的弊端,从而导致跟踪精度大打折扣。为了削弱抖动影响,Su 等[26]提出了一种自适应积分制导策略,引入了虚拟变量来代替不可观测的外部扰动,并根据位置误差实时调整自适应参数,有效提高了机器人的抗干扰能力和位置误差鲁棒性。Yu 等[27]将模糊控制应用到基于引导控制的视线制导策略中,拟合外部无法测量的干扰和模型的不确定项,以达到增加跟踪精度的目的。但是,系统状态约束和输出约束也限制了机器鱼的路径跟踪效果,这是值得关注的问题。

根据以上工作,针对仿生机器鱼的轨迹跟踪控制和侧滑补偿策略方面取得了许多重要成果。但是,实现机器鱼抗扰动路径跟踪控制仍然有亟待解决的问题:1) 制导方式受环境摩擦力的影响会出现侧滑,导致文献[22-24]中的机器人在漂移力作用下偏离参考路径;2) 模型不确定项和水流扰动在文献[18-20]中未被得到合理的解决方案,且传统的控制方式鲁棒性较低,且处理非线性或时变系统时效果有限;3) 相较于文献[27],传统设计方案对机器人的误差约束不足,导致系统的收敛速率降低。为了解决现有方法的问题,本工作在第 2 节展现了机器鱼的动力学模型。在第 3 节中,得到了机器人的运动学位置误差,基于障碍李雅普诺夫理论构造了积分自适应视线制导律,以消除侧滑导致的位置偏离问题。第 4 节借助神经网络,设计了机器鱼的转向和浪涌自适应控制器。第 5~6 节通过数值模拟和样机实验对所提方案进行了验证。最后,第 7 节得到结论。

为了突出本文的贡献,总结如下:

1) 本工作发展了一种基于仿生机器鱼的障碍的自适应积分制导律。通过引入虚拟控制输入,消除了文献[22,25]中对侧滑角的限制。同时,通过神经网络方法逼近系统的不可测变量,以补偿参考偏航角,提高了机器人的抗干扰能力。

2) 不同于文献[17-18],本工作通过神经网络函数拟合模型的不确定项和水流扰动,用其逼近值补偿了系统的控制输入量,提高了机器人的路径跟踪精度。

3) 本工作结合对称型障碍李雅普诺夫理论设计的制导律将机器鱼的跟踪误差约束在规定范围内。值得注意的是,相较于之前设计的控制器[15-16],本方案提高了误差的收敛速度和稳态性能。

1　机器鱼力学模型

本节将给出机器鱼的力学模型。另外,一些重要的引理和假设将会被提及。

定义 3 组独立坐标系,惯性坐标系 [Oxy],机体坐标

系[Buv]和塞雷特 - 弗雷内路径坐标系[SF]。参考文献[28],得到欠驱动机器鱼的运动学方程如下:

$$\begin{cases}\dot{x}=u_r\cos\psi-v_r\sin\psi+V_x\\ \dot{y}=u_r\sin\psi+v_r\cos\psi+V_y\\ \dot{\psi}=r\end{cases}\tag{1}$$

式中:ψ 为偏航角,r 为偏航角速度。$V=(V_x,V_y)$ 为惯性坐标系下的海流扰动速度。$u_r=u-u_c$ 和 $v_r=v-v_c$ 分别为机器人在体坐标系下的浪涌和摇摆速度。(u_c,v_c) 为体坐标系下的洋流速度,(u,v) 为参考速度。在不同参照系下,(V_x,V_y) 和 (u_c,v_c) 满足:

$$\begin{bmatrix}u_c\\ v_c\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}(\psi)\begin{bmatrix}V_x\\ V_y\end{bmatrix}\tag{2}$$

其中,$R(\psi)=\begin{pmatrix}\cos\psi & -\sin\psi\\ \sin\psi & \cos\psi\end{pmatrix}$。

参考文献[29],利用牛顿-欧拉方程得到机器鱼的动力学模型如下:

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{V}}_r=-\boldsymbol{C}(\boldsymbol{V}_r)\boldsymbol{V}_r-\boldsymbol{D}(\boldsymbol{V}_r)\boldsymbol{V}_r-\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{d}\tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{V}_r=[u_r,v_r,r]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{\tau}=[\tau_u,0,\tau_r]^{\mathrm{T}}$ 为控制输入,$\boldsymbol{d}=[d_u,d_v,d_r]^{\mathrm{T}}$ 为外界干扰,$\boldsymbol{M}$ 为附加质量矩阵,$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{V}_r)$ 为相对科里奥利离心力,$\boldsymbol{D}(\boldsymbol{V}_r)$ 为扰动环境下的水动力阻尼项。

$$\boldsymbol{M}=\begin{pmatrix}m_{11}&0&0\\0&m_{22}&m_{23}\\0&m_{32}&m_{33}\end{pmatrix}\quad \boldsymbol{D}(\boldsymbol{V}_r)=\begin{pmatrix}d_{11}&0&0\\0&d_{22}&d_{23}\\0&d_{32}&d_{33}\end{pmatrix}\tag{4}$$

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{V}_r)=\begin{bmatrix}0&0&-m_{22}v_r-\dfrac{(m_{23}+m_{32})r}{2}\\0&0&m_{11}u_r\\m_{22}v_r+\dfrac{(m_{23}+m_{32})r}{2}&-m_{11}u_r&m_{33}\end{bmatrix}\tag{5}$$

式中:$(m_{11},m_{22},m_{23},m_{33},m_{32})$ 为包含附加质量的惯性参数,$(d_{11},d_{22},d_{23},d_{32},d_{33})$ 为水动力阻尼系数。

机器鱼需要抵抗流体干扰向前运动,给出如下假设。

假设 1:海流干扰是周期、时变和有界的,$|V_x|\leqslant V_{x,\max}$ 且 $|V_y|\leqslant V_{y,\max}$。其中,$V_{x,\max}>0$ 和 $V_{y,\max}>0$ 为常数。

假设 2:洋流速度 $U_C=\sqrt{V_x^2+V_y^2}$ 是有界的,存在一个常数 $U_{C,\max}>0$,使 U_C 满足 $|U_C|\leqslant U_{C,\max}$。

为了拟合机器鱼模型中的动态不确定项,借助神经网络方法给出如下引理。

引理 1:(参考文献[30])对于定义在紧集 $\Omega_Z\in R^n$ 上任意给定的非线性函数 $f(Z):R^n\to R$,可以用径向基函数(RBF)向量 $\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(Z)$ 进行逼近,可以得到:

$$f(Z)=\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(Z)+\varepsilon\tag{6}$$

式中:ε 代表近似误差,它满足 $|\varepsilon|\leqslant\bar{\varepsilon}^*$,$\bar{\varepsilon}^*>0$。$Z$ 为网络输入。$s(Z)=[s_1(Z),\cdots,s_l(Z)]^{\mathrm{T}}$ 为 RBF 向量。$\boldsymbol{W}^*=[w_1^*,\cdots,w_l^*]^{\mathrm{T}}$ 为神经网络的最优权向量,$l>1$ 为网络节点数。在此,选取 $s_i(Z)$ 为高斯函数。

$$s_i(Z)=\exp\left[\frac{-(Z-\boldsymbol{\mu}_i)^{\mathrm{T}}(Z-\boldsymbol{\mu}_i)}{\omega_i^2}\right]\tag{7}$$

式中:ω_i 为函数宽度,i 为隐藏层节点数,$\boldsymbol{\mu}_i=[\mu_{i,1},\cdots,\mu_{i,l}]^{\mathrm{T}}$ 为高斯中心点的向量值。

2 动态跟踪控制

为了实现机器鱼的路径跟踪,需要计算机体的位置误差。因此,为了提高机器人跟踪误差的收敛速度,本部分基于对称型障碍李雅普诺夫理论,设计新颖的障碍自适应积分制导律,目的是消除侧滑导致的运动轨迹偏离问题,提高位置误差的稳态性能。

2.1 路径跟踪误差

机器鱼沿预定路径运动。定义 $P_F(\bar{\omega})$ 为路径点与路径参数 $\bar{\omega}$。在[SF]中,$P_F(\bar{\omega})$ 的轴线与期望路径相切。(x_e,y_e) 为机体在[SF]中的位置误差,如图 1 所示。

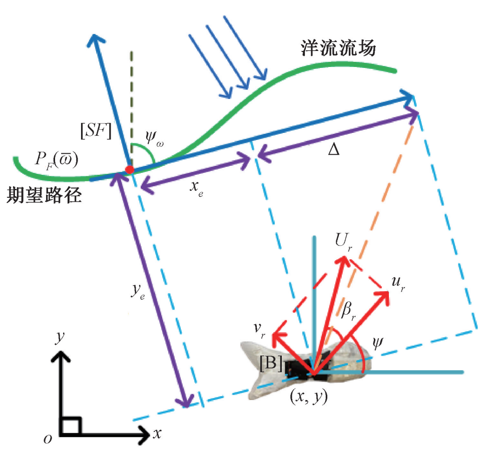


图 1 机器人路径框架

Fig. 1 Robot Path Framework

$$\begin{cases}x_e=\cos(\varphi_{\bar{\omega}})(x-x_P)+\sin(\varphi_{\bar{\omega}})(y-y_P)\\ y_e=-\sin(\varphi_{\bar{\omega}})(x-x_P)+\cos(\varphi_{\bar{\omega}})(y-y_P)\end{cases}\tag{8}$$

$$\begin{cases}\dot{x}_e=u_r\cos(\psi-\varphi_{\bar{\omega}})-v_r\sin(\psi-\varphi_{\bar{\omega}})+\dot{\varphi}_{\bar{\omega}}y_e-\\ \qquad\dot{\bar{\omega}}\sqrt{\dot{x}_P^2+\dot{y}_P^2}+w_x\\ \dot{y}_e=U_r\sin(\psi-\varphi_{\bar{\omega}}+\beta_r)-\dot{\varphi}_{\bar{\omega}}x_e+w_y\end{cases}\tag{9}$$

式中:$U_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2}$,$\dot{x}_P(\bar{\omega}) = \dfrac{\partial x_P(\bar{\omega})}{\partial \bar{\omega}}$,$\dot{y}_P(\bar{\omega}) = \dfrac{\partial y_P(\bar{\omega})}{\partial \bar{\omega}}$,$\beta_C = \operatorname{atan2}(V_y, V_x)$。$\varphi_{\bar{\omega}} = \operatorname{atan2}(\dot{y}_P(\bar{\omega}), \dot{x}_P(\bar{\omega}))$ 为方位角,(x_P, y_P) 为参考路径的虚拟目标位置。定义 $\boldsymbol{w} = [w_x, w_y]^{\mathrm{T}}$ 和预估的外界扰动 $w_x = U_C\cos(\beta_C - \varphi_{\bar{\omega}})$ 与 $w_y = U_C\sin(\beta_C - \varphi_{\bar{\omega}})$。其中,$(w_x, w_y)$ 受 (V_x, V_y) 的影响。$\beta_r = \operatorname{atan2}(v_r, u_r)$ 为侧滑角,它满足如下假设。

假设 3: 当 (w_x, w_y) 有界时,β_r 和 g_β 有界。必定存在正的常数 C_w、C_β、β_r^* 和 g_β^*,使得 $|\beta_r| \leqslant \beta_r^*$,$|g_\beta| \leqslant g_\beta^*$,$|\dot{\beta}_r| \leqslant C_\beta$,$\|\dot{w}\| \leqslant C_w$ 成立。

为了放松对侧滑的约束,令 $g_\beta = \tan(\beta_r)$。它的微分为 $\dot{g}_\beta = 1 + \tan^2(\beta_r) = 1 + g_\beta^2$。接下来得到:

$$\dot{y}_e = u_r\sin(\psi - \varphi_{\bar{\omega}}) + u_r\cos(\psi - \varphi_{\bar{\omega}})g_\beta - \dot{\varphi}_{\bar{\omega}}x_e + w_y \tag{10}$$

2.2　基于障碍的自适应积分制导律

在实际情况中,受到风、洋流和模型不确定性的影响,β_r 是难以测量的。因此,在干扰条件下,准确预测 g_β 对于机器鱼精确跟踪参考路径具有重要意义的。未来解决这个问题,本工作引入虚拟控制输入 α_1,设计一种基于障碍的自适应积分制导律。同时,通过神经网络方法逼近系统的不可测变量,以补偿参考偏航角 ψ_d,提高了机器人的抗干扰能力。

在方案中,定义 $\hat{g}_\beta$、$\hat{w}_x$ 和 $\hat{w}_y$ 分别为不可测干扰变量 g_β、w_x 和 w_y 的逼近值。它们的误差分别为 $\tilde{g}_\beta = g_\beta - \hat{g}_\beta$、$\tilde{w}_x = w_x - \hat{w}_x$ 和 $\tilde{w}_y = w_y - \hat{w}_y$。定义 $\hat{\boldsymbol{w}} = [\hat{w}_x, \hat{w}_y]^{\mathrm{T}}$。

设计的基于障碍的自适应积分制导律公式(11)、输入量 α_1 和路径参数更新律公式(12)如下:

$$\begin{cases} \psi_d = \varphi_{\bar{\omega}} + \arctan\left(-\dfrac{y_e + \alpha_1}{\Delta} - \hat{g}_\beta\right) \\ \dot{\hat{g}}_\beta = k_\beta\left(\left(1 + \dfrac{1}{k_y^2 - y_e^2}\right)\left(\dfrac{y_e u_r \Delta}{\sqrt{\Omega^2 + \Delta^2}}\right) - \hat{g}_\beta\right) \\ \alpha_1 = \dfrac{\left(\dfrac{\hat{w}_y}{u_r}\right)^2(y_e + \Delta\hat{g}_\beta) + \left(\dfrac{\hat{w}_y}{u_r}\right)\sqrt{(y_e + \Delta\hat{g}_\beta)^2 + \Delta^2\left(1 - \left(\dfrac{\hat{w}_y}{u_r}\right)^2\right)}}{1 - \left(\dfrac{\hat{w}_y}{u_r}\right)^2} \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{\omega}} = \dfrac{u_r\cos(\psi - \varphi_{\bar{\omega}}) - v_r\sin(\psi - \varphi_{\bar{\omega}}) + \left(\dfrac{1 + \dfrac{1}{k_b^2 - x_e^2}}{1 + \dfrac{1}{k_y^2 - y_e^2}} - 1\right)\dot{\varphi}_{\bar{\omega}}y_e + \hat{w}_x + k_x x_e\left(1 - \dfrac{1}{k_b^2} + \dfrac{1}{k_b^2 - x_e^2}\right)}{\sqrt{\dot{x}_P^2 + \dot{y}_P^2}} \\ \dot{\hat{w}} = k_w\left(\begin{bmatrix} \left(1 + \dfrac{1}{k_b^2 - x_e^2}\right)x_e \\ \left(1 + \dfrac{1}{k_y^2 - y_e^2}\right)y_e \end{bmatrix} - \hat{\boldsymbol{w}}\right), \end{cases} \tag{12}$$

其中,$\Omega = y_e + \alpha_1 + \Delta\hat{g}_\beta$。$\Delta$ 为机器鱼的前向距离,考虑到机器鱼的收敛速度、起始位置和参考轨迹,并设计参数$(k_w, k_b, k_\beta, k_x, k_y)$为均正的常数增益且 $k_b > 0$,$k_w > 0$,$k_\beta > 0$,$k_y > 2$,$k_x > 1$。另外,所设计的参数与误差积分项并无直接联系。值得注意的是,与文献[31]不同,所提制导策略通过补偿未知侧滑角,放松了对侧滑的约束,避免了侧滑极小的传统假设。

2.3　稳定性分析

定理 1: 考虑运动学系统公式(1)、基于障碍的自适应积分制导律公式(11)、路径参数更新律公式(12),在具有风、洋流和模型不确定性的影响条件下,面临有界的 w、x_e 和 y_e 可以收敛到误差有效范围。

证明 1: 为了将机器鱼的跟踪误差约束在规定范围内,本工作设计位置误差的对称型障碍李雅普诺夫候选函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2}\ln\frac{\mathrm{e}^{x_e^2}}{1 - \dfrac{1}{k_b^2}x_e^2} + \frac{1}{2}\ln\frac{\mathrm{e}^{y_e^2}}{1 - \dfrac{1}{k_y^2}y_e^2} + \frac{1}{2k_w}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \frac{1}{2k_\beta}\tilde{g}_\beta^{\,2} \tag{13}$$

$$\dot{V}_1 = x_e\left(1 + \frac{1}{k_b^2 - x_e^2}\right)\dot{x}_e + y_e\left(1 + \frac{1}{k_b^2 - y_e^2}\right)\dot{y}_e + \frac{1}{k_w}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{w}} + \frac{1}{k_\beta}\tilde{g}_\beta\dot{\tilde{g}}_\beta \tag{14}$$

备注 1：误差约束满足 $|x_e| \leqslant k_b$ 和 $|y_e| \leqslant k_y$。当误差值越过边界时，V_1 将趋近无穷大。因此，只要误差值约束在边界的范围内，就可以保证位置误差有界。在这个过程中，边界越小，机器鱼的收敛速度越快。换句话说，当边界 $(k_b, k_y) \to \infty$ 时，障碍李雅普诺夫理论与传统形式相同。而在现实应用场景中，所遭受的外部干扰包括风、强雨和障碍物等外部干扰，将导致机器鱼的误差增大，但是对误差约束参数进行调节能起到误差缩小的作用，但是误差不会快速趋于零。

备注 2：对于引入的虚拟输入的目的是为了中和外部干扰；虚拟控制输入相当于一个微型控制器一样进行控制和补偿作用，因此虚拟输入在现实应用中具有一定的可行性，并且在目前的水域检测领域中具有相对应的应用场景。

根据三角关系，可以得到：

$$\begin{cases} \sin(\psi-\varphi_{\bar{\omega}}) = \sin\left(\arctan\left(-\dfrac{y_e+\alpha_1}{\Delta}-\hat{g}_\beta\right)+\psi_e\right) = - \\ \dfrac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\cos\psi_e + \dfrac{\Delta}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\sin\psi_e \\ \cos(\psi-\varphi_{\bar{\omega}}) = \cos\left(\arctan\left(-\dfrac{y_e+\alpha_1}{\Delta}-\hat{g}_\beta\right)+\psi_e\right) = \\ \dfrac{\Delta}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\cos\psi_e + \dfrac{\Omega}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\sin\psi_e \end{cases} \tag{15}$$

式中：$\psi_e = \psi - \psi_d$ 为偏航角误差。

将式(15)代入式(10)，可以得到：

$$\dot{y}_e = u_r\phi\psi_e u_r + \frac{\Omega + \Delta g_\beta}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}} - \dot{\psi}_F x_e + w_y \tag{16}$$

式中：$\phi = \dfrac{(1-\cos\psi_e)(\Omega+\Delta g_\beta) + (\Delta + g_\beta\Omega\sin\psi_e)}{\psi_e\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}$。

将式(16)、(9)~(12)代入式(14)，得到 $\dot{V}_1$ 的另一种形式：

$$\dot{V}_1 = -k_x x_e^2\left(1-\frac{1}{k_b^2}+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right)\left(1+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right) - \frac{{y_e}^2 u_r}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right) + \frac{y_e u_r \Delta\tilde{g}_\beta}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right) + y_e u_r\psi_e\phi\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right) + \frac{1}{k_w}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{w}} + \tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} - \tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \frac{1}{k_\beta}\tilde{g}_\beta\dot{g}_\beta + \tilde{g}_\beta g_\beta - \tilde{g}_\beta^2 \tag{17}$$

根据杨氏不等式[22]，可以得到：

$$-k_x x_e^2\left(1-\frac{1}{k_b^2}+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right)\left(1+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right) \leqslant 0 \tag{18}$$

$$\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} \leqslant \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w} \leqslant \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \frac{1}{2}U_{C,\max}^2 \tag{19}$$

$$\begin{cases} \tilde{g}_\beta g_\beta \leqslant \dfrac{1}{2}\tilde{g}_\beta^2 + \dfrac{1}{2}g_\beta^{*2} \\ \dfrac{1}{k_\beta}\tilde{g}_\beta\dot{g}_\beta \leqslant \dfrac{1}{2k_\beta}\tilde{g}_\beta^2 + \dfrac{1}{2k_\beta}C_\beta^2 \\ \dfrac{1}{k_w}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{w}} \leqslant \dfrac{1}{2k_w}\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \dfrac{1}{2k_w}C_w^2 \end{cases} \tag{20}$$

将式(18)~(20)代入式(17)，可以得到：

$$\dot{V}_1 \leqslant -k_x x_e^2\left(1-\frac{1}{k_b^2}+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right) - \frac{{y_e}^2 u_r}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right) - \left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_\beta}\right)\tilde{g}_\beta^2 + y_e u_r\psi_e\phi\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right) - \left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_w}\right)\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}} + \frac{1}{2}U_{\max}^2 + \frac{1}{2k_\beta}C_\beta^2 + \frac{1}{2k_w}C_w^2 + \frac{1}{2}g_\beta^{*2} + \frac{1}{2}U_{C,\max}^2 \tag{21}$$

根据式(21)，V_1 将保持最终一致有界的状态。由于 $(x_e, y_e, \tilde{\boldsymbol{w}}, \tilde{g}_\beta)$ 是有界的。因此，所设计的基于障碍的自适应积分制导律有效地抑制了机器鱼运动侧滑角，并通过对参考偏航角的补偿，提高了机器人的抗干扰能力，保证了机体在路径跟随中的稳态性能。

3 动力学控制设计

本节通过神经网络技术对未知项 $f_i(\cdot), \boldsymbol{i} = \boldsymbol{r}, \boldsymbol{u}$ 进行在线逼近。通过逼近误差 $\varepsilon_i, \boldsymbol{i} = \boldsymbol{r}, \boldsymbol{u}$ 和外部时变扰动 d_i，$\boldsymbol{i} = \boldsymbol{r}, \boldsymbol{u}$ 补偿了系统的速度输入量，提高机器鱼对 ψ_d 和期望前向速度 u_{rd} 的跟踪精度。

3.1 偏航角和浪涌自适应控制器

在这一部分，设计机器鱼的偏航和浪涌自适应控制器。通过神经网络函数拟合模型的不确定项和水流扰动，并用它们的逼近值补偿系统的控制输入。

对机器鱼的偏航跟踪误差求微分，得到：

$$\dot{\psi}_e = r - \dot{\psi}_d \tag{22}$$

引入虚拟控制量 α_r 为：

$$\alpha_r = -k_\psi\psi_e + \dot{\psi}_d \tag{23}$$

定义偏航角和浪涌速度误差为：

$$\begin{cases} r_e = r - \alpha_r \\ u_{re} = u_r - u_{rd} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} \dot{r}_e = f_r(\cdot) + \tau_r - \dot{\alpha}_r \\ \dot{u}_{re} = f_u(\cdot) + \tau_u - \dot{u}_{rd} \end{cases} \tag{25}$$

式中：$f_r(\cdot) = \dfrac{(m_{22}v_r + m_{23}r)r}{m_{11}} - \dfrac{d_{11}}{m_{11}}u_r + d_r$ 和

$f_u(\cdot) = \dfrac{m_{23}d_{22} - m_{22}(d_{32} + (m_{22}-m_{11})u_r)}{m_{22}m_{33} - m_{23}^2}v_r + \dfrac{m_{23}(d_{23}+m_{11}u_r) - m_{22}(d_{33}+m_{23}u_r)}{m_{22}m_{33} - m_{23}^2}r + d_u$ 为机体模型的非线

性不确定项。因此,应用径向基神经网络重构 $f_i(\cdot)$。根据引理 1,不确定项 $f_i(\cdot)$ 可以写成:

$$f_i(\cdot)=\boldsymbol{w}_i^{*\mathrm{T}}s(i)+\varepsilon_i,\ \boldsymbol{i}=\boldsymbol{u},\boldsymbol{r} \tag{26}$$

式中:ε_i 为逼近误差,$\boldsymbol{s}(i)=[s_1(i),\cdots,s_l(i)]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{i}=\boldsymbol{u},\boldsymbol{r}$ 是径向基向量。$\boldsymbol{w}_i^*=[w_{i,1}{}^*,\cdots,w_{i,l}{}^*]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{i}=\boldsymbol{u},\boldsymbol{r}$ 为最优权向量,$l>1$ 为网络节点数。类似的,$\boldsymbol{w}_i^*$ 满足 $\|\boldsymbol{w}_i^*\|\leqslant w_{i,I}$ 与 $w_{i,I}>0$ 为常数。定义 $f_i(\cdot)$ 的逼近值 $\hat{f}_i(\cdot)=\boldsymbol{w}_i^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(i)$。

将式(26)代入式(25)可得:

$$\begin{cases}\dot{r}_e=\boldsymbol{w}_r^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(r)+\varepsilon_r+\tau_r-\dot{\alpha}_r\\ \dot{u}_{re}=\boldsymbol{w}_u^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(u)+\varepsilon_u+\tau_u-\dot{u}_{rd}\end{cases} \tag{27}$$

为了在线更新网络参数,考虑如下的偏航角和浪涌速度跟踪逼近器,并设计控制律为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{r}}=\tau_r+\hat{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(r)-(k_r+\mu_1)\tilde{r}\\ \dot{\hat{u}}_r=\tau_u+\hat{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(u)-(k_u+\mu_2)\tilde{u}_r\end{cases} \tag{28}$$

式中:$\tilde{r}=\hat{r}-r$ 和 $\tilde{u}_r=\hat{u}_r-u_r$ 为偏航角和浪涌速度逼近误差。$\mu_1>0$ 和 $\mu_2>0$ 为常数。$\hat{w}_i$ 是 $\boldsymbol{w}_i^*$ 的更新律为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{w}}_r=-\Gamma_1[\tilde{r}s(r)+\sigma_1\hat{w}_r]\\ \dot{\hat{w}}_u=-\Gamma_2[(\tilde{u}_r s(u)+\sigma_2\hat{w}_u],\end{cases} \tag{29}$$

式中:Γ_1 和 Γ_2 为设计的正常数,$\sigma_1>0$ 和 $\sigma_2>0$ 为常数。逼近误差 $\tilde{r}$ 和 $\tilde{u}$ 可以代替 r_e 和 u_{re} 来更新网络参数,以提高系统的暂态性能。设计的控制器为:

$$\begin{cases}\tau_r=-k_r\hat{r}_e+\dot{\alpha}_r-\hat{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(r)-\psi_e\\ \tau_u=-k_u\hat{u}_{re}+\dot{u}_{rd}-\hat{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(u)\end{cases} \tag{30}$$

式中:$\hat{r}_e=\hat{r}-\alpha_r$,$\hat{u}_{re}=\hat{u}_r-u_{rd}$。$k_r>0$ 和 $k_u>0$ 为常数。将式(3)和(25)代入式(22)可得:

$$\dot{\psi}_e=-k_\psi\psi_e+\hat{r}_e-\tilde{r} \tag{31}$$

对 $\hat{r}_e$ 和 $\hat{u}_{re}$ 求微分后,结合式(28)可得:

$$\begin{cases}\dot{\hat{r}}_e=\tau_r+\hat{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(r)-(k_r+\mu_1)\tilde{r}-\dot{\alpha}_r\\ \dot{\hat{u}}_{re}=\tau_u+\hat{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(u)-(k_u+\mu_2)\tilde{u}_r-\dot{u}_{rd}\end{cases} \tag{32}$$

对 $\tilde{r}$ 和 $\tilde{u}_r$ 进行微分后, 结合式(30)和(35)可得:

$$\begin{cases}\dot{\tilde{r}}=\hat{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(r)-(k_r+\mu_1)\tilde{r}-\varepsilon_r\\ \dot{\tilde{u}}_r=\hat{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}(u)-(k_u+\mu_2)\tilde{u}_r-\varepsilon_u\end{cases} \tag{33}$$

3.2 稳定性分析

定理 2:在假设 1 和 2 的情况下,针对未知动态和外部干扰下欠驱动机器鱼的跟踪控制问题,在中间控制函数公式(24)、自适应律公式(29)以及控制律公式(30)作用下,机器人误差可快速收敛至稳定界限内,闭环轨迹跟踪控制系统的所有信号都是有界的。通过选择合适的设计参数 ($k_x,k_\beta,k_w,k_\psi,k_r,k_u,\mu_1,\sigma_1,\mu_2,\sigma_2$),可以使所设计的误差变量 $\tilde{g}_\beta$、$\tilde{w}$、$\tilde{r}$、$\tilde{u}_r$ 和 ψ_e 保持最终一致有界。

证明 2:设计李雅普诺夫候选函数为:

$$V_2=\frac{1}{2}\psi_e^2+\frac{1}{2}\hat{r}_e^2+\frac{1}{2}\tilde{r}^2+\frac{1}{2\Gamma_1}\tilde{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}_r \tag{34}$$

对式(34)求微分后代入式(29)~(33)可得:

$$\dot{V}_2=-k_\psi\psi_e^2-\psi_e\tilde{r}-k_r\hat{r}_e^2-(k_r+\mu_1)\hat{r}_e\tilde{r}-(k_r+\mu_1)\tilde{r}^2-\tilde{r}\varepsilon_r-\sigma_1\tilde{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{w}}_r \tag{35}$$

根据杨氏不等式[22],可得到如下结论:

$$\begin{cases}-\psi_e\tilde{r}\leqslant\frac{1}{2}\tilde{r}^2+\frac{1}{2}\psi_e^2\\ \sigma_1\tilde{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{w}}_r\leqslant-\frac{1}{2}\sigma_1\tilde{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}_r+\frac{1}{2}\sigma_1 w_{r,I}^2\\ \tilde{r}\varepsilon_r\leqslant\frac{1}{2}\tilde{r}^2+\frac{1}{2}\tilde{\varepsilon}_r^2\leqslant\frac{1}{2}\tilde{r}^2+\frac{1}{2}\tilde{\varepsilon}_{rm}^2\end{cases} \tag{36}$$

式中:$\tilde{\varepsilon}_{rm}>0$ 是一个常数,它满足 $|\varepsilon_r|\leqslant\tilde{\varepsilon}_{rm}$。

将式(36)代入式(35),可得 $\dot{V}_2$ 的另一种形式:

$$\dot{V}_2\leqslant-\left(k_\psi-\frac{1}{2}\right)\psi_e^2-k_r\hat{r}_e^2-(k_r+\mu_1)\tilde{r}^2-\frac{1}{2}\varepsilon_{rm}^2-\frac{1}{2}\sigma_1\tilde{w}_r^{\mathrm{T}}\tilde{w}_r+\frac{1}{2}\sigma_1 w_{r,I}^2 \tag{37}$$

设计李雅普诺夫候选函数 V_3 为:

$$V_3=\frac{1}{2}\hat{u}_{re}^2+\frac{1}{2}\tilde{u}_r^2+\frac{1}{2\Gamma_2}\tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{W}}_u \tag{38}$$

$$\dot{V}_3\leqslant-k_u\hat{u}_{re}^2-\mu_2\tilde{u}_r\hat{u}_{re}-(k_u+\mu_2)\tilde{u}_r^2-\tilde{u}_r\varepsilon_u-\tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\sigma_2\hat{\boldsymbol{w}}_u \tag{39}$$

根据杨氏不等式[22],可得到如下结论:

$$\begin{cases}\hat{u}_{re}\tilde{u}_r\leqslant\frac{1}{2}\tilde{u}_r^2+\frac{1}{2}\hat{u}_{re}^2\\ \tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{w}}_u\leqslant\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}_u+\frac{1}{2}w_{u,I}^2\\ \tilde{u}_r\varepsilon_u\leqslant\frac{1}{2}\tilde{u}_r^2+\frac{1}{2}\varepsilon_u^2\leqslant\frac{1}{2}\tilde{u}_r^2+\frac{1}{2}\varepsilon_{um}^2\end{cases} \tag{40}$$

式中 :$\tilde{\varepsilon}_{um}>0$ 是一个常数,它满足 $|\varepsilon_u|\leqslant\tilde{\varepsilon}_{um}$。

将式(40)代入式(39),可得 $\dot{V}_3$ 的另一种形式。

$$\dot{V}_3\leqslant-\left(k_u-\frac{\mu_2}{2}-1\right)\hat{u}_{re}^2-\left(k_u+\frac{1}{2}\mu_2+\frac{1}{2}\right)\tilde{u}_r^2+\frac{1}{2}\varepsilon_{um}^2-\frac{\sigma_2}{2}(\tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}_u+w_{u,I}^2) \tag{41}$$

这样,系统的李雅普诺夫函数为:

$$V=V_1+V_2+V_3 \tag{42}$$

对 V 求微分,之后,结合式(21)、(37)和(41)可得:

$$\dot{V}\leqslant-k_x x_e^2\left(1-\frac{1}{k_b^2}+\frac{1}{k_b^2-x_e^2}\right)-\frac{ye^2u_r}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}}\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right)-\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_\beta}\right)\tilde{g}_\beta^2-\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_w}\right)\tilde{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}-\left(k_\psi-\frac{1}{2}\right)\psi_e^2-$$

$$k_r\hat{r}_e^2-(k_r+\mu_1)\tilde{r}^2-\frac{1}{2}\sigma_1\tilde{\boldsymbol{w}}_r^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{w}}_r-\frac{1}{2}\varepsilon_{rm}^2-\left(k_u-\frac{\mu_2}{2}-1\right)\hat{u}_{re}^2-\left(k_u+\frac{1}{2}\mu_2+\frac{1}{2}\right)\tilde{u}_r^2-\frac{\sigma_2}{2}(\tilde{\boldsymbol{w}}_u^{\mathrm{T}}\tilde{w}_u+w_{u,l}^2)+y_eu_r\varphi\psi_e\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_\beta C_\beta^2}+\frac{1}{k_w}C_w^2+g_\beta^{*2}+U_{C,\max}^2+\sigma_1 w_{r,l}^2+\varepsilon_{um}^2+U_{\max}^2\right)\leqslant -2\rho V+C \tag{43}$$

式中: $\rho=\min\left\{k_x,\frac{y_e{}^2}{\sqrt{\Omega^2+\Delta^2}},\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_\beta}\right),\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{2k_w}\right),\left(k_\psi-\frac{1}{2}\right),k_r,\mu_1,\frac{\sigma_1}{2},\frac{\sigma_2}{2},\left(k_u-\frac{\mu_2}{2}-1\right),\left(k_u+\frac{1}{2}\mu_2+\frac{1}{2}\right)\right\}$,

$C=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_\beta}C_\beta^2+\frac{1}{k_w}C_w^2+g_\beta^{*2}+U_{C,\max}^2+\sigma_1 w_{r,l}^2+\varepsilon_{um}^2+U_{\max}^2\right)-\frac{1}{2}\varepsilon_{rm}^2+y_eu_r\phi\psi_e\left(1+\frac{1}{k_b^2-y_e^2}\right)$。

对式(43)求解可得:

$$0\leqslant V\leqslant\frac{C}{2\rho}+\left[V(0)-\frac{C}{2\rho}\right]\mathrm{e}^{-2\rho t} \tag{44}$$

变量 y_e、$\hat{g}_\beta$、x_e、ψ_e、$\hat{u}_{re}$、$\tilde{\boldsymbol{w}}_u$ 和 $\tilde{\boldsymbol{w}}_r$ 是有界的,可以得出位置闭环系统中的所有信号是一致最终有界的[22]。此外,误差界与控制参数 k_x、k_β、k_w、k_ψ、k_r、μ_1、σ_1、k_u、μ_2 和 σ_2 有关。通过选取合适参数值,可以使 $\tilde{g}_\beta$、$\hat{r}_e$、$\tilde{w}$、$\tilde{r}$、$\tilde{u}_r$、$\hat{u}_{re}$ 和 ψ_e 等误差变量的邻域界任意小,以此来保证机器鱼的位置跟踪性能。

备注 3: 整个系统的控制流程如图 2 所示。机器鱼根据设计的基于障碍的自适应积分制导律和扰动逼近方案得到 ψ_d;神经网络动态拟合模型的不确定项 $f_i(\cdot)$,对系统的速度输入量(τ_r,τ_u) 进行补偿。

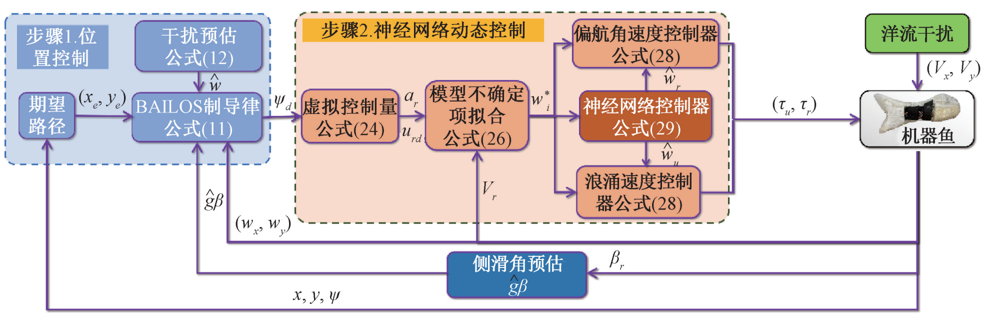


图 2 控制流程

Fig. 2 Control flowchart

4 模拟结果

在这一部分,本工作通过仿真来模拟所设计方案相比于当前技术具有更有效的误差收敛速度与精度。当前的经典手段包括经典制导律[22]和障碍自适应制导律[26]。本方案定义闭环控制系统的参数如表 1 所示。

表 1 参数值

Table 1 Parameter values

名称	m_{11}	m_{22}	m_{33}	m_{23}	m_{32}	d_{11}	d_{22}	d_{33}	d_{23}	d_{32}	k_s	Δ	k_β	k_w
值	25.8	33.8	2.76	2.76	1.01	0.93	2.89	0.5	−0.26	−0.26	10	2	6	1.5
名称	k_ψ	k_r	k_y	k_b	k_u	μ_1	μ_2	Γ_1	Γ_2	$x(0)$	$y(0)$	$\psi(0)$	σ_1	σ_2
值	2	8	3	2	12	1	1	10^4	10^6	0	1	0	10^{-13}	10^{-13}

4.1 路径跟随

针对仿生鱼机器人在平面上的路径跟随的性能效果,参考轨迹为 $P_F(\bar{\omega})=\left[10\sin\left(\frac{\bar{\omega}}{10}\right)+\bar{\omega},\bar{\omega}\right]$,并且引入动力学中由风、浪和洋流引起的环境扰动分别为 $d_j=[0.1*\sin(0.5t+0.3\pi),0.01*\cos(0.5t+0.1\pi),0.1*\cos(0.5t+0.2\pi)]^{\mathrm{T}}$,并且其他条件的初始状态设置为 0。在本文中利用基于障碍李雅普诺夫函数的制导律的作用下,机器人稳定的跟随正弦轨迹,为了进一步验证障碍李雅普诺夫函数抑制误差的有效性和制导律中积分环节抗抖动的可靠性,本文还采用传统的制导方案以及基于障碍的自适应制导方案,如图 3 所示。

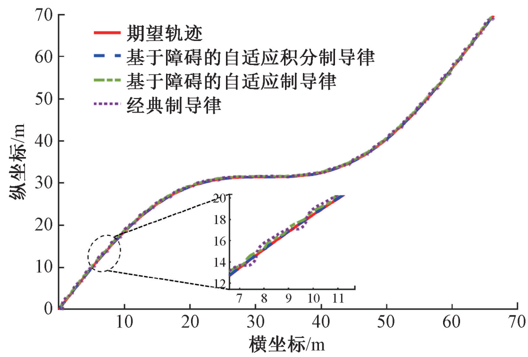
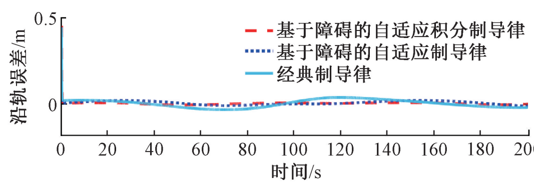


图 3　机器鱼的运动位置轨迹

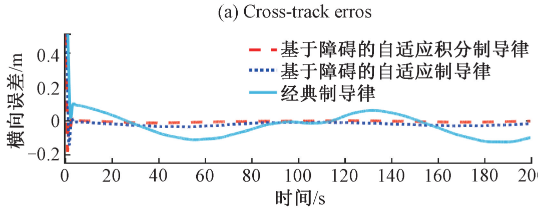
Fig. 3　Motion position trajectories of the robotic fish

如图 4 所示,对运动位置轨迹进行分解,得到机器鱼的 (x_e, y_e) 曲线。不带有障碍的经典制导策略无法处理由外部扰动所引起的周期性抖动。但是,具有障碍环节而不具有积分环节的制导律策略几乎是可以对外部干扰引起的抖动做出良好的调整。本文基于障碍李雅普诺夫的自适应积分制导律可以有效地抑制浪涌和摇摆误差在可控范围内。根据 (x_e, y_e) 的数据结果,定量分析机器鱼路径跟踪位置误差的收敛时间和精度,如表 2 所示,机器鱼的平均收敛速率提高了 14.57%。数据结果确定了本工作具有的良好效果。



(a) 沿轨误差

(a) Cross-track erros



(b) 横向误差

(b) Along-track erros

图 4　机器鱼的位置误差

Fig. 4　Position errors of the robotic fish

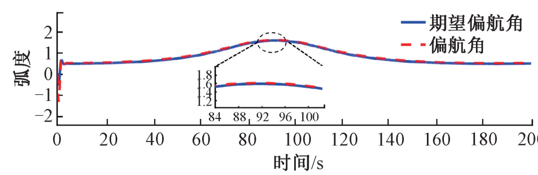
表 2　位置误差的收敛时间和精度

Table 2　Convergence time and accuracy of position errors

位置	经典制导律		障碍自适应制导律		障碍自适应积分制导律	
x_e (m & s)	0.017 4	27.32	−0.013 1	7.15	0.011 2	1.51
y_e (m & s)	−0.015 5	35.21	0.015 8	3.12	0.0153	2.21

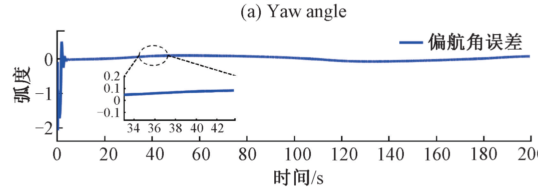
4.2　性能验证

针对仿生鱼机器人在路径跟随中的扰动和侧滑角补偿的性能指标,设置 $u_{rd}=0.6$ m/s, 设置运动学中的周期时变环境扰动分别为 $[V_x, V_y]^{\mathrm{T}} = \left[0.1\sin\left(\frac{t}{20}\right), 0.05\cos\left(\frac{t}{20}\right)\right]^{\mathrm{T}}$。如图 5 所示,系统在保证稳定的同时,在 4 s 后,快速达到可行误差范围内偏航角的期望大小。图 6 为仿生鱼机器人的偏航角速度、浪涌和摇摆速度。相比于经典制导律方法,自适应环节减少机器鱼跟踪误差的波动情况。因此,这里着重比较机器人在基于障碍的自适应积分制导律和基于障碍的自适应制导律方法下的 u_r、v_r 和 r。显而易见,不具有积分环节的基于障碍的自适应制导律在外部环境干扰的加持下,会有微小的抖动。



(a) 偏航角

(a) Yaw angle

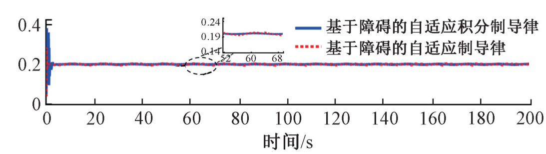


(b) 偏航角误差

(b) Yaw angle error

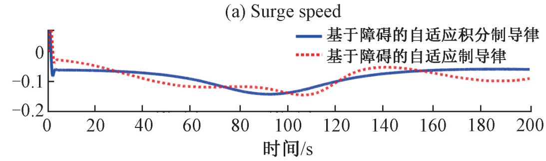
图 5　基于障碍的自适应积分制导律的偏航角误差

Fig. 5　Yaw angle error of the robotic fish



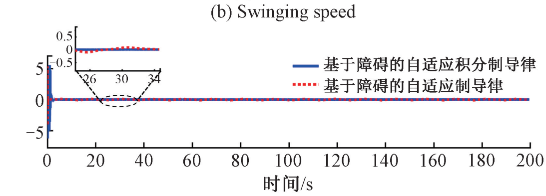
(a) 浪涌速度

(a) Surge speed



(b) 摇摆速度

(b) Swinging speed



(c) 偏航角速度

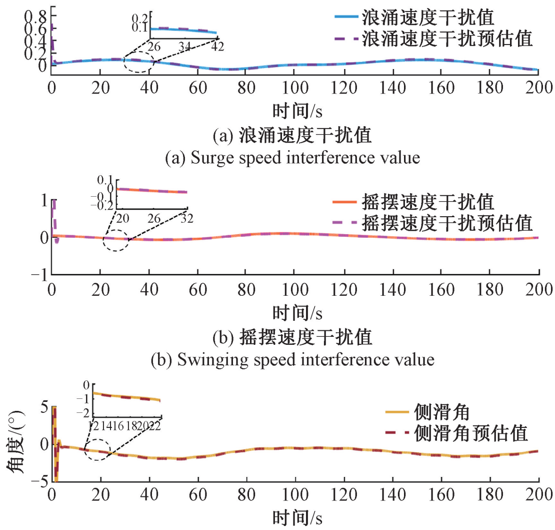
(c) Yaw angle speed

图 6　机器鱼的速度

Fig. 6　Speeds of the robotic fish

而基于障碍的自适应积分制导律对此干扰处理的比较完善,保证了系统的稳定性。

所提方法可以对机器鱼受到的 $[w_x, w_y]$ 和 g_β 进行逼近。逼近值 $[\hat{w}_x, \hat{w}_y, \hat{g}_\beta]$ 在 5 s 内快速收敛,进一步验证提出的自适应积分制导律中的抗抖动的有效性以及侧滑补偿的时效性,如图 7 所示。



(a) 浪涌速度干扰值
(a) Surge speed interference value

(b) 摇摆速度干扰值
(b) Swinging speed interference value

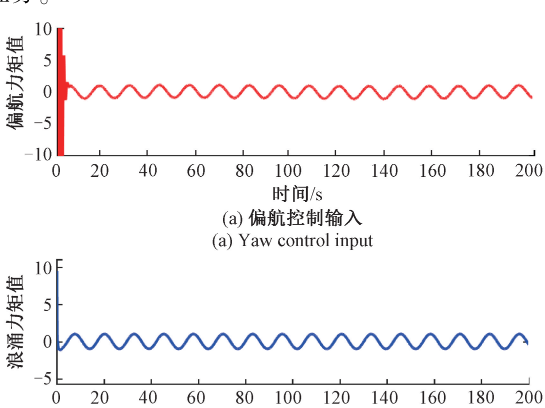
(c) 侧滑角及预估值
(c) Side slip angle and estimated value

图 7　干扰预估值

Fig. 7　Estimated values of the interferences

4.3　控制器指标验证

对控制器的自适应律进行可行性验证和处理系统中不确定变量的指标验证。本工作对比了基于障碍的自适应积分制导律与传统连续控制方案下机器鱼的 (τ_r, τ_u),如图 8 所示。所提方法的控制指令可以缓慢变化。该曲线具有很小的震颤,确保了机器鱼可以稳定且高效地完成任务。



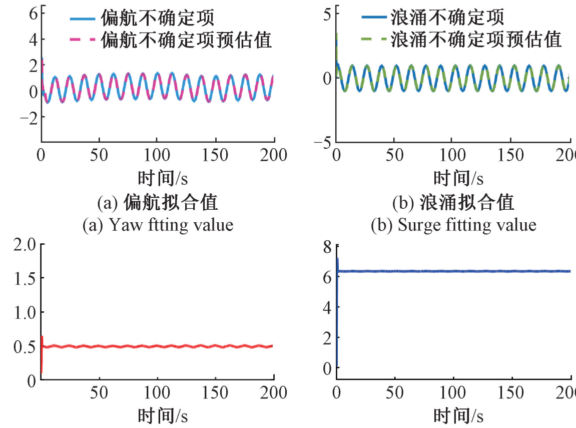
(a) 偏航控制输入
(a) Yaw control input

(b) 浪涌控制输入
(b) Surge control input

图 8　控制输入

Fig. 8　Control input

如图 9 所示,通过神经网络拟合了机器鱼模型的非线性不确定项 (f_r, f_u),并对这些变量进行逼近,逼近值 $(\hat{f}_r, \hat{f}_u)$ 在有限时间内快速收敛。并且,神经网络权重 $\|\hat{w}_u\|$ 和 $\|\hat{w}_r\|$ 是有界的,并且最终会趋于稳定的范围。



(a) 偏航拟合值
(a) Yaw ftting value

(b) 浪涌拟合值
(b) Surge fitting value

(c) 偏航权重值
(c) Yaw weight value

(d) 浪涌权重值
(d) Surge weight value

图 9　神经网络拟合的值与权重

Fig. 9　The values and weights of the neural network fitting

5　实验效果

在本研究中,通过机器鱼水下实验来验证提出算法的可行性和模拟的稳定性能。此外,精心设计了一系列实验来充分评估机器鱼的跟踪性能,并记录机器鱼在视野中的全局位置。在实验过程中,对比了所提出方案与已有的基于障碍的自适应制导律方法[26]在跟踪性能方面的差异。实验场景如图 10 所示,将机器鱼放置在水塘中,并定义参考路径为 $P_F(\bar{\omega}) = [1, \bar{\omega}]$,初始姿态设置为 0。同时,水流作为机器鱼抵抗的外界扰动。再现了一个近似的跟踪过程。

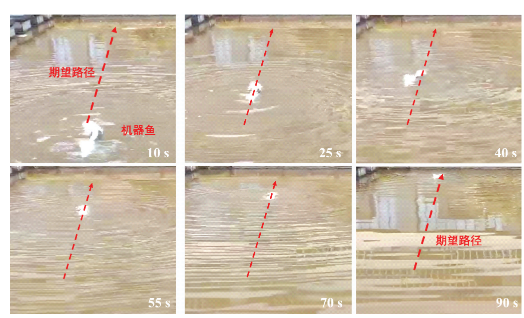


图 10　机器鱼路径跟踪实验

Fig. 10　Path-tracking Experiment

根据机器鱼的线性路径跟踪实验,得到了机器鱼的运动轨迹、位置误差、偏航角度误差。如图 11 所示,展示了所提基于障碍的自适应积分制导律方案的控制下,仿

生鱼机器人的轨迹跟踪效果,该方案显著减小了抖动和偏差的问题。这使得位置误差在机器人在线性前进时几乎是平稳的,进一步提高了跟踪的稳定性,如图 12 所示。同时,机体运动的侧滑角得到补偿以及偏航角误差也更加平稳,如图 13 所示。结果表明方案能够有效地抑制机器鱼的位置偏差和角度误差,使其在直线行驶过程中保持稳定,为提出的基于障碍的自适应积分制导律方案的优越性提供了有力的证据。

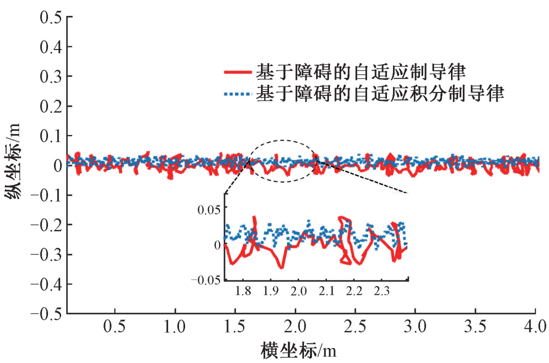
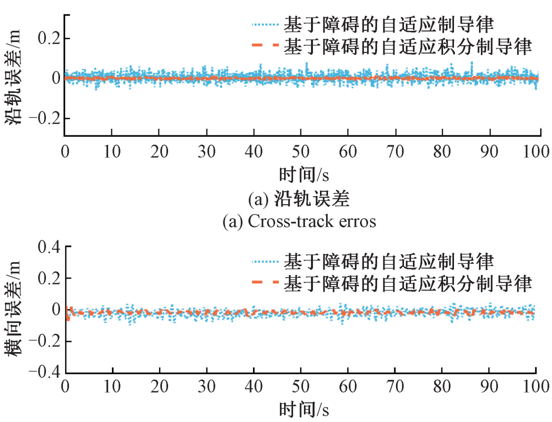


图 11　机器鱼的实验轨迹

Fig. 11　Experimental trajectories of the robotic fish



(a) 沿轨误差
(a) Cross-track erros

(b) 横向误差
(b) Along-track erros

图 12　机器鱼的实验位置误差

Fig. 12　Experimental position errors of the robotic fish

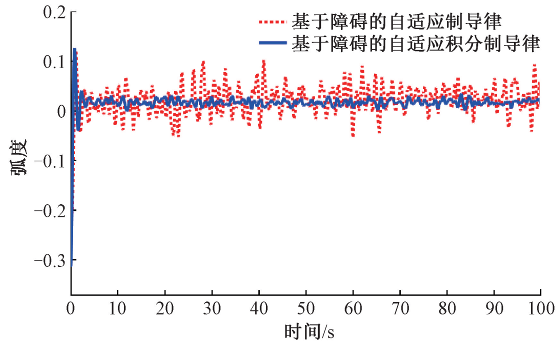
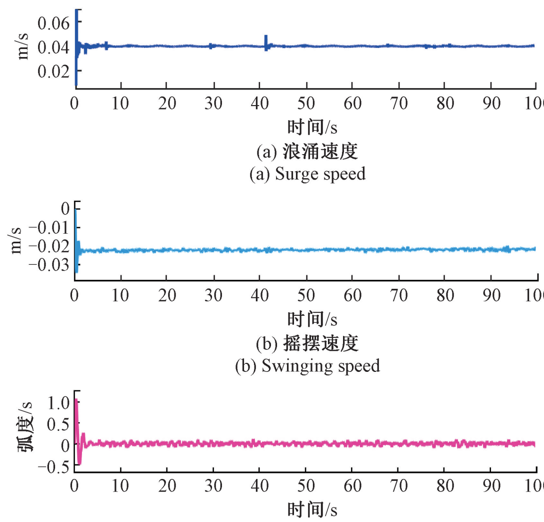


图 13　机器鱼的实验偏航角误差

Fig. 13　Experimental yaw angle errors of the robotic fish



(a) 浪涌速度
(a) Surge speed

(b) 摇摆速度
(b) Swinging speed

(c) 偏航角速度
(c) Yaw angle speed

图 14　机器鱼的实验速度

Fig. 14　Experimental speed of the robotic fish

根据机器鱼的运动情况,求解出基于障碍的自适应积分制导律控制下的浪涌速度,摇摆速度和偏航角速度曲线,如图 14 所示。本文方法使浪涌速度稳定在 0.04 m/s 处,并使机器人保持这个速度稳定跟踪运动。在这个过程中,速度存在一定波动,但是总体保持收敛和稳定。机器鱼的摆动与偏航和浪涌有关。因此,偏航角速度在稳态附近轻微摆动,而没有出现大幅振荡。

综上所述,在基于障碍的自适应积分制导律方法的控制下,机器鱼的路径跟踪误差的收敛速度和精度被提高,系统的抗干扰能力和运行速率被改善。样机实验与仿真效果类似。

6　结　　论

本研究提出了一种独特的机器鱼抗扰动路径跟踪控制方法,通过引入虚拟输入量和设计基于障碍的自适应积分制导律,来灵活地补偿参考偏航角,同时消除对侧滑角的限制,提供更加自由和准确的控制策略。此外,通过约束机器鱼的跟踪误差,使其保持在规定范围内,从而提高了控制系统的稳定性和精度。为了增强机器鱼的抗干扰性能,利用神经网络函数拟合的模型不确定项和水流扰动逼近值来补偿控制输入,进一步提高了系统的鲁棒性。通过模拟和实验验证,证明了所提出方法的卓越性能和误差稳态特性。未来,我们将进一步探索基于强化学习方法的智能避障-跟踪一体化技术,以应对复杂地形

环境中机器鱼的挑战,并为机器鱼技术的发展开辟新的研究方向。

参考文献

[1] 周敬淞,张军,肖毅,等. 基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 11-20.

ZHOU J S, ZHANG J, XIAO Y, et al. Design of search and rescue robot based on crab-like rigid-flexible coupling mechanism[J]. Chinese Journal of Instrument, 2023, 44(6):11-20.

[2] LI D F, ZHANG B X, XIU Y, et al. Snake robots play an important role in social services and military needs[J]. Innovation, 2022, 3(6): 100333.

[3] 张川,喻盈,黄晨华,等. 一种双关节舵机驱动的水质监测仿生机器鱼三维避障方法[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(6):43-48.

ZHANG CH, YU Y, HUANG CH H, et al. A three-dimensional obstacle avoidance method for water quality monitoring bionic robot fish driven by a double joint steering machine is presented[J]. Automation and Instrumentation, 2021, 36(6):43-48.

[4] ZHENG J, ZHANG T, WANG C, et al. Learning for attitude holding of a robotic fish: an end-to-end approach with sim-to-real transfer[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(2): 1287-1303.

[5] XU S, XU T, LI D, et al. A robot motion learning method using broad learning system verified by small-scale fish-like robot[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(9):6053-6065.

[6] QIU C, WU Z, WANG J, et al. Multiagent-reinforcement-learning-based stable path tracking control for a bionic robotic fish with reaction wheel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12670-12679.

[7] 王宇,杜艾芸,李亚鑫. 两栖六足仿生机器人的水陆运动控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11):274-282.

WANG Y, DU AI Y, LI Y X. Research on land and water motion control of amphibious hexapod bionic robot[J]. Chinese Journal of Instrument, 2022, 43(11):274-282.

[8] WANG H, MI C, CAO Z, et al. Precise discrete-time steering control for robotic fish based on data-assisted technique and super-twisting-like algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10587-10599.

[9] WU T Y T. Swimming of a waving plate[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1961, 10(3): 321-344.

[10] LIGHTHILL M. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1971,179(1055):125-138.

[11] LIGHTHILL M. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 44(2):265-301.

[12] 王洋,陈坤,袁亮. 尾鳍驱动仿生机器鱼的 CPG 控制[J]. 机械设计与制造, 2024(1):231-235.

WANG Y, CHEN K, YUAN L. The tail fin drives CPG control of the bionic robotic fish[J]. Machinery Design and Manufacture, 2024(1):231-235.

[13] YU J, YUAN J, WU Z, et al. Data-driven dynamic modeling for a swimming robotic fish[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5632-5640.

[14] 刘锦豪,宋晓茹. 一种仿生机器鱼的水平面路径跟踪控制研究[J]. 现代计算机, 2022, 28(23):60-64.

LIU J H, SONG X R, Research on horizontal path tracking and control of a bionic robotic fish[J]. Modern Computer, 2022, 28(23):60-64.

[15] LI D F, ZHANG Y, LI P, et al. Position errors and interference prediction-based trajectory tracking for snake robots[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(9):1810-1821.

[16] LI D F, ZENG L L, XIU Y, et al. Sideslip elimination and coefficient approximation-based trajectory tracking control for snake robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(8):8754-8764.

[17] BAL C, OZMEN K, KORKMAZ D, et al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a biomimetic robotic fish[J]. Ocean Engineering, 2019, 189:106334.

[18] 宋英杰,王刚,唐武生,等. 基于模糊自适应串级 PID 的机器鱼位姿控制[J]. 控制工程, 2023, 30(10): 1870-1880.

SONG Y J, WANG G, TANG W SH, et al. Robot fish pose control based on fuzzy adaptive cascade PID[J]. Control Engineering, 2023, 30(10):1870-1880.

[19] 李江浩. 基于滑模控制的水下机器人运动控制研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2023.

LI J H. Research on motion control of underwater vehicle based on sliding mode control[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.

[20] LIU Q, YE Z, WANG Y, et al. Research on active disturbance rejection control of multi-joint robot fish path tracking[C]. Chinese Intelligent Automation Conference, Zhanjiang, China, 2021.

[21] 李东方, 杨弘晟, 邓宏彬, 等. 蛇形机器人跟踪误差

预测的自适应轨迹跟踪控制器[J]. 仪器仪表学报, 2023 (11): 267-278.

LI D F, YANG H SH, DENG H B, et al. Adaptive trajectory tracking controller for tracking error prediction of snake robot[J]. Chinese Journal of Instrument, 2023 (11): 267-278.

[22] 王潋, 李烨, 陈霄, 等. 基于视线导引策略的无人艇航迹跟踪控制算法[J]. 兵工学报, 2022, 43(S2): 20.

WANG L, LI Y, CHEN X, et al. Track tracking control algorithm of unmanned craft based on line of sight guidance strategy [J]. Ordnance Engineering journal, 2022, 43(S2): 20.

[23] CAHARIJA W, PETTERSEN K, BIBULI M, et al. Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5):1623-1642.

[24] 王常顺, 肖海荣. 基于自抗扰控制的水面无人艇路径跟踪控制器[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 54-59.

WANG CH SH, XIAO H R. Path tracking controller for surface unmanned boat based on active disturbance rejection control [J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2016, 46(4): 54-59.

[25] FOSSEN T I. An adaptive line-of-sight (ALOS) guidance law for path following of aircraft and marine craft[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Early Access, 2023, DOI: 10.1109/TCST.2023.3259819.

[26] SU Y, WAN L, ZHANG D, et al. An improved adaptive integral line-of-sight guidance law for unmanned surface vehicles with uncertainties [J]. Applied Ocean Research, 2021, 108: 102488.

[27] YU C, XIANG X, WILSON P A, et al. Guidance-error-based robust fuzzy adaptive control for bottom following of a flight-style AUV with saturated actuator dynamics[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50 (5): 1887-1899.

[28] QIU C, WU Z, WANG J, et al. Multiagent-reinforcement-learning-based stable path tracking control for a bionic robotic fish with reaction wheel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12670-12679.

[29] PAN J, LIU J, YU J, Path-following control of an amphibious robotic fish using fuzzy-linear model predictive control approach [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2020:886-891.

[30] HU Y, YAN H, ZHANG H, et al. Robust adaptive fixed-time sliding-mode control for uncertain robotic systems with input saturation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(4):2636-2646.

[31] FOSSEN T, PETTERSEN K, GALEAZZI R. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2):820-827.

作者简介

李东方,2014 年于南京航空航天大学获得学士学位,2021 年于北京理工大学获得博士学位,现为福州大学讲师,主要研究方向为蛇形机器人的轨迹跟踪控制。

E-mail: lidongfang@ fzu. edu. cn

Li Dongfang received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2021. He is now a lecturer in Fuzhou University. His main research interest includes trajectory tracking control of snake robots.

黄捷(通信作者),2005 年于福州大学获得学士学位,2010 年于福州大学获得硕士学位,2015 年于北京理工大学获得博士学位,现为福州大学教授,主要研究方向为多智能体协同避障与路径规划控制。

E-mail: jie. huang@ fzu. edu. cn

Huang Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2005 and M. Sc. degree in 2010 both from Fuzhou University, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2015. He is now a professor in Fuzhou University. His main research interest includes multi-agent cooperative obstacle avoidance and path planning control.

宋爱国,1990 年于南京航天航空大学获得学士学位,1993 年于南京航天航空大学获得硕士学位,1996 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学仪器科学与工程学院教授,主要研究方向为触觉显示器、机器人触觉传感器和远程康复机器人。

E-mail: a. g. song@ seu. edu. cn

Song Aiguo received his B. Sc. degree in 1990 and M. Sc. degree in 1993 both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, and received his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. He is now a professor from College of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His main research interest includes haptic display, robot tactile sensor, and tele-rehabilitation robot.