

王懿偲,夏英凯,朱明,等.水产养殖机器鱼设计与三维路径跟踪控制[J].华中农业大学学报,2022,41(4):259-270.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.04.032

水产养殖机器鱼设计与三维路径跟踪控制

王懿偲,夏英凯,朱明,曾鑫,齐湘洪

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室/
农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉 430070

摘要 为方便监测水质与水下鱼群活动,本研究设计了一款面向全水域实时监测的水产养殖机器鱼,并搭建了机器鱼控制系统,开展了机器鱼三维路径跟踪控制研究。在 Serret-Frenet 坐标系下建立了机器鱼三维空间路径跟踪误差模型,并基于 LOS 制导律和李雅普诺夫理论设计了一种模糊滑模控制器,最后利用 Matlab 仿真对本研究提出的控制算法的有效性进行验证。仿真结果表明:所设计的控制器能使机器鱼在模型参数不确定性、外部干扰未知的情况下实现三维路径跟踪控制,其控制精度和鲁棒性明显优于常规 PID 与滑模控制器。

关键词 仿生机器鱼;三维路径跟踪;模糊滑模控制;运动控制;AUV;智能养殖装备;水下机器人
中图分类号 TP242; Q811; S951 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)04-0259-12

水下机器人作为水下工程装备中的一种,与传统水下作业模式相比,在作业环境与模式上均有着明显优势,对于提升水产养殖业的效率与品质有着重要意义^[1]。仿生机器鱼作为水下机器人一种,相对于传统自治水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)而言,其游动通过尾部摆动提供动力,具有更高的游动效率,同时仿生机器鱼游动时噪声小,最大程度上减小鱼群的应激反应,因此设计一款用于实时检测水质、监测鱼群状态的仿生机器鱼具有现实意义。为实现水产养殖作业精准化和智能化,机器鱼需要具有自主巡航与良好的路径跟踪控制能力。近年来,国内外学者针对仿生机器鱼路径跟踪控制方面开展了广泛的研究。宋晓茹等^[2]基于自抗扰技术(active disturbance rejection control, ADRC)实现机器鱼路径跟踪控制。李宗刚等^[3]基于中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)与模糊控制相结合以实现机器鱼的定深控制。Yu等^[4]基于滑模观测器(SMO)与视线制导律(line-of-sight, LOS)控制机器鱼运动,通过模糊控制调整机器鱼胸鳍攻角实现定深控制。Zou等^[5]基于神经网络的离散滑模控制方法,实现多条仿生机器鱼协同轨迹跟踪任务。Castano等^[6]基于平均动态模型,提出一种非线性模型预测控制方法使机器鱼在水平面内跟踪期望

路径。需要指出的是,上述研究成果都局限在二维平面内,若想实现全水域监测,则需要机器鱼能有效地跟踪三维空间曲线,而三维空间曲线的路径跟踪相对二维平面其欠驱动的自由度增加2个,控制问题更加复杂。

针对三维路径跟踪控制问题,相关学者在常见的水下机器人方向已经开展了大量的研究。Wang等^[7]通过反推法建立欠驱动AUV的运动学制导律,使AUV能够在外部扰动的情況下跟踪上期望路径。Wang等^[8]通过Serret-Frenet坐标系以及LOS法计算出所需偏航角,通过PID控制器对偏航角进行跟踪控制。Xu等^[9]针对模型不确定性和外部干扰下欠驱动AUV路径跟踪问题,通过适当地选择积分器的控制增益,使AUV能较为精确地跟踪期望路径。李泽宇等^[10]建立AUV路径跟踪导引律,基于RBF网络Q学习方法对滑模控制参数进行训练优化,提高AUV在不同航速及外扰动下的路径跟踪性能。然而,对于机器鱼而言,其主要依靠鱼尾摆动进行游动,相对于传统水下机器人而言,其模型更为复杂,机器鱼三维路径跟踪的研究成果相对较少。焦欧阳^[11]针对机器鱼目标跟踪,利用反推控制使水下机器人跟踪期望目标点,但反推控制依赖精确的数学模型^[12],同时过高的控制增益会导致系统产生严重

收稿日期:2021-12-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662020GXQD003);国家自然科学基金项目(52001132)

王懿偲,E-mail: 953909924@qq.com

通信作者:夏英凯,E-mail: ykxia@mail.hzau.edu.cn

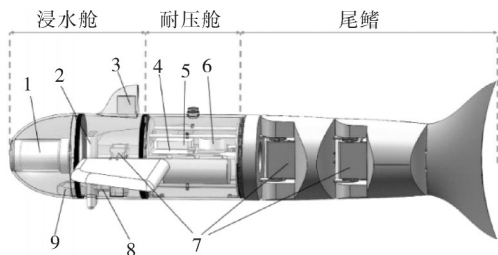
的抖振现象^[13]。Suebsaiprom等^[14]考虑到机器鱼在运动时类似于细长体AUV,基于李雅普诺夫稳定性理论与反步法的控制器,使机器鱼实现路径跟踪控制,但控制过程中容易产生抖振现象。Chen等^[15]为方便深海网箱检查,设计了一种二关节仿生机器鱼,并基于模糊PID与CPG实现机器鱼的三维螺旋路径跟踪控制,但模糊PID较为依赖经验进行调参。

针对上述问题,本研究设计了一款水产养殖机器鱼,为监测水质与水下鱼群状态起辅助作用,该机器鱼搭载了水质传感器与网络摄像头,具备水质监测与观测鱼群状态的功能,并完成了机器鱼控制系统的设计。针对存在不确定扰动和模型不确定性情况下机器鱼的三维路径跟踪控制问题,本研究在Serret-Frenet坐标系下建立了机器鱼三维空间路径跟踪误差数学模型,基于LOS^[16]与李雅普诺夫理论设计一种模糊滑模控制器,并对该控制算法进行对比仿真验证,旨在为机器鱼水下精准作业实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 仿生机器鱼总体结构

水产养殖机器鱼主要由浸水舱、耐压舱、尾鳍摆动装置构成,其结构如图1所示,外壳使用尼龙材料通过3D打印技术成形,其总长约为1 000 mm,直径185 mm,质量约为13.1 kg,在水中为微正浮力状态。机器鱼的浸水舱与尾鳍完全浸入水中,搭载的摄像头、传感器和舵机都采用水密产品,其中位于艏部浸水舱中的水质传感器用于监测水质溶氧量、浊度与酸碱度参数,多普勒计程仪与深度传感器用于采集机器鱼位置信息,鱼鳍处安装WiFi模块与定位天线,



1. 水下摄像头 Underwater camera; 2. 水质传感器 Water quality sensor; 3. WiFi 模块、UWB 定位天线 WiFi module; 4. 电力载波 Power carrier; 5. 树莓派 Raspberry Pi; 6. 陀螺仪 Gyro; 7. 水下舵机 Underwater steering gear; 8. 深度传感器 Depth sensor; 9. 多普勒计程仪 Doppler log.

图1 水产养殖机器鱼三维结构图

Fig.1 Three-dimensional structure diagram of aquaculture robotic fish

并用密封胶将其密封,位于浸水舱中的水下舵机通过控制胸鳍摆动实现机器鱼上浮下潜。控制元器件位于耐压舱中,通过水密接插件实现与传感器、舵机之间数据传输,耐压舱两侧连接处装有密封圈以防止水进入舱内。安装在机器鱼尾部的2个水下舵机作为动力装置,输出不同的相位差可以实现机器鱼直线、转弯游动。

1.2 仿生机器鱼控制系统

为实现精准作业,本研究设计了如图2所示的仿生机器鱼控制系统硬件拓扑结构,该系统包括水上系统与水下系统。水下系统控制器采用树莓派,实现数据的整合与机器鱼的控制,当机器鱼位于水面游动时,UWB定位模块实时监测仿生机器鱼所处位置并通过通信系统将信息传输至水上系统。当机器鱼潜入水下游动时,UWB模块由于信号原因无法获取机器鱼位置信息,而水下机器人通常采用惯性导航系统获取位置信息,但由于其体积较大,不适用于本研究的机器鱼中。因此,本研究导航系统通过多普勒计程仪^[17]、深度传感器与陀螺仪采集机器鱼水下的游动速度与深度信息,并对速度积分可求出机器鱼位置信息。动力系统中采用2个水下舵机提供动力,位于浸水舱的水下舵机控制胸鳍角度调整。电源系统由24 V锂电池为系统各元件供电,并通过电压适配器为各元器件提供不同电压。感知系统用于收集水质信息与监测水下状态,并将搜集的水质信息传输至控制系统。通讯系统通过WiFi模块以及电力载波的形式实现信息的交互。上位机可实时显示当前水域水质信息以及水下环境,通过操纵按钮发出控制参数,控制鱼体运动。

本研究基于ROS开发平台设计仿生机器鱼软件^[18],其系统结构如图3所示。仿生机器鱼软件由感知、通信、决策和控制等4层组成。在感知层中通过相关传感器收集机器鱼位置信息,滤波后将信息传输至控制层与通信层,在通信层中通过WiFi模块和电力载波实现与上位机的数据交换。在决策层中,将确定仿生机器鱼的工作模式,并将控制指令传输至控制层。执行仿生机器鱼的运动控制算法和驱动控制在控制层中实现。

1.3 机器鱼数学模型

1) 仿生机器鱼模型。为实现仿生机器鱼路径跟踪,基于Serret-Frenet坐标系建立路径跟踪误差方程,坐标系及参数定义如图4所示,其中: $\{I\}$ 、 $\{B\}$ 和 $\{SF\}$ 分别为惯性参考坐标系、载体坐标系和Serret-

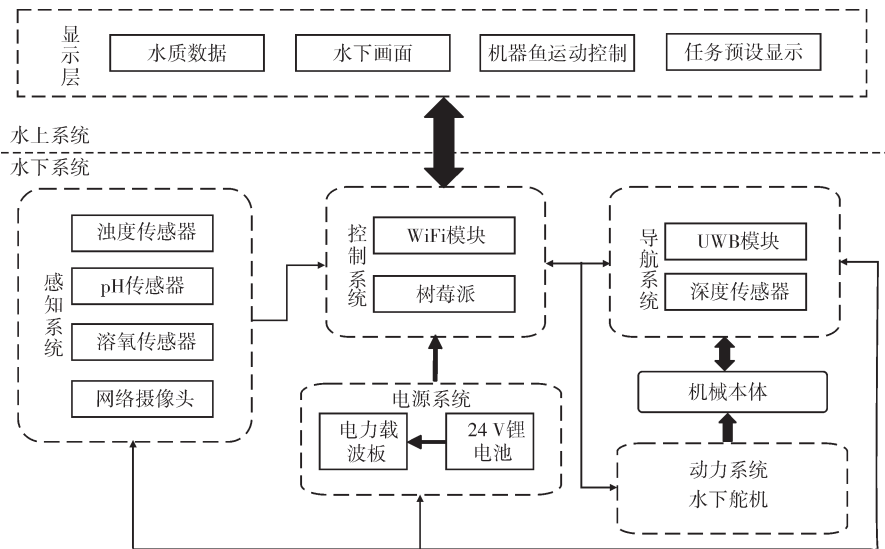


图2 水产养殖机器鱼控制系统结构框图

Fig.2 Block diagram of the control system of aquaculture robotic fish

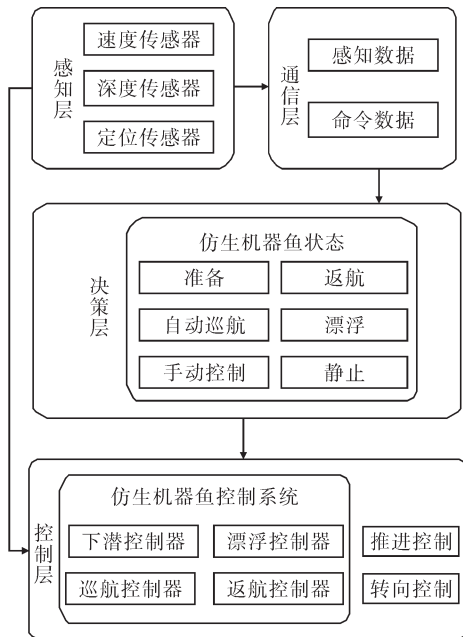


图3 水产养殖机器鱼软件系统结构框图

Fig.3 The structure diagram of the aquaculture robotic fish software system

Frene坐标系。 $\{B\}$ 坐标系的原点与仿生机器鱼质心重合,其 x_B 轴指向机器鱼艏部方向, y_B 指向右舷, z_B 轴与 x_B 轴和 y_B 轴构成右手坐标系; $\{SF\}$ 坐标系的原点为期望路径上的任意一点 P ,其轴由切向量 x_{SF} 、法向量 y_{SF} 和副法向量 z_{SF} 组成; s 为 P 点的横坐标, $c_1(s)$ 和 $c_2(s)$ 分别为路径的曲率和挠率。期望视线角(LOS)为 ψ_{los} 、 θ_{los} ;航向误差角为 ψ_e 、 θ_e ; Δ_y 、 Δ_z 为视线距离。

图4中, (x, y, z) 为 $\{I\}$ 坐标系下 O 点的坐标位

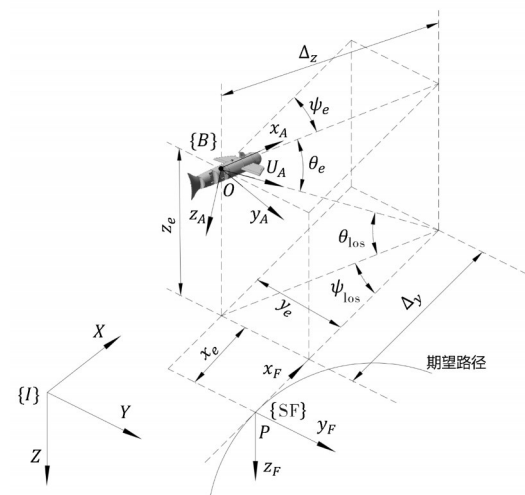


图4 空间路径跟踪控制坐标系

Fig.4 Space path tracking control coordinate system
置; (x_e, y_e, z_e) 为 $\{SF\}$ 坐标系下 P 点的位置; u, v, w, q 和 r 分别为机器鱼在 $\{B\}$ 坐标系下的纵向速度、横向速度、垂向速度、纵倾角速度及回转角速度;机器鱼的航向角与潜浮角分别为 $\psi_w = \psi + \beta$, $\theta_w = \theta + \alpha$; 其中, $\alpha = \arctan(w/u)$, $\beta = \arctan(v/\sqrt{u^2 + w^2})$ 分别为攻角与漂角;定义 $\{SF\}$ 坐标系相对于 $\{I\}$ 坐标系的姿态角为 $\theta_F = \arctan(-\dot{z}_F/\sqrt{\dot{x}_F^2 + \dot{y}_F^2})$ 和 $\phi_F = \arctan(\dot{y}_F/\dot{x}_F)$,并且有 $\dot{\phi}_F = c_1(s)\dot{s}$, $\dot{\theta}_F = c_2(s)\dot{s}$ 。

本研究的仿生机器鱼质量均匀分布,且为零浮力,忽略高于2阶非线性水动力阻尼项,不考虑横摇运动的影响,因此,水下机器人的5自由度运动学模

型^[19]和动力学模型^[20]如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \phi \cos \theta - v \sin \phi + w \cos \phi \sin \theta \\ \dot{y} = u \sin \phi \cos \theta + v \cos \phi + w \sin \phi \sin \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\phi} = r / \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}vr - m_{33}wq - d_{11}u + \tau_u}{m_{11}} + d_u \\ \dot{v} = \frac{-m_{11}ur - d_{22}v}{m_{22}} + d_v \\ \dot{w} = \frac{m_{11}uq - d_{33}w}{m_{33}} + d_w \\ \dot{q} = \frac{(m_{33} - m_{11})uw - d_{55}q - Gh \sin \theta + \tau_q}{m_{55}} + d_q \\ \dot{r} = \frac{(m_{11} - m_{22})uv - d_{66}r + \tau_r}{m_{66}} + d_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中, } F_u = \frac{m_{22}vr - m_{33}wq - d_{11}u}{m_{11}}, F_q = \frac{(m_{33} - m_{11})uw - d_{55}q - Gh \sin \theta}{m_{55}}, F_r = \frac{(m_{11} - m_{22})uv - d_{66}r}{m_{66}}.$$

在机器鱼载体中,潜浮控制力矩 τ_q 由胸鳍舵板产生,航速控制力矩 τ_u 和航向控制力矩 τ_r 由艉部的2个舵机耦合产生。在实际试验时,潜浮控制相对简单,可通过 τ_q 直接推算出胸鳍舵板的控制角度;进行航速和航向控制时,可先构建两输入-两输出的舵角-力矩模型,然后通过伪逆法或二次优化的方法解算出实际控制舵角的大小。本研究仅针对机器鱼的三维路径跟踪控制问题,进行控制方法和仿真研究,因此暂不讨论舵角与力矩之间的控制解算问题,在后续研究中将进一步介绍。

2) 路径跟踪误差模型。将 $\{I\}$ 坐标系下的机器鱼和期望路径上点 P 的位置误差转换至 $\{SF\}$ 坐标系下,其误差方程^[21]如下:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_F \cos \theta_F & \sin \phi_F \cos \theta_F & -\sin \theta_F \\ -\sin \phi_F & \cos \phi_F & 0 \\ \cos \phi_F \sin \theta_F & \sin \phi_F \sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_F \\ y - y_F \\ z - z_F \end{bmatrix} \quad (4)$$

对(4)式求导得误差动力学方程^[22]为:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = U \cos \theta_e \cos \phi_e + y_e c_1(s) \dot{s} \cos \theta_F - z_e c_2(s) \dot{s} - \dot{s} \\ \dot{y}_e = U \cos \theta_e \sin \phi_e - x_e c_1(s) \dot{s} \cos \theta_F - z_e c_1(s) \dot{s} \sin \theta_F \\ \dot{z}_e = U \sin \theta_e + x_e c_2(s) \dot{s} + y_e c_1(s) \dot{s} \sin \theta_F \end{cases} \quad (5)$$

其中,机器鱼的总速度为: $U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$;同时可得出航迹角和潜浮角误差动力学模型^[23]为:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_e = \frac{r}{\cos \theta} + \dot{\beta} - c_1(s) \dot{s} \\ \dot{\theta}_e = q + \dot{\alpha} - c_2(s) \dot{s} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \dot{\beta} = (\dot{v} \sqrt{u^2 + w^2} - v \frac{u\dot{u} + w\dot{w}}{\sqrt{u^2 + w^2}}) / U, \dot{\alpha} =$$

其中, $m_{ii}(i=1,2,3,5,6)$ 为机器鱼惯性质量和流体附加质量; $d_{ii}(i=1,2,3,5,6)$ 为机器鱼线性流体动力参数; $d_k, k=u, v, w, q, r$ 分别为机器鱼在运动过程中受到的干扰; G 为机器鱼的浮力; h 为重心和浮心之间的垂向距离。 τ_u 为机器鱼沿 x_B 轴方向控制输入的力, τ_q 和 τ_r 为机器鱼绕 y_B 轴与 z_B 轴输入的力矩。

将式(2)中子系统 u, q 和 r 简化为:

$$\begin{cases} \dot{u} = F_u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + d_u \\ \dot{q} = F_q + \frac{\tau_q}{m_{55}} + d_q \\ \dot{r} = F_r + \frac{\tau_r}{m_{66}} + d_r \end{cases} \quad (3)$$

$(u\dot{w} - w\dot{u})/(u^2 + w^2), \dot{u}, \dot{v}$ 和 \dot{w} 可由动力学方程(2)得到。

3) 控制问题描述。本研究的目标是设计一款控制器使机器鱼在三维空间中跟踪期望路径,由于路径跟踪控制问题与时间无关,因此,假设机器鱼前向运动的速度 u_d 为常数,基于机器鱼运动学模型,推导出有效的运动学控制律,以产生期望的纵倾角速度 q_d 和回转角速度 r_d ,使路径跟踪误差在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛到零。并建立有效的动力学控制律,以产生控制输入 τ_u, τ_r 和 τ_q ,使误差 x_e, y_e, z_e 和 $u - u_d$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛到零。

为方便机器鱼路径跟踪控制,作出以下假设:

假设1:机器鱼期望路径 x_d, y_d 和 z_d 是有界的。

假设2:未知环境干扰及其时间导数是有界的,即 $|d_u| \leq \bar{d}_u, |d_v| \leq \bar{d}_v, |d_w| \leq \bar{d}_w, |d_q| \leq \bar{d}_q, |d_r| \leq \bar{d}_r, |\dot{d}_u| \leq \bar{\dot{d}}_u, |\dot{d}_v| \leq \bar{\dot{d}}_v, |\dot{d}_w| \leq \bar{\dot{d}}_w, |\dot{d}_q| \leq \bar{\dot{d}}_q$ 和 $|\dot{d}_r| \leq \bar{\dot{d}}_r$,其中, $\bar{d}_u, \bar{d}_v, \bar{d}_w, \bar{d}_q, \bar{d}_r, \bar{\dot{d}}_u, \bar{\dot{d}}_v, \bar{\dot{d}}_w, \bar{\dot{d}}_q$ 和 $\bar{\dot{d}}_r$ 为正数。

1.4 机器鱼路径跟踪控制器设计

图5为仿生机器鱼路径跟踪控制器结构图,控制器设计分为两步完成。第一步通过三维LOS制导法获得机器鱼期望角度,使虚拟目标沿期望路径运动,得到运动学控制器。第二步为解决外部环境不确定干扰,基于干扰观测器的模糊滑模控制来解决机器鱼动力学问题。

为提高系统收敛效率,采用以下趋近定律:

$$\dot{s}_u = -\epsilon_u \operatorname{sgn}(s_u) - k_7 s_u \quad (20)$$

其中, $\epsilon_u > 0, k_7 > 0$, 将(20)带入(19), 其纵倾角控制输入 τ_u 设计为:

$$\tau_u = m_{11}(-\epsilon_u \operatorname{sgn}(s_u) - k_7 s_u - F_u - \hat{d}_u + \dot{u}_d - c_u \tanh(e_u)) \quad (21)$$

5) 纵倾控制律设计。定义艏向角速度跟踪误差为:

$$e_q = q - q_d \quad (22)$$

与本文“1.3 4)”类似, 设计滑模面为:

$$s_q = e_q + c_q \int_0^t \tanh(e_q) dt \quad (23)$$

其中, $c_q > 0$ 。纵倾角控制输入 τ_q 设计为:

$$\tau_q = m_{55}(-\epsilon_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_8 s_q - F_q - \hat{d}_q + \dot{q}_d - c_q \tanh(e_q)) \quad (24)$$

其中, $\epsilon_q > 0, k_8 > 0$ 。

6) 艏向控制律设计。定义艏向角速度跟踪误差为:

差为:

$$e_r = r - r_d \quad (25)$$

并选择滑模面为:

$$s_r = e_r + c_r \int_0^t \tanh(e_r) dt \quad (26)$$

其中, $c_r > 0$ 。艏向角控制输入 τ_r 设计为:

$$\tau_r = m_{66}(-\epsilon_r \operatorname{sgn}(s_r) - k_9 s_r - F_r - \hat{d}_r + \dot{r}_d - c_r \tanh(e_r)) \quad (27)$$

其中, $\epsilon_r > 0, k_9 > 0$ 。

7) 稳定性证明。选取如下李雅普诺夫函数:

$$V_2 = \frac{1}{2}(\psi_e - \psi_{\text{los}})^2 + \frac{1}{2}s_r^2 + \frac{1}{2}(\theta_e - \theta_{\text{los}})^2 + \frac{1}{2}s_q^2 + \frac{1}{2}s_u^2 + \frac{1}{2}\tilde{d}_u^2 + \frac{1}{2}\tilde{d}_q^2 + \frac{1}{2}\tilde{d}_r^2 \quad (28)$$

其中, $\tilde{d}_u = \hat{d}_u - d_u, \tilde{d}_q = \hat{d}_q - d_q, \tilde{d}_r = \hat{d}_r - d_r$,

对公式(28)求导并带入前述各控制律可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= (\dot{\psi}_e - \dot{\psi}_{\text{los}})(\psi_e - \psi_{\text{los}}) + s_r \dot{s}_r + (\dot{\theta}_e - \dot{\theta}_{\text{los}})(\theta_e - \theta_{\text{los}}) + s_q \dot{s}_q + s_u \dot{s}_u + \tilde{d}_u \dot{\tilde{d}}_u + \tilde{d}_q \dot{\tilde{d}}_q + \tilde{d}_r \dot{\tilde{d}}_r \\ &= -k_2(\psi_e - \psi_{\text{los}})^2 - \epsilon_r s_r \operatorname{sgn}(s_r) - k_9 s_r^2 - s_r \tilde{d}_r - k_3(\theta_e - \theta_{\text{los}})^2 - \epsilon_q s_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_8 s_q^2 - s_q \tilde{d}_q \\ &\quad - \epsilon_u s_u \operatorname{sgn}(s_u) - k_7 s_u^2 - s_u \tilde{d}_u + \tilde{d}_u(-k_4 \tilde{d}_u - \dot{d}_u) + \tilde{d}_q(-k_5 \tilde{d}_q - \dot{d}_q) + \tilde{d}_r(-k_6 \tilde{d}_r - \dot{d}_r) \leq \\ &\quad -k_2(\psi_e - \psi_{\text{los}})^2 - \epsilon_r s_r \operatorname{sgn}(s_r) - k_9 s_r^2 + |s_r \tilde{d}_r| - k_3(\theta_e - \theta_{\text{los}})^2 - \epsilon_q s_q \operatorname{sgn}(s_q) - k_8 s_q^2 + \\ &\quad |s_q \tilde{d}_q| - \epsilon_u s_u \operatorname{sgn}(s_u) - k_7 s_u^2 + |s_u \tilde{d}_u| - k_4 \tilde{d}_u^2 + |\tilde{d}_u \dot{d}_u| - k_5 \tilde{d}_q^2 + |\tilde{d}_q \dot{d}_q| - k_6 \tilde{d}_r^2 + |\tilde{d}_r \dot{d}_r| \end{aligned} \quad (29)$$

考虑到如下不等式关系: $|s_u \tilde{d}_u| \leq \frac{1}{2\epsilon_1} s_u^2 + \frac{\epsilon_1}{2} \tilde{d}_u^2, |s_q \tilde{d}_q| \leq \frac{1}{2\epsilon_2} s_q^2 + \frac{\epsilon_2}{2} \tilde{d}_q^2, |s_r \tilde{d}_r| \leq \frac{1}{2\epsilon_3} s_r^2 + \frac{\epsilon_3}{2} \tilde{d}_r^2, |s_u \dot{d}_u| \leq \frac{1}{2\epsilon_4} \tilde{d}_u^2 + \frac{\epsilon_4}{2} \dot{d}_u^2, |\tilde{d}_q \dot{d}_q| \leq \frac{1}{2\epsilon_5} \tilde{d}_q^2 + \frac{\epsilon_5}{2} \dot{d}_q^2, |\tilde{d}_r \dot{d}_r| \leq \frac{1}{2\epsilon_6} \tilde{d}_r^2 + \frac{\epsilon_6}{2} \dot{d}_r^2$, 其中 $\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 > 0, \epsilon_3 > 0, \epsilon_4 > 0, \epsilon_5 > 0, \epsilon_6 > 0$ 。 \dot{V}_2 可进一步推导为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_2(\psi_e - \psi_{\text{los}})^2 - k_3(\theta_e - \theta_{\text{los}})^2 - \epsilon_r s_r \operatorname{sgn}(s_r) - (k_9 - \frac{1}{2\epsilon_3}) s_r^2 - \epsilon_q s_q \operatorname{sgn}(s_q) - (k_8 - \frac{1}{2\epsilon_2}) s_q^2 - \\ &\quad \epsilon_u s_u \operatorname{sgn}(s_u) - (k_7 - \frac{1}{2\epsilon_1}) s_u^2 - (k_4 - \frac{\epsilon_1}{2} - \frac{1}{2\epsilon_4}) \tilde{d}_u^2 - (k_5 - \frac{\epsilon_2}{2} - \frac{1}{2\epsilon_5}) \tilde{d}_q^2 - (k_6 - \frac{\epsilon_3}{2} - \frac{1}{2\epsilon_6}) \tilde{d}_r^2 + \\ &\quad \frac{\epsilon_4}{2} \dot{d}_u^2 + \frac{\epsilon_5}{2} \dot{d}_q^2 + \frac{\epsilon_6}{2} \dot{d}_r^2 \end{aligned} \quad (30)$$

选择参数使 $k_4 - \frac{\epsilon_1}{2} - \frac{1}{2\epsilon_4} \geq 0, k_5 - \frac{\epsilon_2}{2} - \frac{1}{2\epsilon_5} \geq 0, k_6 - \frac{\epsilon_3}{2} - \frac{1}{2\epsilon_6} \geq 0, k_7 - \frac{1}{2\epsilon_1} \geq 0, k_8 - \frac{1}{2\epsilon_2} \geq 0, k_9 - \frac{1}{2\epsilon_3} \geq 0$ 。考虑到 \dot{d}_u, \dot{d}_q 和 \dot{d}_r 有界, 因此可知系统稳定。

8) 模糊滑模控制器设计。根据式(30)可以看出, \dot{V}_2 收敛至零时, 其收敛速度取决于 k_7, k_8 和 k_9 , 在指数趋近中, 趋近速度从较大值逐步减小至零, 使运动点到达切换面时的速度很小, 当运动点接近滑模

面 $s=0$ 时, 有 $\dot{s} = \pm \epsilon$, 即运动点到达滑模面时的趋近速度是 ϵ 而不是零, 可以保证运动点有限时间到达。当 ϵ 较大时, 运动点穿过滑模面距离变大, 引起系统剧烈抖振, 但选取 ϵ 值较小时, 虽然减小了抖振, 但延长了系统的趋近时间。为保障系统能快速趋近的同时削弱抖振, 应当在增大 k 的同时减小 ϵ [26]。

综合上述情况, 本研究滑模趋近律被重新设计为:

$$\begin{cases} \dot{s}_u = -\epsilon_u \alpha_{11} \operatorname{sgn}(s_u) - \alpha_{21} k_7 s_u \\ \dot{s}_q = -\epsilon_q \alpha_{12} \operatorname{sgn}(s_q) - \alpha_{22} k_8 s_q \\ \dot{s}_r = -\epsilon_r \alpha_{13} \operatorname{sgn}(s_r) - \alpha_{23} k_9 s_r \end{cases} \quad (31)$$

式(31)中, $\alpha_{1j}, \alpha_{2j} (j=1, 2, 3)$ 分别为模糊控制的

输出值,选取运动点与滑模面之间的距离 $s_l(l=u, q, r)$ 为模糊控制的输入值,在本研究中,艏向、纵倾与航速的趋近律设计相同,因此,都采用一种模糊规则进行控制。如图5所示,系统的输入与输出的模糊量均用ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)为

模糊子集,隶属度函数均采用三角形隶属度函数,并提出4条模糊规则:R1:if $|s_l|$ is ZO then α_{1j} is ZO, α_{2j} is PM; R2:if $|s_l|$ is PS then α_{1j} is PS, α_{2j} is PB; R3:if $|s_l|$ is PM then α_{1j} is PM, α_{2j} is PS; R4:if $|s_l|$ is PB then α_{1j} is PB, α_{2j} is ZO。

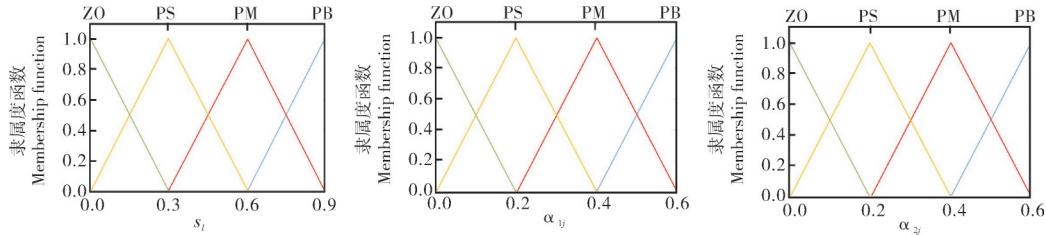


图6 模糊系统的隶属度函数

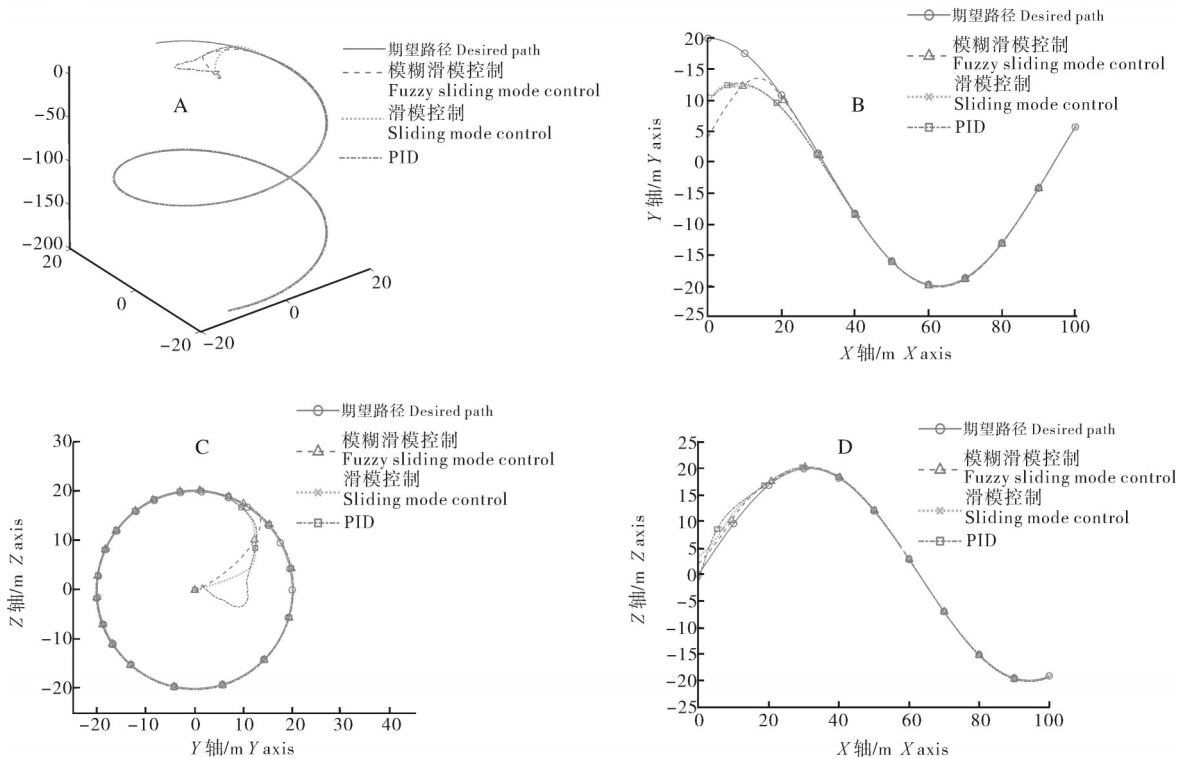
Fig.6 Membership function of fuzzy systems

2 结果与分析

2.1 无干扰仿真对比

为验证所提出控制算法的有效性,利用Matlab软件对机器鱼控制系统进行仿真分析,并与常规PID、滑模控制器性能进行对比。仿生机器鱼各参数选取为: $m_{11}=25$ kg, $m_{22}=17$ kg, $m_{33}=30$ kg, $m_{55}=22.5$ kg, $m_{66}=15$ kg, $d_{11}=30$, $d_{22}=30$, $d_{33}=30$, $d_{55}=20$, $d_{66}=20$, $Gh=5$ 。选择期望路径为 $P_d(\mu)=$

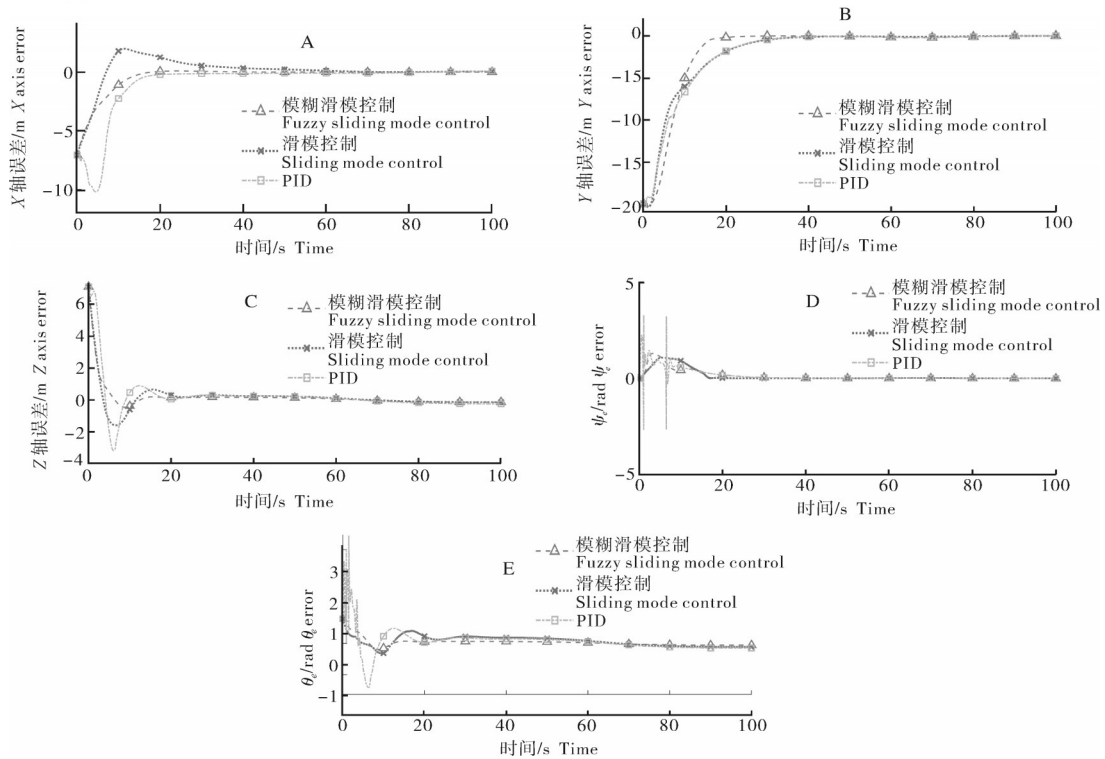
$[\mu, 20 \cos(0.05\mu), 20 \sin(0.05\mu)]^T$;选择期望游速为 $u_d=1$ m/s; 机器鱼初始状态为: $\eta_0=[0, 10, 0, 0, 0, 0]^T$; 初始速度为 $v_0=[0.1, 0, 0, 0.1, 0.1]^T$;仿真选用普通工控机,CPU型号为Intel Core I5,仿真步长为0.01 s,仿真时间长度为100 s,计算方式选用ode3。控制器其他相关参数选择为: $k_1=0.1$, $k_2=1$, $k_3=20$, $k_4=k_5=k_6=2.5$, $k_7=20$, $k_8=k_9=1$, $\epsilon_u=15$, $\epsilon_q=\epsilon_r=2$, $c_u=c_q=c_r=1.5$ 。其仿真结果如图7所示。



A:三维空间路径 3 dimension curved path; B:XY轴路径跟踪 XY axis path following; C:YZ轴路径跟踪 YZ axis path following; D:XZ轴路径跟踪 XZ axis path following.

图7 机器鱼期望路径和实际路径

Fig.7 Robot fish expected path and actual path



A: X轴 X axis; B: Y轴 Y axis; C: Z轴 Z axis; D: ψ_e 误差 ψ_e error; E: θ_e 误差 θ_e error.

图8 机器鱼与期望轨迹直接的位置误差

Fig.8 The position error between the robot fish and the expected trajectory

从图7可知,机器鱼通过模糊滑模控制跟踪至期望路径时间为38.7 s,滑模控制跟踪至期望路径时间为69.5 s,常规PID跟踪至期望路径时间为77.5 s。从图8可知,所提出的模糊滑模控制相对于常规PID与滑模控制,其收敛速度更快,超调量更小。从图9可知,模糊滑模控制相对于常规滑模明显减小了系统抖振,取得更好的控制效果。从图10可知,滑模控制器相对于常规PID与滑模控制器,输入力与力矩波动更小。

2.2 对干扰的鲁棒性能测试

本研究所设计的机器鱼主要在养殖水塘中作业,受到的水流较小,在机器鱼游动过程中,主要面对来自自身运动,如艏摇等方面的干扰。因此,为进一步验证所提出的控制器对干扰的鲁棒性能,进行了2种不同情况下扰动的仿真试验,并与无扰动系统进行对比,在干扰1中,机器鱼受到持续扰动,在干扰2中,机器鱼受到的扰动与时间相关。

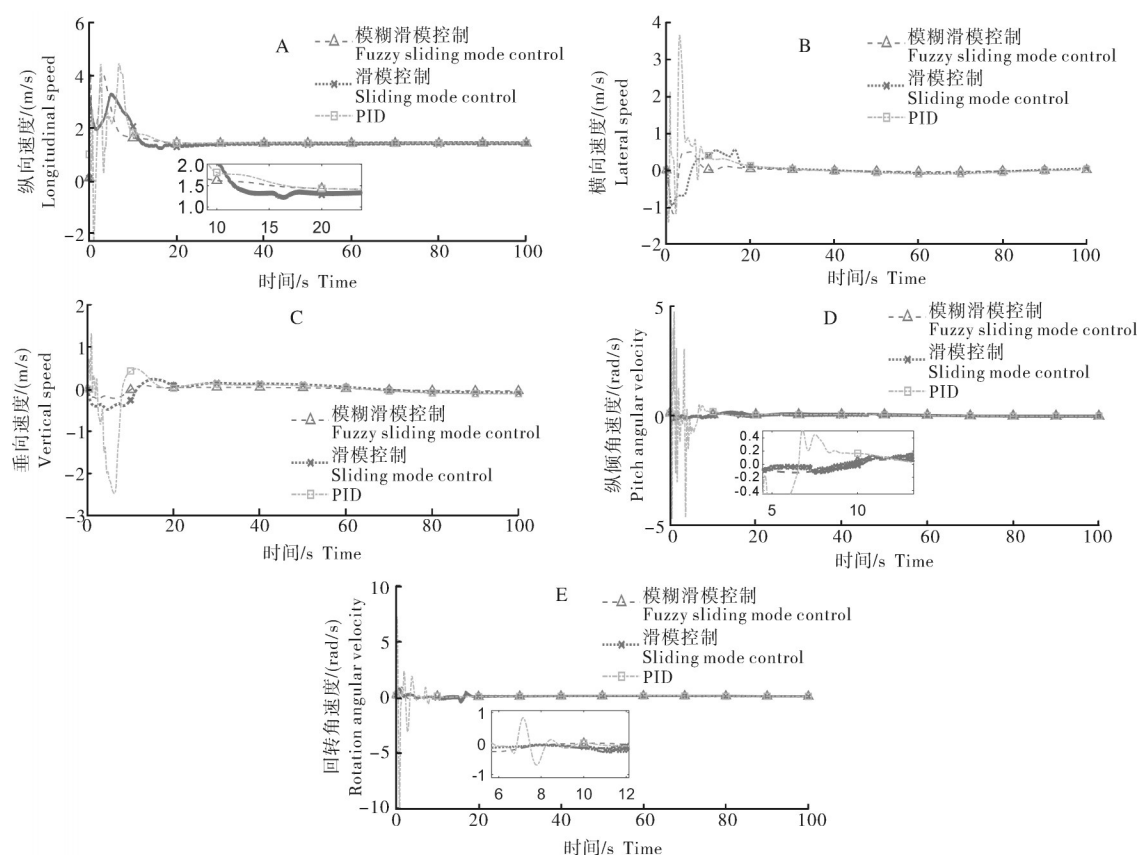
$$\text{干扰1:} \begin{cases} d_u = 0.01m_{11} \\ d_v = 0.01m_{22} \\ d_w = 0.01m_{33} \\ d_q = 0.01m_{55} \\ d_r = 0.01m_{66} \end{cases}$$

$$\text{干扰2:} \begin{cases} d_u = 0.02m_{11}d(t) \\ d_v = 0.02m_{22}d(t) \\ d_w = 0.02m_{33}d(t) \\ d_q = 0.02m_{55}d(t) \\ d_r = 0.02m_{66}d(t) \end{cases} \quad d(t) = \begin{cases} 1, t \in [30 \text{ s}, 60 \text{ s}] \\ 0, t \notin [30 \text{ s}, 60 \text{ s}] \end{cases}$$

从图11可知,在加入扰动下,系统出现了一些波动,但仍然较为精确地跟踪期望路径,由此证明所研究的干扰观测器有效,三维路径跟踪算法在面对未知干扰时仍具备良好的精度及鲁棒性,上述特质为算法移植到真实样机提供了良好的条件。当然,必须指出,在面临真实环境中的复杂扰动时,相关控制参数需进一步优化。

3 讨论

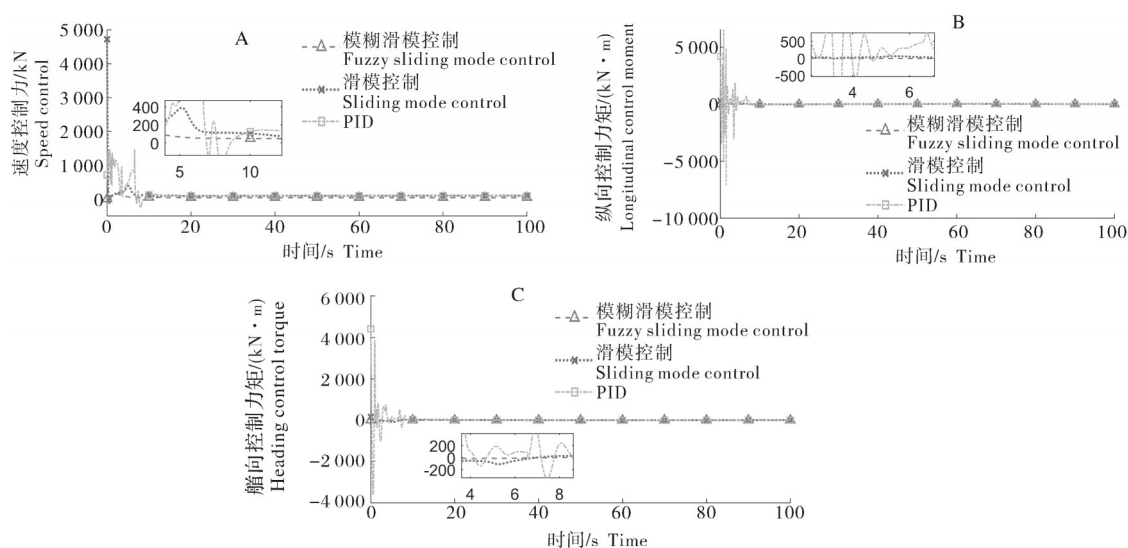
本研究基于现代化水产养殖需求,设计了一款水产养殖机器鱼以实现全水域实时监测,通过软件系统可获得水域环境信息并对机器鱼进行控制,为水产养殖水质与水下环境监测起辅助作用。针对机器鱼三维路径跟踪控制问题,本研究通过 Serret-



A:纵向速度 Longitudinal speed; B:横向速度 Lateral speed; C:垂向速度 Vertical speed; D:纵倾角速度 Trim angular velocity; E:回转角速度 Rotational angular velocity.

图9 机器鱼线速度和角速度

Fig.9 Line speed and angular velocity of robotic fishing



A:速度控制力 Speed control; B:纵向控制力矩 Longitudinal control torque; C:艏向控制力矩 Heading control torque.

图10 机器鱼控制输入力和输入力矩

Fig.10 Robot fish controls input force and input torque

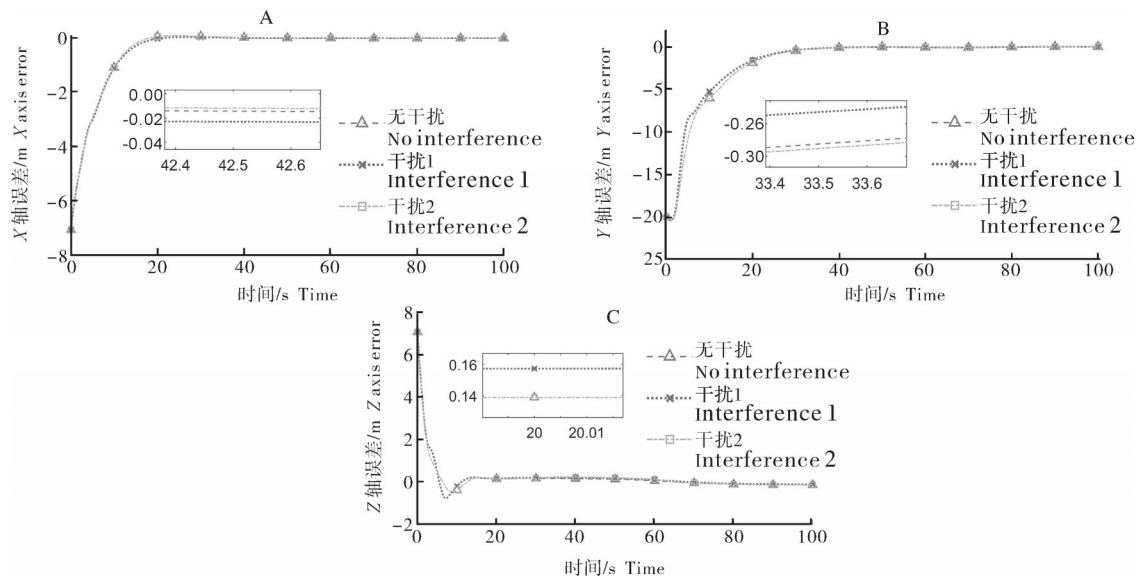


图11 不同扰动下的跟踪误差
Fig.11 Tracking errors under different disturbances

Frenet坐标系下建立了机器鱼三维空间路径跟踪误差模型,由于难以精确建立机器鱼数学模型,因此在参数不确定的情况下,基于LOS制导法和李雅普诺夫理论设计一种模糊滑模控制器,通过Matlab对所提控制器与常规PID和滑模控制器进行对比。仿真结果验证模糊滑模控制器能够实现欠驱动机器鱼在模型参数不确定性下的三维路径跟踪控制,并且控制精度与鲁棒性明显优于常规PID与滑模控制器。限于论文篇幅及机器鱼加工进度等问题,本研究仅开展了数字仿真工作,证实了本文提出的算法具有良好的控制精度和鲁棒性,具备移植到实际样机中的条件,但考虑到实际试验环境中干扰会更加复杂,在进行样机试验时,还需进一步优化算法,相关内容将在后续研究中介绍。

参考文献 References

- [1] 夏英凯,朱明,曾鑫,等.水产养殖水下机器人研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):85-97.XIA Y K,ZHU M,ZENG X,et al.Progress of underwater robots for aquaculture[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(3):85-97(in Chinese with English abstract).
- [2] 宋晓茹,高泽鹏,陈超波,等.基于ADRC的机器鱼的路径跟踪研究[J].计算机仿真,2020,37(5):296-300,305.SONG X R,GAO Z P,CHEN C B,et al.The study for path following of robotic fish based on ADRC[J].Computer simulation,2020,37(5):296-300,305(in Chinese with English abstract).
- [3] 李宗刚,夏文卿,葛立明,等.仿生机器鱼胸/尾鳍协同推进闭环深度控制[J].机器人,2020,42(1):110-119.LI Z G,XIA W Q,GE L M,et al.Closed loop depth control of biomimetic robotic fish cooperatively driven by pectoral fin and caudal fin[J].Robot,2020,42(1):110-119(in Chinese with English abstract).
- [4] YU J Z,LIU J C,WU Z X,et al.Depth control of a bioinspired robotic dolphin based on sliding-mode fuzzy control method[J].IEEE transactions on industrial electronics,2018,65(3):2429-2438.
- [5] ZOU K X,WANG C,XIE G M,et al.Cooperative control for trajectory tracking of robotic fish[C]//2009 American Control Conference, June 10-12, 2009, St. Louis, MO, USA. [S. l.]: IEEE,2009:5504-5509.
- [6] CASTANO M L,TAN X B.Model predictive control-based path-following for tail-actuated robotic fish[J/OL].Journal of dynamic systems, measurement, and control,2019,141(7):071012 [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1115/1.4043152>.
- [7] WANG F L,GUO C,YU H M,et al.Three-dimensional path following of underactuated AUV based on nonsingular terminal sliding mode control[C]//2020 5th International Conference on Automation,Control and Robotics Engineering (CACRE), September 19-20, 2020, Dalian, China. [S. l.]: IEEE,2020:346-350.
- [8] WANG S M,SHEN Y,SHA Q X,et al.Nonlinear path following of autonomous underwater vehicle considering uncertainty[C]//2017 IEEE Underwater Technology, February 21-24, 2017,Busan,Korea (South).[S. l.]:IEEE,2017:1-4.
- [9] XU R K,TANG G Y,XIE D,et al.Neural network for 3D trajectory tracking control of a CMG-actuated underwater vehicle with input saturation[J].ISA transactions,2022,123:152-157.

- [10] 李泽宇,刘卫东,李乐,等.基于RBF网络Q学习的AUV路径跟踪控制方法[J].西北工业大学学报,2021,39(3):477-483.LI Z Y, LIU W D, LI L, et al. Path following method for AUV based on Q-learning and RBF neural network [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 477-483 (in Chinese with English abstract).
- [11] 焦欧阳.一种尾部驱动的水下机器人建模与控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020. OUYANG J. Modeling and control of a tail-driven underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [12] 阳同光,桂卫华.神经网络反推控制在光伏系统最大功率点跟踪中的应用[J].太阳能学报,2016,37(12):3030-3036. YANG T G, GUI W H. Maximum power point tracking of pv system based on neural network back stepping control [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(12): 3030-3036 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵希梅,吴勇慷.基于自适应修正拉盖尔递归神经网络的永磁直线同步电机反推控制[J].电工技术学报,2018,33(10):2392-2399. ZHAO X M, WU Y K. Backstepping control based on adaptive modified laguerre recurrent neural network for permanent magnet linear synchronous motor [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(10): 2392-2399 (in Chinese with English abstract).
- [14] SUEBSAIPROM P, LIN C L. Sliding mode path tracking control for fish-robot under ocean current perturbation [C]//2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation, June 1-3, 2016, Kathmandu, Nepal. [S.l.]: IEEE, 2016: 972-977.
- [15] CHEN Y R, QIAO J F, LIU J C, et al. Three-dimensional path following control system for net cage inspection using bionic robotic fish [J]. Information processing in agriculture, 2022(1): 100-111.
- [16] 韩鹏,刘志林,周泽才,等.基于LOS法的自航模航迹跟踪控制算法实现[J].应用科技,2018,45(3):66-70. HAN P, LIU Z L, ZHOU Z C, et al. Path tracking control algorithm based on LOS method for surface selfpropulsion vessel [J]. Applied science and technology, 2018, 45(3): 66-70 (in Chinese with English abstract).
- [17] 熊凯军.多普勒计程仪测速误差分析[J].船电技术,2012,32(9):30-33. XIONG K J. Error analysis on Doppler log measurement [J]. Marine electric & electronic engineering, 2012, 32(9): 30-33 (in Chinese with English abstract).
- [18] 唐鸿儒,奚家烽,沈天鹤,等.基于ROS的遥控水下机器人监控系统研制[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2019,11(2):138-143. TANG H R, XI J F, SHEN T H, et al. Research and development of a monitor system for underwater remote-operated vehicles based on ROS [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (natural science edition), 2019, 11(2): 138-143 (in Chinese with English abstract).
- [19] ZHANG J L, XIANG X B, LAPIERRE L, et al. Approach-angle-based three-dimensional indirect adaptive fuzzy path following of under-actuated AUV with input saturation [J/OL]. Applied ocean research, 2021, 107: 102486 [2021-12-06]. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102486>.
- [20] SUN Y S, ZHANG C M, XU H, et al. Three-dimensional path tracking control of the underactuated AUV based on backstepping sliding mode [C]//2019 4th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS), July 13-15, 2019, Nagoya, Japan. [S.l.]: IEEE, 2019: 95-103.
- [21] 苗建明,王少萍,范磊,等.欠驱动自主水下航行器空间曲线路径跟踪控制研究[J].兵工学报,2017,38(9):1786-1796. MIAO J M, WANG S P, FAN L, et al. Spatial curvilinear path following control of underactuated AUV [J]. Acta armamentarii, 2017, 38(9): 1786-1796 (in Chinese with English abstract).
- [22] ZHANG L J, JIA H M, JIANG D P. Sliding mode prediction control for 3D path following of an underactuated AUV [J]. IFAC proceedings volumes, 2014, 47(3): 8799-8804.
- [23] ZHANG Y W, WANG X J, WANG S P, et al. DO-LPV-based robust 3D path following control of underactuated autonomous underwater vehicle with multiple uncertainties [J]. ISA transactions, 2020, 101: 189-203.
- [24] GUO C, HAN Y N, YU H M, et al. Spatial path-following control for underactuated AUVs with parameter perturbation [C]//2019 Chinese Control Conference (CCC), July 27-30, 2019, Guangzhou, China. [S.l.]: IEEE, 2019: 162-167.
- [25] MIAO J M, WANG S P, ZHAO Z P, et al. Spatial curvilinear path following control of underactuated AUV with multiple uncertainties [J]. ISA transactions, 2017, 67: 107-130.
- [26] 吕振鹏,毕凤荣, XU Wang, 等.车辆半主动座椅悬架自适应模糊滑模控制[J].振动与冲击,2021,40(2):265-271. LÜ Z P, BI F R, XU W, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for semi-active seat suspensions [J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(2): 265-271 (in Chinese with English abstract).

Design and three-dimensional path tracking control of robotic fish in aquaculture

WANG Yicai, XIA Yingkai, ZHU Ming, ZENG Xin, QI Xianghong

*College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of
Agricultural Equipment for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River/
Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract A robot fish in aquaculture for real-time monitoring of the whole water area was designed and a control system of robot fish was built to facilitate the monitoring of water quality and underwater fish activities. The three-dimensional spatial path tracking error model of the robotic fish was established in the Serret-Frenet coordinate system to realize the precise operation of the robotic fish and study the three-dimensional path tracking control of the robotic fish. Based on the LOS guidance law and Lyapunov theory, a fuzzy sliding mode controller was designed. The algorithm has the advantages of fast convergence speed and strong robustness. Finally, Matlab simulation was used to verify the effectiveness of the control algorithm proposed in this article. The results of simulation showed that the designed controller enables the robotic fish to realize three-dimensional path tracking control under the condition of model parameter uncertainty and unknown external disturbance, and its control accuracy and robustness are significantly better than those of conventional PID and sliding mode controllers.

Keywords bionic robotic fish; three-dimensional path tracking; fuzzy sliding mode control; motion control; autonomous underwater vehicle; intelligent breeding equipment; underwater vehicle

(责任编辑:陆文昌)