

doi: 10.7690/bgzd.2023.08.014

机器鱼双闭环正弦形轨迹跟踪控制方法

王国平¹, 王治平^{2,3}, 张轩龙^{2,3}, 李宗刚^{2,3}

(1. 甘肃长风电子科技有限责任公司, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学机电工程学院, 兰州 730070;
3. 兰州交通大学机器人研究所, 兰州 730070)

摘要: 为实现机器鱼位置和姿态的实时轨迹跟踪控制, 通过将姿态控制作为内环、位置控制作为外环的方式设计双闭环控制算法。内环通过采用滑模控制器使得其收敛速度大于外环, 保证闭环控制系统整体稳定性, 通过李亚普诺夫稳定性定理证明机器鱼位置姿态双闭环控制系统具有渐近稳定性。仿真结果表明: 该方法可有效控制机器鱼纵垂面轨迹的实时追踪; 实验中机器鱼完成预设运动共耗时 12 s, 其轨迹最大误差和平均误差分别为 0.078 m 和 0.052 m, 验证了双闭环算法在机器鱼轨迹跟踪控制中的有效性和高效性。

关键词: 仿生机器鱼; 运动学建模; 姿态控制; 滑模控制器; 轨迹跟踪控制

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Double-closed-loop Sinusoidal Trajectory Tracking Control Method for Robot Fish

Wang Guoping¹, Wang Zhiping^{2,3}, Zhang Xuanlong^{2,3}, Li Zonggang^{2,3}

(1. Gansu Changfeng Electronic Science and Technology Co., Ltd., Lanzhou 730070, China;
2. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Robotics Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to realize the real-time trajectory tracking control of the position and attitude of the robotic fish, a double closed-loop control algorithm is designed by taking the attitude control as the inner loop and the position control as the outer loop. The convergence rate of the inner loop is faster than that of the outer loop by using the sliding mode controller to ensure the overall stability of the closed-loop control system. The Lyapunov stability theorem proves that the position and attitude double closed-loop control system of robotic fish is asymptotically stable. The simulation results show that the method can effectively control the robot fish to track the vertical trajectory in real time; in the experiment, the robot fish takes 12 s to complete the preset movement, and the maximum error and average error of the trajectory are 0.078 m and 0.052 m, respectively, which verifies the effectiveness and efficiency of the double closed-loop algorithm in the trajectory tracking control of robot fish.

Keywords: bionic robot fish; kinematics modeling; attitude control; sliding mode controller; trajectory tracking control

0 引言

目前水下自主机器人(AUV)已经在水下资源勘探、水下设备巡检、水生生物观测等诸多方面得到了广泛的应用。仿生机器鱼作为一种新型的水下机器人,相比于传统螺旋桨推进的航行器具有运动效率高、机动性能好、噪声低等诸多优势^[1-5]。由于水下环境的复杂性以及水生生物无规律运动的影响,对于水下作业设备的机动性能提出了更高的要求。

以往的研究中对于机器鱼高机动性运动控制问题已经做了大量的研究性工作。王彤等^[6]利用所研制的四尾鳍组合推进水下航行器通过建立中枢模式发生器(CPG)模型,控制仿生样机实现了巡游、倒

退、偏航、俯仰等多种运动模态;李宗刚等^[7]通过模糊控制方法对所研制的2自由度胸鳍及3关节尾鳍仿生机器鱼样机进行实时控制,实现了机器鱼的闭环深度控制,并通过水池实验对其结论进行了验证;Du Sh等^[8]设计开发了具有2关节尾鳍、单自由度胸鳍以及浮力调节机构机器鱼,通过对CPG参数的调整实现了直线游动、圆形转弯以及俯仰等运动;Wang H等^[9]利用离散时间类超扭控制器(discrete-time super-twisting-like controller)对所设计4关节仿生机器鱼的转向进行了控制,通过实体实验验证了该方法的有效性;李宗刚等^[10]对2自由度胸鳍推进机器鱼的转弯特性进行了分析同时给出了定半径转弯以及原地转弯的胸尾鳍的运动条件;

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-06-20

作者简介: 王国平(1984—),男,甘肃人。

Wang M 等^[11]建立了 3 关节仿生机器鱼的动力学模型, 采用迭代学习算法实现了机器鱼的轨迹追踪控制; Yan S Z 等^[12]针对所开发的 4 关节仿生机器鱼, 提出了基于学习和进化计算的协同结构控制方法, 控制机器鱼实现了 2 维轨迹跟踪任务; D. Korkmaz 等^[13]利用 PID 算法对所研制 4 关节仿鳃科机器鱼的直游和转弯运动模式进行了控制, 并通过仿真和实体实验验证了该控制方法的有效性; T. M. Currier 等^[14]设计了使用二氧化碳气体进行驱动的柔性机器鱼, 控制该机器鱼实现了快速 C 形启动运动, 通过实际测量该机器鱼在启动瞬间的加速度可超过 20 g。上述对于机器鱼运动控制方法的研究中所采用的机器鱼样机大多较为简单, 且多为平面运动控制, 对于纵垂面机器鱼的轨迹追踪控制目前尚有一定的研究空间。同时所涉及机器鱼的运动控制量较为单一, 无法有效实现机器鱼运动状态下位置及姿态角的闭环控制。

针对以上问题, 笔者在前期研究的基础上建立了机器鱼运动学模型, 并采用位置及姿态双闭环控制方法构建机器鱼控制器, 实现纵垂面目标轨迹精确跟踪。通过仿真软件对所设计控制器的有效性进行了仿真验证, 同时利用实验室研制的刚性胸鳍仿蓝圆鳃机器鱼样机进行了实体实验, 进一步验证了笔者所述方法的有效性。

1 建立仿生机器鱼动力学模型

1.1 推进机构动力学

1.1.1 胸鳍推进运动方程

设定仿生机器鱼胸鳍摇翼按以下方程运动, 即

$$\theta_s = -A_s \cos(2\pi f_s t) + \theta_{sa} \quad (1)$$

式中: f_s 为频率; θ_s , A_s , θ_{sa} 为摇翼角、幅值、偏置。

以左侧胸鳍为例, 如图 1 所示摇翼受力情况, 并根据文献[10], 利用微元法分析胸鳍受力为:

$$\begin{aligned} dF_{pn} &= \rho C_n v^2 dA/2, \\ dF_{pt} &= \rho C_t (v \cos \theta_s)^2 dA/2. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为水密度; C_n 为法向升力系数; C_t 为切向阻力系数; dA 为胸鳍微元面积。

左侧胸鳍推力 F_{lx} 和 F_{lz} 分别为:

$$F_{lx} = \iint_{S_p} (dF_{pt} \cdot \cos \theta_s + dF_{pn} \cdot \sin \theta_s) dS; \quad (3)$$

$$F_{lz} = \iint_{S_p} (dF_{pt} \cdot \sin \theta_s - dF_{pn} \cdot \cos \theta_s) dS. \quad (4)$$

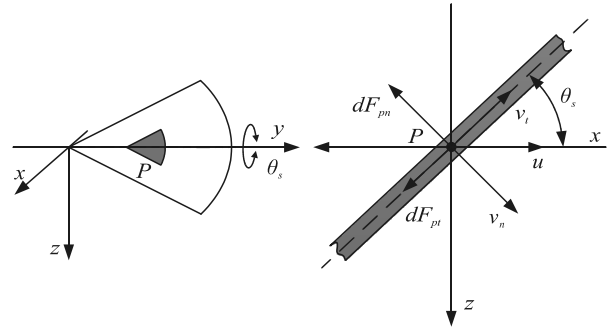


图 1 胸鳍受力分析

1.1.2 尾鳍推进运动方程

根据 Lighthill 发现的鱼体波曲线, 可得仿生机器鱼 3 关节尾鳍的摆动规律为

$$\left. \begin{aligned} A_1(t) &= d_2 \cdot (1 - d_1) A_{1\max} + d_1 A_{1\max} \sin(2\pi f t) \\ A_2(t) &= d_2 \cdot (1 - d_1) A_{2\max} + d_1 A_{2\max} \sin(2\pi f t + \alpha_1) \\ A_3(t) &= d_2 \cdot (1 - d_1) A_{3\max} + d_1 A_{3\max} \sin(2\pi f t + \alpha_2) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 个关节的转动角度; $A_{i\max}$ 为第 i 个关节的最大转动角度; d_1 为关节转动的实际振幅与最大振幅值比; d_2 为关节与中心轴转动的偏振系数; α_i 为第 i 关节和第 $i+1$ 关节的相位差。

根据文献[15]可知, 机器鱼 3 关节尾鳍推进力为:

$$\begin{aligned} F_{tail} &= 2\pi\rho S (fh_0)^2 \sin(2\pi f t) \cos[\alpha_0 \cos(2\pi f t - \gamma)] \\ &\quad \{2\pi \sin(2\pi f t) - \tan[\alpha_0 \cos(2\pi f t - \gamma)] / St'\}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度; S 为尾鳍面积; f 为拍动频率; h_0 为摆动幅值; γ 为尾鳍和尾柄相位差; α_0 为尾鳍摆角幅值; $St' = St/2$, St 为斯特劳哈尔数。

1.2 仿生机器鱼动力学建模

1.2.1 机器鱼纵垂面运动学

仿生机器鱼在纵垂面运动时, 设定其位姿为 $\eta = [x \ z \ \theta]^T$, 速度为 $v = [v \ q]^T$, 建立纵垂面运动学模型^[16]如下:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v. \quad (7)$$

式中: 转换矩阵 $J(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; x, z 分别为 x

方向和 z 方向的位置; θ 为升潜角; v, q 分别为线速度和角速度。

1.2.2 机器鱼纵垂面动力学

将机器鱼近似为长、宽、高为 L, W, H 的长方体, 则形体阻力为:

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \rho W H C_d (v \cos \theta)^2 / 2 \\ D_z &= \rho L H C_d (v \sin \theta)^2 / 2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 C_d 为阻力系数。

机器鱼动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} M dv_x / dt &= F_{lx} + F_{rx} + F_{tail} - D_x \\ M dv_z / dt &= F_{lz} + F_{rz} - D_z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： v_x 和 v_z 分别为 x 和 z 方向机器鱼游动速度； F_{rx} 和 F_{rz} 分别为右胸鳍在 x 方向和 z 方向所受流体力。

2 机器鱼双环控制器设计

笔者设计的仿生机器鱼位姿双闭环控制方案如图 2 所示。将机器鱼纵垂面位置期望值作为位置(外环)控制系统的输入,输出位置控制律和中间指令升潜角 θ , 并将中间指令 θ 传递给内环控制系统,利用滑模趋近函数,实现对机器鱼升潜角 θ 的跟踪。利用基于 Lyapunov 函数分析闭环系统的稳定性。

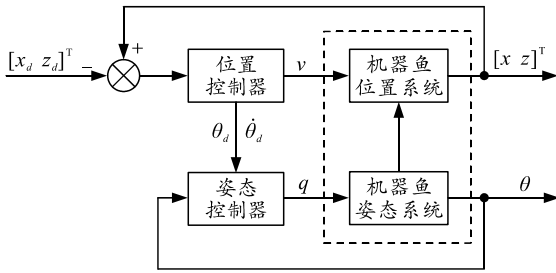


图 2 仿生机器鱼位姿双闭环控制

2.1 位置控制律设计

给定机器鱼期望轨迹跟踪位置为 $[x_d \ z_d]^T$, 并定义其轨迹跟踪位置误差为 $[x_e \ z_e]$, 则

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_e &= \dot{x} - \dot{x}_d \\ \dot{z}_e &= \dot{z} - \dot{z}_d \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： \dot{x}_e 、 \dot{z}_e 分别为 x 和 z 方向轨迹误差变化率。

取

$$\left. \begin{aligned} v \cos \theta &= u_1 \\ v \sin \theta &= u_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则将升潜角期望值取为

$$\theta_d = \arctan(u_2/u_1) \quad (12)$$

式中 $\theta_d \in (-\pi/2, \pi/2)$ 。

文献[17]中,提出了动态系统全局渐进稳定定理如下:

$$\dot{\eta} = -\alpha \tanh(k\eta) \quad (13)$$

式中 $\alpha, k > 0$ 。

由式(7)定理可得,位置控制律设计为:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \dot{x}_d - a_x \tanh(p_x x_e) \\ u_z &= \dot{z}_d - a_z \tanh(p_z z_e) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： $a_x > 0, p_x > 0, a_z > 0, p_z > 0$ 。

由上式得 u_x 和 u_z 有界, 并 $|u_x| \leq |\dot{x}_d|_{\max} + |a_x|, |u_z| \leq |\dot{z}_d|_{\max} + |a_z|$ 。由于 $v^2 = u_x^2 + u_z^2$, 从而 v 也有界, 且 $|v| \leq \sqrt{(|\dot{x}_d|_{\max} + |a_x|)^2 + (|\dot{z}_d|_{\max} + |a_z|)^2}$, 即

$$v_{\max} \leq \sqrt{(|\dot{x}_d|_{\max} + |a_x|)^2 + (|\dot{z}_d|_{\max} + |a_z|)^2} \quad (15)$$

故而,位置误差变化率变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_e &= -a_x \tanh(p_x x_e) \\ \dot{z}_e &= -a_z \tanh(p_z z_e) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据式(7),可实现 $x_e \rightarrow 0, z_e \rightarrow 0$ 。

由式(11),得到最终位置控制律为

$$v = u_1 / \cos \theta_d \quad (17)$$

2.2 姿态控制律设计

定义其姿态误差为 $\theta_e = \theta - \theta_d$, 取滑模函数为 $s = \theta_e$, 则:

$$\dot{s} = \dot{\theta}_e = q - \dot{\theta}_d \quad (18)$$

设计升潜角控制律为

$$q = \dot{\theta}_d - ks - \lambda \operatorname{sgn}(s) \quad (19)$$

式中： $k > 0, \lambda > 0$ 。

2.3 稳定性证明

假定存在理想升潜角 θ_d , 在运动学模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta_d + v(\cos \theta - \cos \theta_d) \\ \dot{z} &= v \sin \theta_d + v(\sin \theta - \sin \theta_d) \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

考虑升潜角跟踪误差影响,采用理想条件下的控制律 v_1 和 v_2 , 则控制律按照式(14)设计,上式变为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_e &= -a_x \tanh(p_x x_e) + v(\cos \theta - \cos \theta_d) \\ \dot{z}_e &= -a_z \tanh(p_z z_e) + v(\sin \theta - \sin \theta_d) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

由于 u_x 、 u_z 和 v 有界,则上式闭环系统满足 Lipschitz 条件,从而对任何初始状态, x_e 和 z_e 在任何有限时间内有界。

首先分析式(15)中 x_e 的收敛性。考虑函数 $\cosh(x) = (e^{-x} + e^x)/2 \geq 1$, $\ln(\cosh(x)) \geq 0$, 且 $x = 0$ 时, $\ln(\cosh(x)) \rightarrow 0$ 。

取 Lyapunov 函数为

$$V(t) = a_x \ln(\cosh p_x x_e) + a_z \ln(\cosh p_z z_e) + s^2/2 \quad (22)$$

式中： $a_x > 0, a_z > 0, p_x > 0, p_z > 0$ 。易得 $V(t) = 0$ ， $V(t) \geq 0$ 。

则

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) + \dot{V}_3(t) \quad (23)$$

式中：

$$\dot{V}_1(t) = a_x \frac{\sinh(p_x x_e)}{\cosh(p_x x_e)} p_x \dot{x}_e = a_x p_x \tanh(p_x x_e) \dot{x}_e; \quad (24)$$

$$\dot{V}_2(t) = a_z \frac{\sinh(p_z z_e)}{\cosh(p_z z_e)} p_z \dot{z}_e = a_z p_z \tanh(p_z z_e) \dot{z}_e; \quad (25)$$

$$\dot{V}_3(t) = s\dot{s} = s(-ks - \lambda \operatorname{sgn}(s)) \quad (26)$$

令

$$k_1 = a_x \tanh(p_x x_e), \quad k_2 = v(\cos \theta - \cos \theta_d);$$

$$k_3 = a_z \tanh(p_z z_e), \quad k_4 = v(\sin \theta - \sin \theta_d)。$$

将上式带入式(20)得：

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) + \dot{V}_3(t) = & p_x(-k_1 + k_2)k_1 + \\ & p_z(-k_3 + k_4)k_3 + s\dot{s} = -p_x(k_1 - k_2)^2 + p_x k_2^2/4 - \\ & p_z(k_3 - k_4)^2 + p_z k_4^2/4 + s\dot{s} \leq -p_x(k_1 - k_2/2)^2 + \\ & p_x k_2^2/4 - p_z(k_3 - k_4/2)^2 + p_z k_4^2/4 - k\tilde{\theta}^2. \end{aligned} \quad (27)$$

由三角函数性质可得，

$$\begin{aligned} |\cos \theta_d - \cos \theta| = \\ |2 \sin(\theta_d + \theta)/2 \sin(\theta_d - \theta)/2| \leq 2|\sin(\theta_d - \theta)/2|; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} |\sin \theta_d - \sin \theta| = \\ |2 \cos(\theta_d + \theta)/2 \sin(\theta_d - \theta)/2| \leq 2|\sin(\theta_d - \theta)/2|. \end{aligned} \quad (29)$$

由正弦函数 $|\sin(x)| \leq x$ ，有 $|\sin(\theta_d - \theta)/2| \leq |\theta_d - \theta|/2$ ，则：

$$|\cos \theta_d - \cos \theta| \leq |\theta_d - \theta|; \quad (30)$$

$$|\sin \theta_d - \sin \theta| \leq |\theta_d - \theta|。 \quad (31)$$

由于 $\theta_d - \theta$ 指数收敛，则 $|\cos \theta_d - \cos \theta|$ 和 $|\sin \theta_d - \sin \theta|$ 指数收敛，则：

$$|k_2| = |v(\cos \theta - \cos \theta_d)| \leq v_{\max} |\tilde{\theta}|; \quad (32)$$

$$|k_4| = |v(\sin \theta - \sin \theta_d)| \leq v_{\max} |\tilde{\theta}|。 \quad (33)$$

故

$$\begin{aligned} p_x k_2^2/4 + p_z k_4^2/4 - k\tilde{\theta}^2 \leq (p_x + p_z)v_{\max}^2 \tilde{\theta}^2/4 - \\ k\tilde{\theta}^2 = (p_x v_{\max}^2/4 + p_z v_{\max}^2/4 - k)\tilde{\theta}^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

式中 $k \geq (p_x + p_z)v_{\max}^2/4$ 。

综上所述可得，

$$\dot{V}(t) \leq -p_x(k_1 - k_2)^2 - p_z(k_3 - k_4)^2 \leq 0。 \quad (35)$$

对于任意的 $\delta_2 > 0$ ，存在一个有限时间 t_{δ_2} ，当 $|k_1 - k_2/2| \geq \delta_2$ 且 $|k_3 - k_4/2| \geq \delta_2$ ，使得 $\dot{V}(t) \leq 0$ 成立；因此 $k_1 - k_2/2$ 和 $k_3 - k_4/2$ 在有限时间内收敛到半径为 δ_2 的紧集内，并保持在该紧集内。根据 LaSalle 不变性原理， $t \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$ 。由此可见，系统能够在有限时间内渐进稳定。

3 机器鱼运动模态分析

笔者通过控制机器鱼在纵垂面内做正弦形曲线运动来检验所设计控制算法的有效性，通过对机器鱼期望运动轨迹进行分解可以得到各轴线方向的期望线位移以及机器鱼绕各轴的期望角位移。以正弦曲线为例，设定初始位姿为 $[-1 \ 0.4 \ 0]$ ；取期望位姿 $[x_d \ z_d]$ 为 $x_d = t, z_d = \pi/6 - \pi/6 \cos(t)$ ；控制器相关参数设定为 $a_x = 3.0, a_y = 3.0, p_x = 10, p_z = 10, k = 3.0, \eta = 0.5$ ；微分器参数取 $R = 100$ 。

图 3 所示为仿真环境下机器鱼的线位移和升潜角随时间的变化曲线，在运动开始 1.5 s 以后由于控制器的作用，机器鱼的运动轨迹得到了快速收敛进入稳定运行阶段。

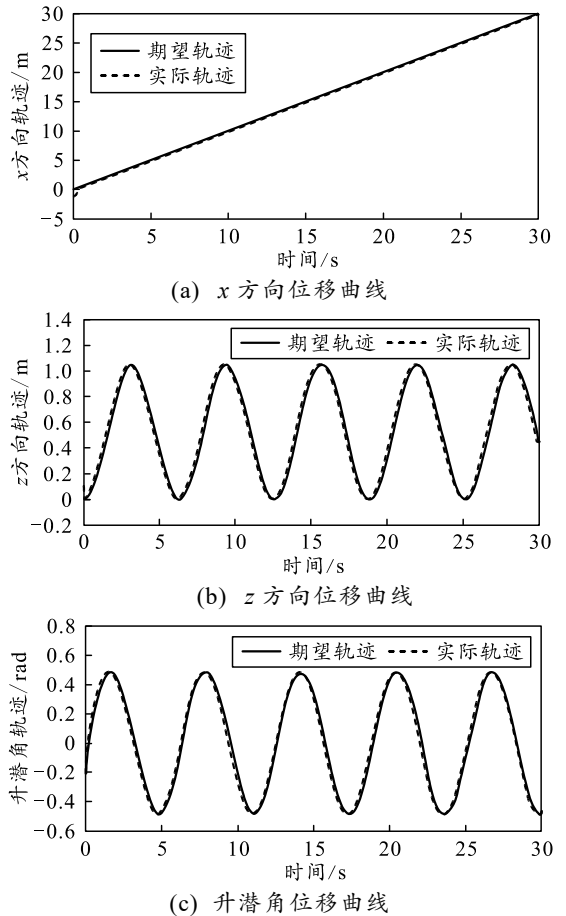


图 3 机器鱼线位移和升潜角仿真曲线

通过计算每个时刻机器鱼实际位移和期望位移的差值可以得到仿真环境下机器鱼轴线方向线位移和升潜角误差曲线如图 4 所示。机器鱼 x 轴方向的最大位移误差为 0.2 m, z 轴方向的最大位移误差为 0.12 m, 其平均误差分别为 0.013 和 0.009 6 m。机器鱼升潜角最大误差为 0.2 rad, 升潜角平均误差分别为 0.011 rad。

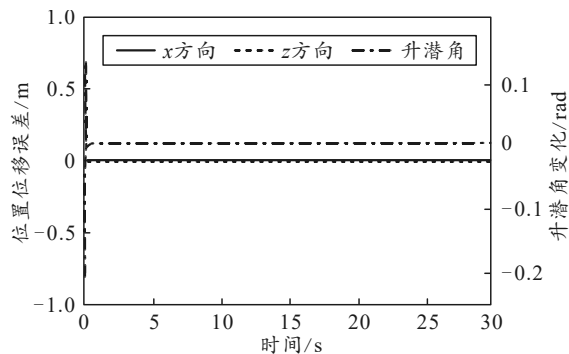


图 4 机器鱼线位移和升潜角误差仿真曲线

通过将 x 轴和 z 轴的运动轨迹进行组合可以得到仿真环境下机器鱼的运动轨迹曲线如图 5 所示。当机器鱼进入稳定运行状态以后, 其运动轨迹仅有较小的波动误差, 且机器鱼整体运动轨迹过渡平滑。

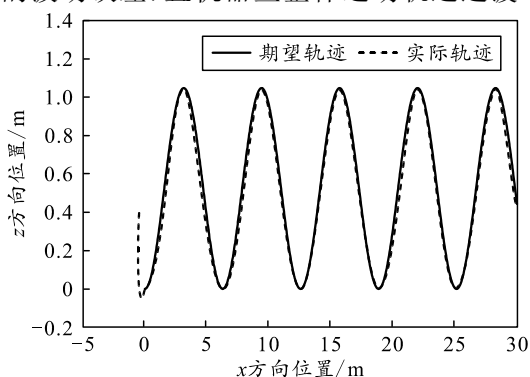


图 5 机器鱼运动轨迹仿真曲线

4 机器鱼实验验证

4.1 实验平台和环境

4.1.1 实验平台

所使用的实验样机是实验室设计制作的胸尾鳍协同推进仿蓝圆鲹机器鱼, 机器鱼的体长为 0.693 m。其中可活动尾部为 0.32 m, 两侧胸鳍翼展总长度为 0.458 m, 背腹最长轴线为 0.221 m, 总体重量约为 9 kg。机器鱼内部安装有陀螺仪和压力传感器, 用于实时测量机器鱼的升潜角和深度数据。机器鱼使用树莓派作为主控制器, 通过外接无线网卡的方式实现实时通信。机器鱼样机实物如图 6 所示。

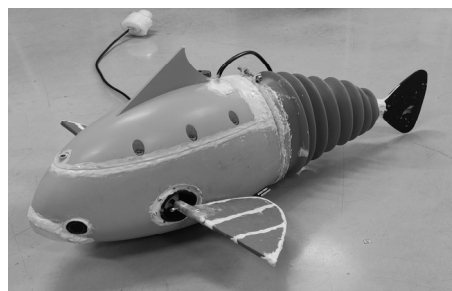


图 6 仿生机器鱼实验样机

4.1.2 实验水池环境

使用 3.8 m×1.8 m×1.2 m 的室内水池作为实体实验测试场地, 池内水深为 0.65 m。为了记录机器鱼的运行状态, 在水池正上方中部距池底约 3 m 的位置安装摄像头用于视频图像的采集。水池环境实验如图 7 所示。



图 7 仿生机器鱼实验水池环境

4.2 正弦形实体实验

实验开始时机器鱼放置在水池一侧, 深度为 0.04 m 的位置且处于静止状态。为验证所设计双闭环控制方法的有效性, 控制机器鱼样机在水池纵垂面内进行正弦形游动, 12 s 内机器鱼完成期望运动, 机器鱼实际运动状态如图 8 所示。

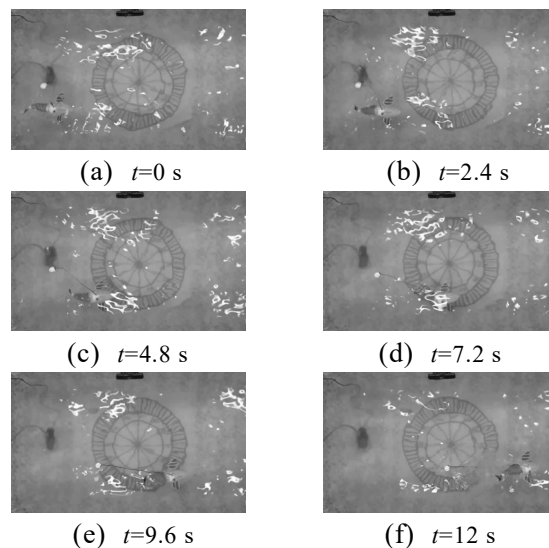


图 8 机器鱼实际运动状态

由上图可知，机器鱼样机在实际运行过程中胸尾鳍协同推进效果显著，机器鱼位姿变化自然无较大冲击现象。通过对机器鱼运行时陀螺仪及压力传感器所记录数据的解析处理，获得机器鱼运行过程中的实际位移和升潜角数据，并将机器鱼深度和前向移动数据进行组合得到机器鱼的实际游动轨迹。机器鱼实际轨迹和升潜角变化对比曲线如图 9 所示。

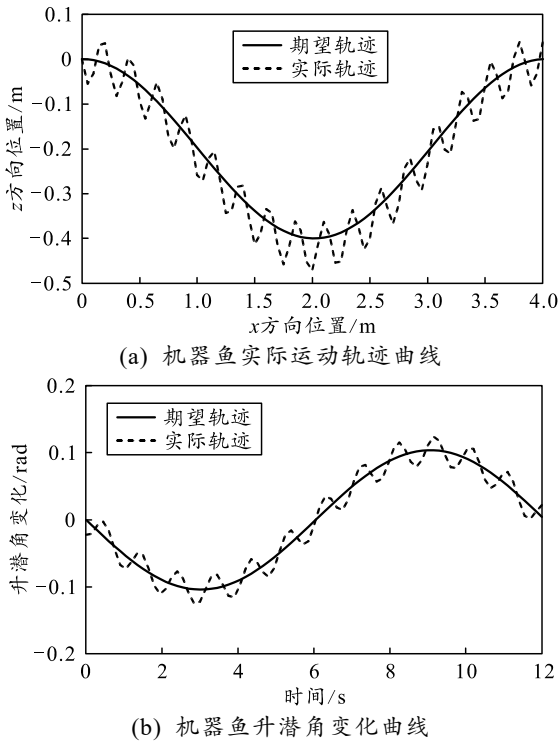


图 9 机器鱼实际轨迹和升潜角变化曲线

图 10 为本文中所述控制方法作用下，机器鱼轨迹误差与升潜角误差曲线。由图可知，机器鱼在运动至水池底部时存在较大的位置偏差，随后在控制器的作用下该误差得到了快速收敛，机器鱼的位置及升潜角均得到了有效的控制。

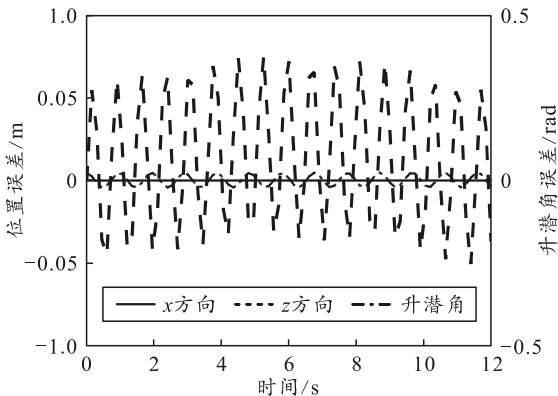


图 10 机器鱼轨迹误差与升潜角误差曲线

实验结果表明本文中所设计的双闭环控制方法

可实现机器鱼运动轨迹和姿态的实时控制，提高了机器鱼在纵垂面运动的高机动性和精确性，进一步说明了本文中所述方法的有效性。

5 结束语

为了实现机器鱼在纵垂面内的高机动性运动控制，笔者提出了一种位置姿态双闭环控制方法。通过该方法控制机器鱼实现了纵垂面内的正弦形游动，实体实验数据表明本文中所述控制方法的轨迹平均误差和轨迹最大误差分别保持在 0.052 和 0.078 m 以内。同时机器鱼的升潜角可按照所设定的期望进行运动，提高了机器鱼的控制性能。通过仿真实验和实体实验相结合的方式对文中所设计控制算法的有效性进行了验证。

在后续工作中，将在现有研究成果的基础上提高机器鱼对于水下环境的感知能力，进一步增强机器鱼运动的机动性。

参考文献:

- [1] 王耀威, 纪志坚, 翟海川. 仿生机器鱼运动控制方法综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(3): 276-284.
- [2] 宫昭, 蔡月日, 毕树生, 等. 胸鳍摆动推进机器鱼滚转机动控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 2184-2190.
- [3] 王睿, 王硕. 仿生机器鱼推进效率实验研究进展[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(9): 1388-1396.
- [4] XIE F, ZUO Q, CHEN Q, et al. Designs of the Biomimetic Robotic Fishes Performing Body and/or Caudal Fin (BCF) Swimming Locomotion: A Review[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(1): 13.
- [5] 朱佳悦, 谢梦炜, 夏庆锋. 一种 2D 仿真生存挑战比赛策略[J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 94-96.
- [6] 王彤, 高东奇, 张世武, 等. 多自由度仿生推进系统的 CPG 控制[J]. 实验力学, 2016, 31(4): 440-450.
- [7] 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.
- [8] DU S, WU Z X, WANG J, et al. Design and Control of a Two-Motor-Actuated Tuna-Inspired Robot System[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(8): 4670-4680.
- [9] WANG H, MI C L, CAO Z W, 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.
- [10] 李宗刚, 马伟俊, 葛立明, 等. 一种 2 自由度胸鳍推进仿生箱鲀机器鱼转弯特性研究[J]. 机器人, 2016, 38(5): 593-602.

- [11] WANG M, ZHANG Y L, DONG H F, et al. Trajectory tracking control of a bionic robotic fish based on iterative learning[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(7): 170202.
- [12] YAN S Z, WU Z X, WANG J, et al. Efficient Cooperative Structured Control for a Multi-Joint Biomimetic Robotic Fish[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 1: 1.
- [13] KORKMAZ D, AKPOLATZ H, SOYGÜDER S, et al. Dynamic simulation model of a biomimetic robotic fish with multi-joint propulsion mechanism[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2015, 37(5): 684-695.
- [14] CURRIER T M, LHERON S, MODARRESS Y. A

bio-inspired robotic fish utilizes the snap-through buckling of its spine to generate accelerations of more than 20g. [J]. Bioinspiration & biomimetics, 2020, 15(5): 055006.

- [15] 王田苗, 梁建宏. 基于理想推进器理论的尾鳍推力与效率估算[J]. 机械工程学报, 2005(8): 18-23.
- [16] 李海婷, 张鹏超, 任肖辉, 等. 基于改进直接模糊自适应反馈控制的多移动机器人编队算法[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 4-8, 13.
- [17] AMIT A. Simple Tracking Controllers for Autonomous VTOL Aircraft With Bounded Inputs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(3): 737-743.

(上接第 54)

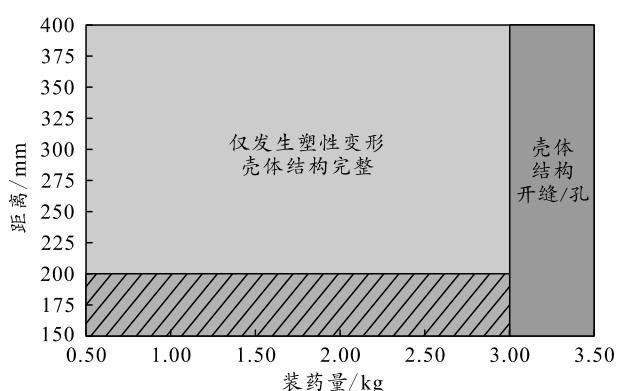


图 8 基于距离和装药量的壳体结构毁伤情况统计

上图给出基于距离和装药量的壳体结构毁伤情况, 裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为 200 mm 且长径比不变时, 当装药量大于 3 kg 时, 雷体壳体将产生开缝/孔破坏; 当装药尺寸为 $\Phi 80 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$ 、裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离大于 200 mm 时, 雷体壳体保持结构完整仅发生塑性变形。

3 结论

笔者运用数值模拟研究了作用距离和装药量对某球形雷体壳体毁伤的影响, 获取了能够造成雷体毁伤的临界作用距离及装药量, 为反水雷武器轻量化设计提供参考依据:

1) 裸药柱尺寸为 $\Phi 80 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$ 时, 随着裸药柱外端面与雷体壳体外缘的作用距离从 210 mm 增加到 400 mm 时, 壳体变形量从 3.9% 降低到 2.2%, 基本呈线性减小, 但对雷体底部约束位置基本无影响;

2) 当裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离为

200 mm 且裸药柱长径比一定时, 随着裸药柱装药量从 0.5 kg 增加到 2.5 kg 时壳体变形量从 0.58% 增加到 3.4%, 基本呈线性增大, 且雷体底部约束位置附近变形量逐渐增加;

3) 通过开展基于距离和装药量的壳体结构毁伤仿真分析发现, 相较于减小裸药柱外端面与雷体壳体外缘的距离, 增大裸药柱装药量更能使雷体壳体结构加大塑性变形量, 经仿真计算确定了能够造成雷体壳体毁伤的临界装药量为 3 kg, 临界距离为 20 mm。

参考文献:

- [1] 董晓明. 海上无人装备体系概览[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2020.
- [2] 李晓东, 余湖清, 胡光兰, 等. 美国水雷作战能力现状与发展研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 2(3): 163-165.
- [3] 石立伟, 鲍鹏筱, 陈占, 等. 水下球形机器人视觉防撞编队策略[J]. 兵工自动化, 2022, 41(10): 79-83.
- [4] 王郁茗, 李博, 周义勇, 等. 海流环境下 AUV 航行偏移影响研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(10): 88-91.
- [5] 李楠, 陈练, 庞衍鹏, 等. 无人艇装备技术发展与应用分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(12): 29-34.
- [6] 张伟, 王乃新, 魏世林, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 289-297.
- [7] 方勇. 基于 ADC 和 AHP 的 UUV 装备作战效能分析[J]. 兵工自动化, 2022, 41(10): 84-87.
- [8] 韩玮, 冯伟强, 骆福宇. 水面无人艇系统架构设计与构建[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 35-40.
- [9] 王自力, 张延昌, 顾金兰. 基于夹层板抗水下爆炸舰船底部结构设计[J]. 舰船科学技术, 2010, 31(1): 22-27.