

基于二阶一致性算法的多仿生机器鱼分布式编队控制

李宗刚^{1,2†}, 赵振乾^{1,2}, 葛立明^{1,2}, 魏文军^{2,3}

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 机器人研究所, 兰州 730070;
3. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对动态领航者按照自身动力学模型运动, 多个跟随者机器鱼以其为编队参考点, 根据编队要求形成队形并整体跟随领航者运动的问题, 提出一种多仿生机器鱼分布式编队控制方案. 首先, 基于二阶一致性算法给出各跟随者机器鱼估计领航者位姿信息的分布式算法; 其次, 给出以领航者为参考点的多仿生机器鱼编队描述方法, 进而各机器鱼根据编队要求以所估得的参考点信息实时确定其在编队中的期望位姿; 再次, 各跟随者机器鱼以期望速度和角速度以及所估得的领航者位姿信息为输入, 利用模糊控制器确定其速度档位和方向档位, 实现编队的形成与保持. 仿真和实验结果均表明, 所提分布式编队控制方法是有效的, 仿生机器鱼群体能够较快形成期望队形并跟随领航者游动.

关键词: 二阶一致性算法; 分布式估计; 模糊控制器; 多仿生机器鱼; 编队控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Distributed formation control of multiple biomimetic robotic fish based on second-order consensus algorithm

LI Zong-gang^{1,2†}, ZHAO Zhen-qian^{1,2}, GE Li-ming^{1,2}, WEI Wen-jun^{2,3}

(1. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Robotics Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This paper considers the formation problem of multi-robotic fish, in which all followers take a leader as reference point to form formation and then track it as a whole. For this purpose, a distributed formation control algorithm of multiple biomimetic robotic fish is proposed. Firstly, based on the second-order consensus algorithm, a distributed algorithm for each follower of biomimetic robotic fish estimating the leader pose is proposed. Secondly, the formation description of the multiple biomimetic robotic fish formation with leader as the reference point is proposed. Moreover, according to the formation requirements, each biomimetic robotic fish determines its expected pose in the formation with the estimated reference point information. Thirdly, the biomimetic robotic fish of followers takes the desired speed, angular velocity and the estimated leader pose information as input, and uses the fuzzy controller to determine its speed gear and direction gear, so as to realize formation and maintenance of formations. The simulation and experimental results show that the proposed control method of distributed formation is effective, and the robot fish population can form the desired formation faster and follow the leader.

Keywords: second-order consensus algorithm; distributed estimation; fuzzy controller; multiple biomimetic robotic fish; formation control

0 引言

近年来, 由于水中机器人在海洋地图构建、水中生态监测、军事侦查、水中救援等领域具有广泛的应用前景, 人们针对多水中机器人系统的合作控制问题展开了深入研究, 并在编队控制、群集行为、合作搬运等问题的研究中取得了一定成果^[1-9].

Shao 等^[10] 基于 Leader-Following 方法, 提出了一种实现多移动机器人协作编队控制算法, 同时研究了基于强化学习的多机器鱼合作控制问题^[11]; Sang 等^[12] 研究了基于行为的多机器鱼路径规划; Zhang 等^[13] 通过研究基于任务的行为设计 (Situational-behavior) 和模糊逻辑控制方法, 设计了一种多仿生

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2018-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61663020).

作者简介: 李宗刚(1975—), 男, 教授, 博士, 从事多智能体系统协作控制、仿生机器人等研究; 赵振乾(1989—), 男, 硕士生, 从事仿生机器人的研究.

†通讯作者. E-mail: lizongg@126.com.

机器鱼协作推箱子的方法,并分别通过极限环方法和模糊逻辑方法控制机器鱼的位姿和方向,开发出一种多仿生机器鱼水下协作运输系统^[3];Jia等^[14]基于一致性算法和内部势能函数,研究了单个领航者和零外部输入条件下的多仿生机器鱼分布式群集算法,并且对存在干扰以及动态环境下多仿生机器鱼系统收敛于一致速度和固定距离进行了实验验证;另外,Jia等^[15]在上述多机器人系统中引入具有恒定速率的领航者,在此基础上讨论了具有领航者-跟随者结构的多机器鱼系统的二维蜂拥控制问题,提出了两个分布式协调算法分别实现聚合蜂拥和编队蜂拥;Ren等^[16]研究了基于一致性的一阶系统在单个和多个虚拟领航者情况下一致性编队问题的实现;Yu等^[17-18]也研究指出二阶多智能体系统要达到一致性,除网络拓扑必须含有有向生成树,其拉普拉斯矩阵特征值的实部和虚部也要满足一定的条件;Dong等^[19]研究了基于一致性的二阶系统时变编队控制,并且实现了四旋翼飞行器的圆形编队控制。

本文针对多仿生机器鱼编队控制问题,提出一种分布式的控制算法.假设每条仿生机器鱼只能获得其相邻仿生机器鱼的位姿和速度信息,利用二阶一致性算法对作为编队参考点的领航者信息进行分布式估计,进而利用模糊控制器控制其速度和方向,以保持其在编队中的位姿。

1 分布式多仿生机器鱼编队建模

所考虑多仿生机器鱼系统的信息交换拓扑由有向图 $G = (V, E, A)$ 表示^[20].其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为顶点集; $E = \{(v_i, v_j)\}$ 为边集, $A = [a_{ij}]$ 为邻接矩阵, $a_{ij} \geq 0$ 为边 $\{(v_i, v_j)\}$ 的权重; $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ 为顶点 v_i 的出度; $N_i = \{v_j | (v_i, v_j) \in E\}$ 为 v_i 的邻居集合; $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为图 G 的度矩阵; $L = D - A$ 为 G 的 Laplacian 矩阵,若 G 至少存在一个顶点与其他顶点之间有一条路径,则称图 G 含有生成树,相应顶点称为根节点.设所考虑系统由 n 条仿生机器鱼和 1 个虚拟领航者组成,如图 1 所示。

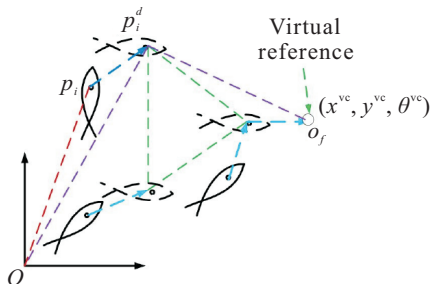


图 1 多仿生机器鱼编队系统示意

图 1 中: $p_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$ 和 $p_i^d = [x_i^d, y_i^d, \theta_i^d]^T$ 分别表示仿生机器鱼 i 的实际位姿和期望位姿, $p^{vc} = [x^{vc}, y^{vc}, \theta^{vc}]^T$ 表示虚拟领航者的位姿。

设虚拟领航者的动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{p}^{vc} = v^{vc}, \\ \dot{v}^{vc} = f(t, p^{vc}, v^{vc}). \end{cases} \quad (1)$$

令仿生机器鱼 i 对领航者位姿信息的估计满足如下动力学方程:

$$\begin{cases} \dot{p}_i^{vc} = v_i^{vc}, & i = 1, 2, \dots, n. \\ \dot{v}_i^{vc} = u_i, \end{cases} \quad (2)$$

其中: p_i^{vc} 和 v_i^{vc} 分别为仿生机器鱼 i 对领航者位姿和速度的估计, u_i 为估计器的输入. 令^[21]

$$u_i = \dot{v}_i^{vc} - \alpha[(p_i^{vc} - p^{vc}) + \gamma(v_i^{vc} - v^{vc})] - \sum_{j \in N_i} a_{ij}[(p_i^{vc} - p_j^{vc}) + \gamma(v_i^{vc} - v_j^{vc})]. \quad (3)$$

其中: $\alpha > 0, \gamma > 0$. 与文献[22]相比,此处利用了二阶一致性算法,使得各仿生机器鱼不仅能够获得虚拟领航者的位置信息,还可获得其速度信息,从而提高了编队的稳定性.相同之处在于,两者均是通过虚拟领航者的分布式估计实现编队形成与保持.设系统(2)位置及速度信息交换图的拉普拉斯矩阵为 L_n ,则由文献[21]可知,如果

$$\gamma > \bar{\gamma} \quad (4)$$

成立,则当 $t \rightarrow \infty$ 时,有

$$p_i^{vc}(t) \rightarrow p^{vc}(t), v_i^{vc}(t) \rightarrow v^{vc}(t), i = 1, 2, \dots, n,$$

且当 $-L_n$ 的所有 $n-1$ 非零特征值都为负数时, $\bar{\gamma} \triangleq 0$; 否则

$$\bar{\gamma} \triangleq$$

$$\max_{\substack{\text{Re}(\nu_i) < 0 \\ \text{Im}(\nu_i) > 0}} \sqrt{\frac{2}{|\nu_i| \cos\left(\tan^{-1} \frac{\text{Im}(\nu_i)}{-\text{Re}(\nu_i)}\right)}}. \quad (5)$$

其中: μ_i 为 $-L_n$ 的第 i 个特征值, $\nu_i \triangleq -\alpha + \mu_i$.

由于虚拟领航者是多仿生机器鱼编队的参考点,即仿生机器鱼 i 可利用其所估计到的虚拟领航者位姿信息,根据编队要求确定其下一时刻的期望位姿.为此,首先需要对以领航者为参考点的编队队形进行定义,如图 2 所示.其中: $p_i^{vc} = [x_i^{vc}, y_i^{vc}, \theta_i^{vc}]^T$ 为仿生机器鱼 i 所估计的虚拟领航者位姿, (D_i^d, φ_i^d) 为所估计的领航者位姿在仿生机器鱼 i 期望位姿随体坐标系 $x_f^i o_f^i y_f^i$ 中的极坐标,即有

$$\begin{cases} x_i^d = x_i^{yc} - D_i^d \cos(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}), \\ y_i^d = y_i^{yc} - D_i^d \sin(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}), \\ \theta_i^d = \theta_i^{yc}. \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明, 每条仿生机器鱼在编队中的期望位姿可由其所估得的虚拟领航者位姿根据编队要求唯一确定. 每条仿生机器鱼仅能依据局部信息估得编队参考点, 因此所考虑的编队算法是分布式的.

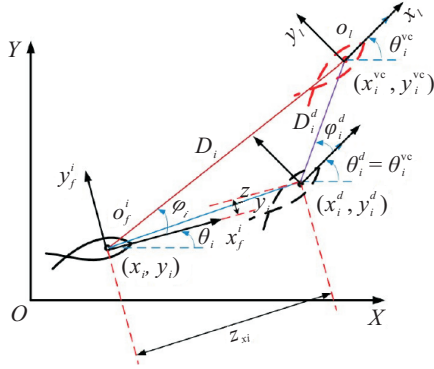


图2 仿生机器鱼*i*与虚拟领航者之间的位置关系

到此为止, 所考虑的编队问题转化为每条仿生机器鱼由当前位姿游动到期望位姿的路径规划问题. 由以上分析可知, 仿生机器鱼*i*的期望位姿与其当前位姿之间的误差为

$$\begin{cases} \bar{x}_i = x_i^{yc} - D_i^d \cos(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}) - x_i, \\ \bar{y}_i = y_i^{yc} - D_i^d \sin(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}) - y_i, \\ \bar{\theta}_i = \theta_i^{yc} - \theta_i. \end{cases} \quad (7)$$

需要说明的是, 实验设备为三关节仿鲹科机器鱼, 其随体坐标系 x_f^i, y_f^i 的原点位于仿生机器鱼刚性头部和柔性身体的结合面上, $o_f^i x_f^i$ 轴沿体轴方向指向头部, $o_f^i y_f^i$ 轴垂直于 $o_f^i x_f^i$ 轴指向鱼体左侧, 鱼体质心位于 $o_f^i x_f^i$ 轴, 与原点 o_f^i 之间的距离为 R . 设仿生机器鱼*i*质心在全局坐标系中的位姿为 $(x_{ci}, y_{ci}, \theta_i)$, 则有

$$\begin{cases} x_i = x_{ci} + R \cos \theta_i, \\ y_i = y_{ci} + R \sin \theta_i. \end{cases} \quad (8)$$

在实验中, 所用仿生机器鱼以质心处的速度和角速度为控制变量. 考虑到仿生机器鱼满足非完整约束, 故可取其质心动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ci} = v_i \cos \theta_i, \\ \dot{y}_{ci} = v_i \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i, \end{cases} \quad (9)$$

其中 v_i 和 ω_i 分别为仿生机器鱼*i*的游动速度大小和角速度, 则由式(8)和(9)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i - \omega_i R \sin \theta_i, \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i + \omega_i R \cos \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i. \end{cases} \quad (10)$$

式(7)对时间 t 求导后, 将式(10)代入可得

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i = \bar{v}_i^{yc} \cos \bar{\theta}_i - v_i \cos \theta_i + R \dot{\theta}_i \sin \theta_i + \\ D_i^d \sin(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}) \dot{\theta}_i^{yc}, \\ \dot{\bar{y}}_i = \bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i - v_i \sin \theta_i - R \dot{\theta}_i \cos \theta_i - \\ D_i^d \cos(\varphi_i^d + \theta_i^{yc}) \dot{\theta}_i^{yc}, \\ \dot{\bar{\theta}}_i = \omega_i^{yc} - \omega_i, \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\bar{v}_i^{yc} = \sqrt{(\dot{x}_i^{yc})^2 + (\dot{y}_i^{yc})^2}$. 在方程(11)的前两式中, 并不显含角度误差 $\bar{\theta}_i$. 为此, 引入如下变换:

$$\begin{bmatrix} z_{xi} \\ z_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & -\cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由式(12)可知, 当 $[\bar{x}_i, \bar{y}_i]^T \rightarrow 0$ 时, 必有 $[z_{xi}, z_{yi}]^T \rightarrow 0$. 将式(12)对时间 t 求导, 并将式(11)代入可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{xi} = \\ -v_i + \bar{v}_i^{yc} \cos \bar{\theta}_i - z_{yi} \omega_i + D_i^d \omega_i^{yc} \sin(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i), \\ \dot{z}_{yi} = \\ -\bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i + z_{xi} \omega_i + R \omega_i + D_i^d \omega_i^{yc} \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i), \\ \dot{\bar{\theta}}_i = \omega_i^{yc} - \omega_i. \end{cases} \quad (13)$$

为了使得 $t \rightarrow \infty$ 时, $[z_{xi}, z_{yi}]^T \rightarrow 0, \bar{\theta}_i \rightarrow 0$, 取仿生机器鱼*i*的速度大小和角速度分别为

$$\begin{cases} v_i = \bar{v}_i^{yc} \cos \bar{\theta}_i + k_1 z_{xi} + D_i^d \omega_i^{yc} \sin(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i), \\ \omega_i = \frac{1}{R} [\bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i - k_2 z_{yi} - D_i^d \omega_i^{yc} \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i)], \end{cases} \quad (14)$$

其中 $k_1, k_2 \in R^+$. 由式(12)和图2可知, (z_{xi}, z_{yi}) 还可写为

$$\begin{cases} z_{xi} = D_i \cos \varphi_i - D_i^d \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i), \\ z_{yi} = D_i \sin \varphi_i - D_i^d \sin(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i), \end{cases} \quad (15)$$

其中 φ_i 为仿生机器鱼*i*随体坐标系 x_f^i 轴与线段 $o_f^i o_l$ 之间的夹角. 将式(15)代入(14), 可得

$$\begin{cases} v_i = \bar{v}_i^{yc} \cos \bar{\theta}_i + D_i^d \omega_i^{yc} \sin(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i) + \\ k_1 (D_i \cos \varphi_i - D_i^d \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i)), \\ \omega_i = \frac{1}{R} [\bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i - D_i^d \omega_i^{yc} \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i) - \\ k_2 (D_i \sin \varphi_i - D_i^d \sin(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i))]. \end{cases} \quad (16)$$

以下证明当仿生机器鱼*i*的速度和角速度由式(16)给定时, 误差系统(13)稳定, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $[z_{xi}, z_{yi}]^T \rightarrow 0$, 且方向误差 $\bar{\theta}_i$ 有界. 需要指出的是,

由于物理限制,整个编队的速度和角速度均是有限的,且不超过仿生机器鱼的极限速度和角速度,即 $0 < \bar{v}_i^{yc} < \bar{v}_i^{\max}, \|\omega_i^{yc}\| < K, K \in R^+$ 成立. 设 $\bar{\theta}_i(0) \in [-\pi, \pi]$, 将式(14)代入(13), 则

$$\begin{cases} \dot{z}_{xi} = -k_1 z_{xi} - z_{yi} \omega_i, \\ \dot{z}_{yi} = z_{xi} \omega_i - k_2 z_{yi}, \\ \dot{\bar{\theta}}_i = \\ \omega_i^{yc} - \frac{1}{R} [\bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i - k_2 z_{yi} - D_i^d \omega_i^{yc} \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i)]. \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} \dot{z}_{xi} = -k_1 z_{xi} - z_{yi} \omega_i, \\ \dot{z}_{yi} = z_{xi} \omega_i - k_2 z_{yi} \end{cases} \quad (18)$$

为位置误差系统, $[z_{xi}, z_{yi}] = [0, 0]$ 为其平衡点. 对式(18)取Lyapunov函数为

$$V(t) = \frac{1}{2}(z_{xi}^2 + z_{yi}^2). \quad (19)$$

显然 $V \geq 0$, 且当 $z_{xi} = 0, z_{yi} = 0$ 时, $V = 0$. 式(19)对时间 t 求导, 并将(17)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= z_{xi} \dot{z}_{xi} + z_{yi} \dot{z}_{yi} = \\ &= -k_1 z_{xi}^2 - k_2 z_{yi}^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

且当 $[z_{xi}, z_{yi}] = [0, 0]$ 时, 有 $\dot{V}(t) = 0$. 因此, 位置误差系统(18)是稳定的. 下面证明 $\bar{\theta}_i$ 是有界的. 式(17)中最后一项可写为

$$\dot{\bar{\theta}}_i = -\frac{1}{R} \bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i + \xi(z_{yi}, \bar{\theta}_i). \quad (21)$$

其中

$$\xi(z_{yi}, \bar{\theta}_i) = \frac{1}{R} k_2 z_{yi} - \frac{D_i^d}{R} \omega_i^{yc} \cos(\varphi_i^d + \bar{\theta}_i) + \omega_i^{yc}.$$

由 $\frac{1}{R} k_2 z_{yi} \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 及 $\|\omega_i^{yc}\| < K$ 可知, $\xi(z_{yi}, \bar{\theta}_i)$ 有界, 即 $\xi(z_{yi}, \bar{\theta}_i) \leq \bar{K}$. 同时, 式(21)中第一部分可写为

$$\dot{\bar{\theta}}_i = -\frac{1}{R} \bar{v}_i^{yc} \sin \bar{\theta}_i. \quad (22)$$

由于 $\|\bar{\theta}_i(0)\| < \pi$ 和 $\bar{v}_i^{yc} > 0$, 式(22)是渐近稳定的. 从

而由稳定性理论, 方向误差 $\bar{\theta}_i$ 是有界的.

由于水环境受外界因素影响比较大, 且在水中机器鱼的位姿控制也比较困难, 因此采用由式(16)给定的控制律并不能保证机器鱼精确跟踪其期望位姿. 鉴于模糊控制器在路径规划以及在抑制不确定性方面的优势^[23-24], 采用其对机器鱼的游动姿态进行优化, 以期实现多仿生机器鱼编队的精确控制.

2 仿生机器鱼模糊控制器设计

在所考虑的编队控制问题中, 所采用的仿生机器鱼由刚性头部、3个柔性身体关节和尾鳍组成, 该机器鱼通过拟合鱼体波产生的行波推进, 其体波方程^[25]为

$$y_{\text{body}}(x, t) = A(x) \sin(kx + \omega t). \quad (23)$$

其中: y_{body} 是鱼体的横向位移(背腹轴); x 是鱼体的轴向位移(头尾轴); k 是波长倍数 ($k = 2\pi/\lambda$); λ 是鱼体波的波长; $A(x) = c_1 x + c_2 x^2$ 是波幅, c_1 是鱼体波波幅包络线的一次项系数, c_2 是鱼体波波幅包络线的二次项系数; ω 是鱼体波频率 ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$). 为了实现对身体波方程曲线的实时拟合, 各关节的运动控制方程为

$$\psi_i^j(t) = \phi_i^j(t) + A_i^j(t) \sin(2\pi f_i^j(t) + \varphi_i^j). \quad (24)$$

其中: $j = 1, 2, 3$ 表示第 j 个关节; $\psi_i^j(t)$ 表示仿生机器鱼 i 在时间 t 时关节 j 的角位移; $A_i^j(t)$ 和 $f_i^j(t)$ 分别表示关节摆幅和摆动频率; $\phi_i^j(t)$ 表示关节角度偏移量; φ_i^j 表示滞后角, 且滞后角满足 $\varphi_i^2 - \varphi_i^1 = 0.698$, $\varphi_i^3 - \varphi_i^1 = 2.513, i = 1, 2, \dots, n$. 机器鱼的游速由 $A_i^j(t)$ 和 $f_i^j(t)$ 决定, 转弯方向由 $\phi_i^j(t)$ 决定.

依据式(23)和(24), 确定了机器鱼的15个速度档位, 以及15个转弯方向档位, 通过选择合适的档位即可实现机器鱼的直线游动与转弯. 基于此, 根据编队要求, 设计两个模糊控制器分别对机器鱼下一时刻的速度档位和方向档位进行合理选择, 以实现期望位姿的精确跟踪, 如图3所示.

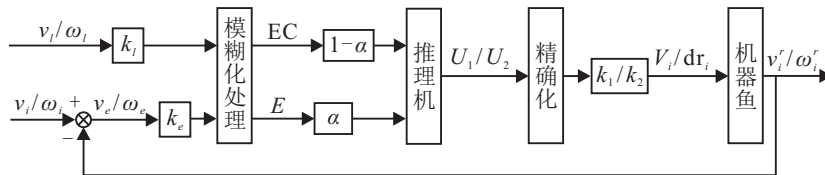


图3 速度/角速度模糊控制器结构

图3中: v_i/ω_i 是机器鱼通过式(16)所得期望速度/角速度, v_i^r/ω_i^r 是通过视觉系统获取的机器鱼当前实际游速/角速度, v_e/ω_e 是速度/角速度偏差, v_i 和

ω_i 是虚拟领航者的速度和角速度, $k_e, k_1, k_1(k_2)$ 是量化因子, $\alpha \in (0, 1)$ 是权重因子, E 是速度/角速度偏差的模糊值, EC 是虚拟领航者速度/角速度的模糊

值, U_1/U_2 是速度/角速度档位的模糊值, V_i/dr_i 是量化后获得的速度档/方向档. 下面分别给出速度、角速度模糊控制器的控制规则.

在速度模糊控制器中, 输入变量 v_e 和 v_l 的模糊集合均表示为 {NB, NS, ZE, PS, PB}, 分别表示负大、负小、合适、正小、正大, 它们的变化范围根据机器鱼实际情况取为 $v_e \in [-40, 40]$, $v_l \in [0, 40]$, 隶属度函数分别由图4和图5给出. 输出变量 V_i 的模糊集合表示为 {NB, NS, ZE, PS, PB}, 分别表示小、较小、中等、较大、大, 其变化范围与速度档位相一致, 取为 $V_i \in [0, 14]$, 隶属度函数由图6给出. 相应的控制规则库由表1给出.

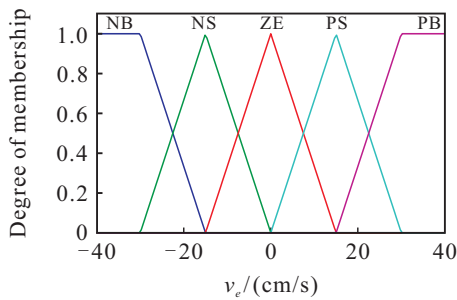


图4 速度偏差输入隶属度函数

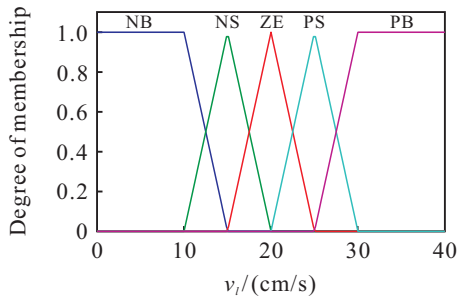


图5 领航者速度输入隶属度函数

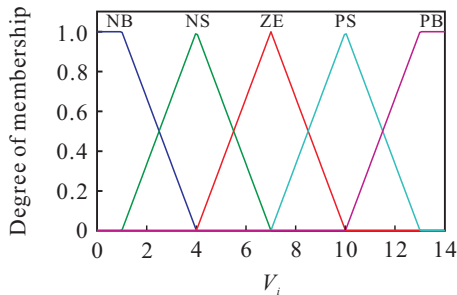


图6 速度档位输出隶属度函数

表1 速度控制器的模糊规则表

$v_e(t)$	v_l				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

在角速度模糊控制器中, 输入变量 ω_e 和 ω_l 的模

糊集合也表示为 {NB, NS, ZE, PS, PB}, 分别表示负大、负小、零、正小、正大, 变化范围分别为 $\omega_e \in [-0.8, 0.8]$, $\omega_l \in [-0.4, 0.4]$, 隶属度函数分别由图7和图8给出. 输出变量 dr_i 的模糊集合为 {NB, NS, ZE, PS, PB}, 分别表示负大、负小、零、正小、正大, 其变化范围为 $[-7, 7]$, 隶属度函数如图9所示, 所对应的模糊规则库由表2给出.

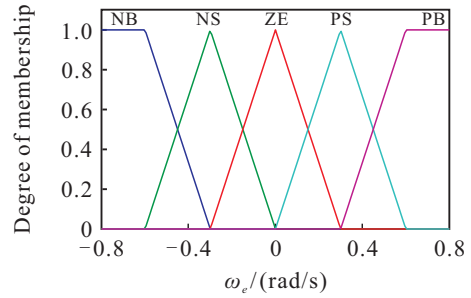


图7 角速度偏差输入隶属度函数

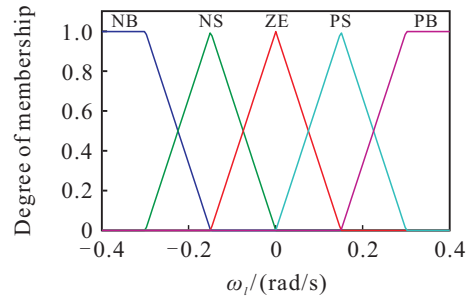


图8 领航者角速度输入隶属度函数

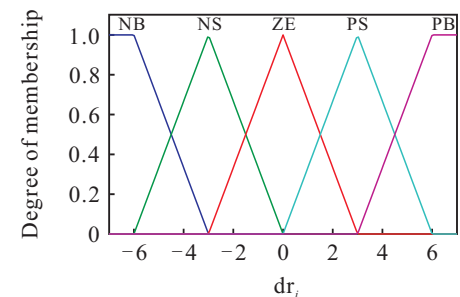


图9 方向档位输出隶属度函数

表2 角速度控制器的模糊规则表

$dr_i(t)$	ω_l				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

当采用上述模糊控制器得到速度档和方向档位模糊值后, 通过“重心法”去模糊获得速度档位和方向档位的精确值, 如下式所示:

$$V_i(t) = \frac{\sum_{k=1}^{25} \mu_k V_i(t)^k}{\sum_{k=1}^{25} \mu_k}, \quad (25)$$

$$dr_i = \sum_{k=1}^{25} \mu_k dr_i^k / \sum_{k=1}^{25} \mu_k \quad (26)$$

其中: μ_k 为第 k 条规则“IF”部分的激活度, $V_i(t)^k$ 、 dr_i^k 为从第 k 条规则得到的输出.

3 仿真

本节通过仿真实验验证所提算法. 考虑由6条机器鱼组成的多机器鱼系统的编队问题, 其中一条仿生机器鱼为领航者, 其位姿和速度信息作为参考信息, 其余各仿生机器鱼作为跟随者, 利用所提控制算法和编队要求确定其位姿, 最终形成期望的队形, 跟随领航者机器鱼协同运动. 仿生机器鱼间的通信拓扑如图10所示.

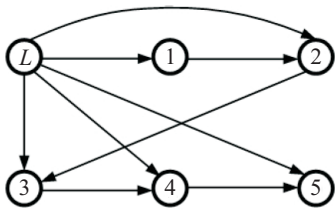


图10 仿生机器鱼编队通信拓扑图

由式(2)和(3)可知, 多机器鱼系统的动力学方程可写为

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{p}} \\ \dot{\tilde{v}} \end{bmatrix} = [\Sigma \otimes I_m] \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} \quad (27)$$

其中

$$\tilde{p}_i \triangleq p_i^{vc} - p^{vc},$$

$$\tilde{v}_i \triangleq v_i^{vc} - v^{vc},$$

$$\tilde{p} \triangleq [\tilde{p}_1^T, \dots, \tilde{p}_n^T]^T,$$

$$\tilde{v} \triangleq [\tilde{v}_1^T, \dots, \tilde{v}_n^T]^T,$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_n \\ -\alpha I_n - L_n & -\gamma(\alpha I_n + L_n) \end{bmatrix},$$

取 $\alpha = 2, \gamma = 1$. 记第 i 条机器鱼的初始状态为

$$p_i(0) = (x_i(0), y_i(0), v_{xi}(0), v_{yi}(0), \theta_i(0), \omega_i(0)).$$

考虑多仿生机器鱼系统的正五边形编队问题, 其队形描述如图11所示. 各机器鱼的初始位置随机产生. 领航者机器鱼的速度为 $v^{vc} = 20\sqrt{2}$ cm/s, 角速度为 $\omega^{vc} = \cos x$, 取 $k_1 = 0.2, k_2 = 0.2$, 则仿生机器鱼五边形编队过程中各变化曲线如图12~图18所示(图13~图18的图列与图12相同). 图12表示5条跟随者机器鱼最终形成并保持正五边形编队, 并以编队形式整体跟随领航者机器鱼进行运动; 图13表示5条跟随者机器鱼形成编队过程中期望速度的变化曲线; 图14表示其期望角速度变化曲线, 两图中各机器

鱼速度或角速度差异是跟随领航者运动过程中为保持编队队形所产生的; 图15表示5条跟随者机器鱼对领航者机器鱼的位置估计, 可见各机器鱼在5s左右就领航者位置达成一致; 图16表示5条跟随者机器鱼对领航者机器鱼速度和角速度的估计, 可见在3s左右, 所有跟随者就领航者速度和角速度达成一致; 图17表示5条跟随者机器鱼所估得的领航者机器鱼方向, 在5s左右即达成一致, 与前述各图所得结果是一致的; 图18表示机器鱼编队过程中模糊控制速度档位输出变化曲线和模糊控制方向档位输出变化.

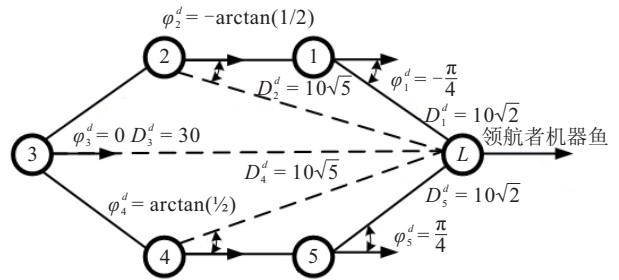


图11 仿生机器鱼五边形编队描述图

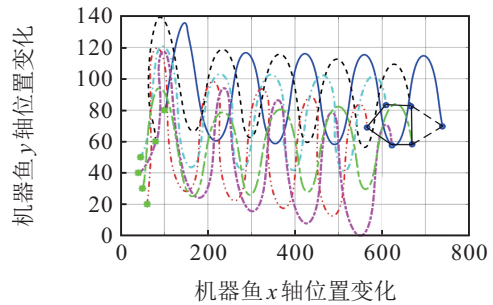


图12 机器鱼五边形编队位置变化曲线

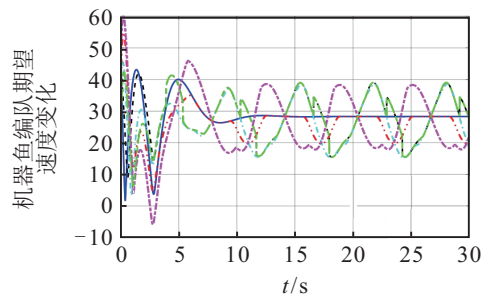


图13 机器鱼编队期望速度变化曲线

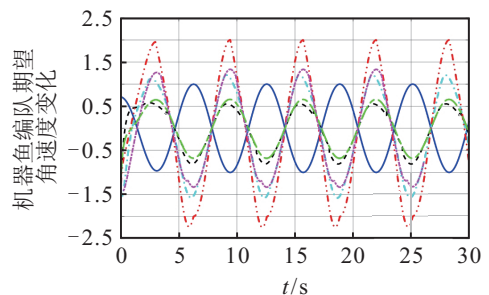


图14 机器鱼编队期望角速度变化曲线

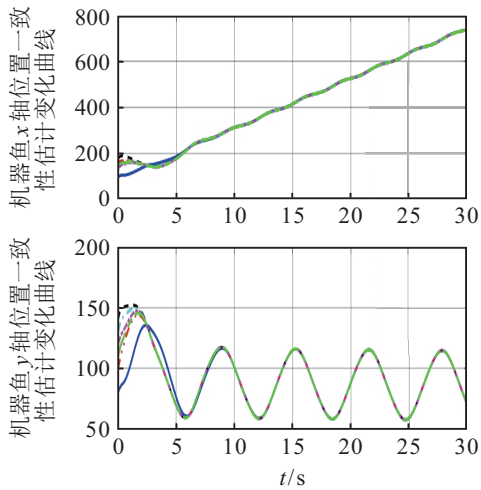


图15 机器鱼编队一致性估计位置变化曲线

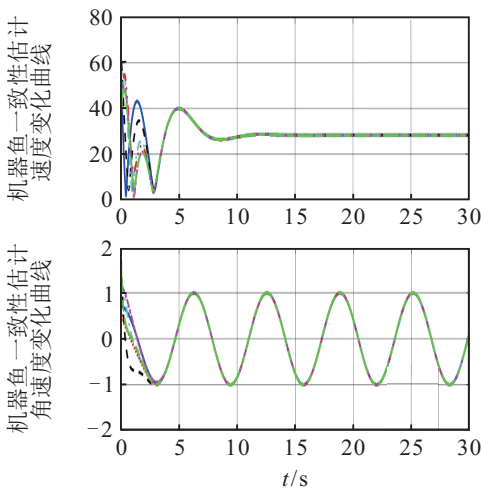


图16 机器鱼编队一致性估计速度和角速度变化曲线

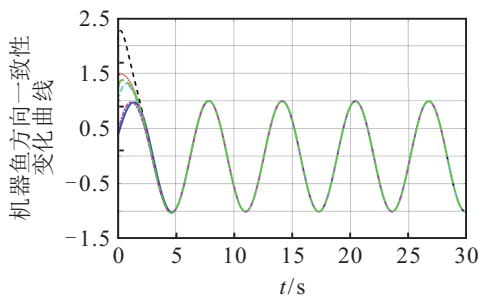


图17 机器鱼编队一致性估计方向变化曲线

其次,考虑多机器鱼系统的圆形编队问题,其队形描述如图19所示.各仿生机器鱼的初始位置随机产生,领航者机器鱼的速度为 $v^{vc} = 0$,角速度为 $\omega^{vc} = 1 \text{ rad/s}$,取 $k_1 = 0.01, k_2 = 0.01$,则仿生机器鱼圆形编队过程中各变化曲线如图20~图26所示(图21~图26的图例与图20相同).图20表示5条跟随者机器鱼最终形成并保持圆形编队,并以编队形式整体跟随领航者机器鱼进行运动;图21表示5条跟随者机器鱼形成圆形编队过程中期望速度的变化曲线;图22表示其期望角速度变化曲线,两图中各机器鱼速

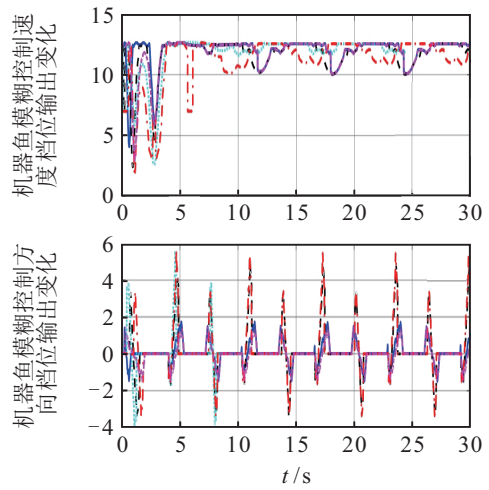


图18 机器鱼编队模糊控制速度档位和方向档位输出变化曲线

度或角速度差异是跟随领航者运动过程中为保持编队队形所产生的;图23表示5条跟随者机器鱼对领航者机器鱼的位置估计,由图可见各机器鱼在10s左右就领航者机器鱼位置达成一致;图24表示5条跟随者机器鱼对领航者机器鱼速度和角速度的估计,可见在5s左右,所有跟随者就领航者速度和角速度达成一致;图25表示5条跟随者机器鱼所估得的领航者机器鱼方向,在3s左右方向与领航者机器鱼达成一致,与前述各图所得结果是一致的;图26表示机器鱼编队过程中模糊控制速度档位输出变化曲线和模糊控制方向档位输出变化.

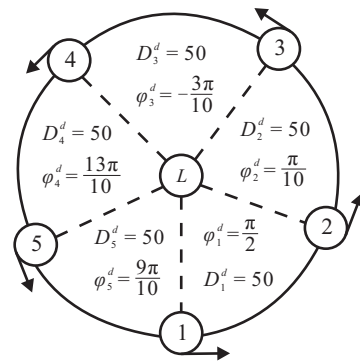


图19 仿生机器鱼圆形编队描述图

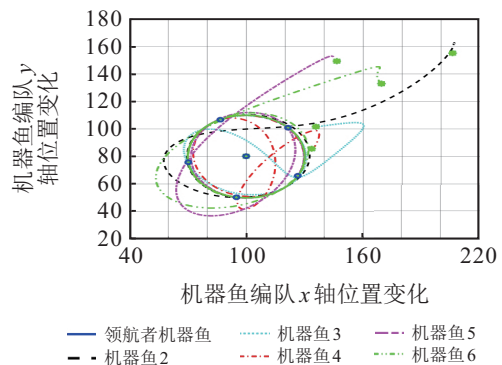


图20 机器鱼圆形编队位置变化曲线

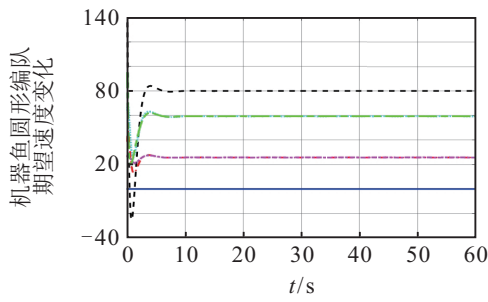


图 21 机器鱼圆形编队期望速度变化曲线

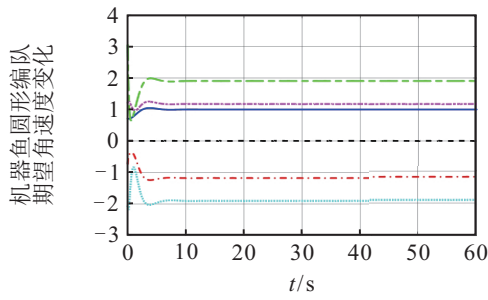


图 22 机器鱼圆形编队期望角速度变化曲线

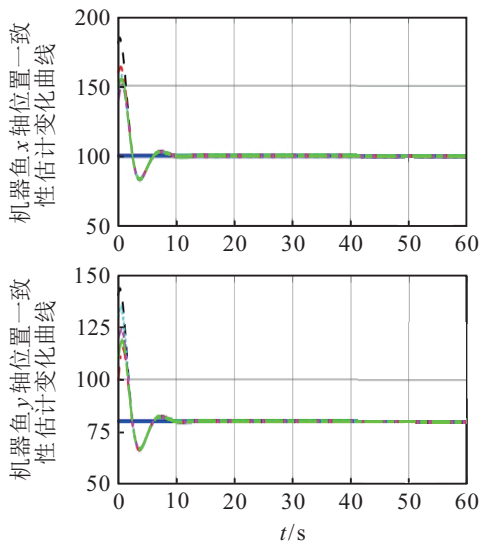


图 23 机器鱼圆形编队一致性估计位置变化曲线

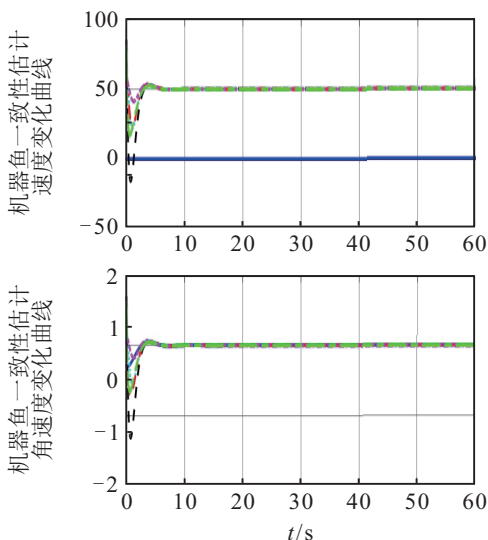


图 24 机器鱼圆形编队一致性估计速度和角速度变化曲线

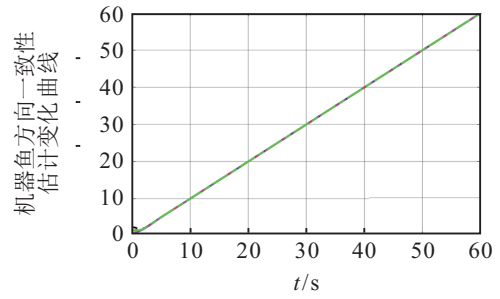


图 25 机器鱼圆形编队一致性估计方向变化曲线

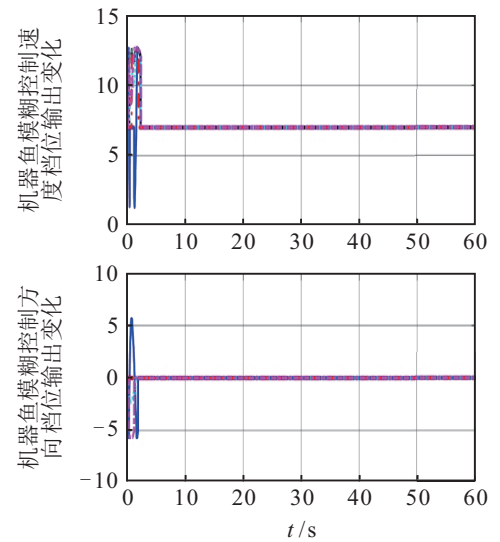


图 26 机器鱼圆形编队模糊控制速度档位和方向档位输出变化曲线

4 实体实验

本小节通过实体实验对所提算法进行验证. 实验环境为3m × 2m × 0.3m的室内水池,水池左上角为坐标原点,仿生机器鱼初始位置根据队形需要随机布置. 需要说明的是,由于条件限制,目前所用平台实验环境是集中式的,实验环境如图27所示. 在实验中,每条机器鱼根据系统的通信拓扑关系对全局信息进行取舍,以模拟数据的分布式获取.



图 27 实体实验环境

4.1 三角形编队实验

本实验中,仿生机器鱼初始位置在水池左侧随机布置,通信拓扑如图10所示. 设定实验最终形成边

长为40 cm的等边三角形编队,仿生机器鱼1可作为领航者机器鱼,设定领航者机器鱼的运动轨迹为 $y = 180 \times \sin(\pi/560 \times x)$. 领航者的速度选为6档,即 $\bar{v}^{vc} = 21.5 \text{ cm/s}$;角速度初始档选为0档,即 $\omega^{vc} = 0$. 可设定跟随者仿生机器鱼1和2在式(16)中期望速度和期望加速度的各参数,有 $D_1^d = 40 \text{ cm}$, $\varphi_1^d = \pi/6$, $D_2^d = 40 \text{ cm}$, $\varphi_2^d = -\pi/6$,取 $k_1 = 0.2$, $k_2 = 0.2$. 式(16)中其余各参数在实验过程中实时采集得到. 图28给出了三角形编队过程中的3条仿生机器鱼的实际运动轨迹. 从图28可以看出,仿生机器鱼在游动的过程中,在3s左右形成了固定的三角形编队,编队过程中各跟随者机器鱼能够调整各自的速度和方向以保证编队的保持,从而能够实时地跟踪其期望轨迹形成和保持固定编队稳定游动.

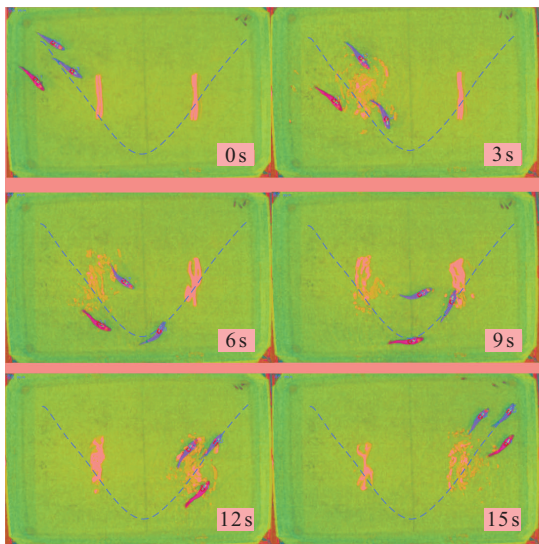


图28 仿生机器鱼三角形编队实体实验

以下为实体环境中多机器鱼编队的位置与速度以及角速度的变化曲线,图29~图32分别给出了编队中各仿生机器鱼实际运动轨迹的位置和速度变化曲线. 从图中可以看出,该编队中各仿生机器鱼之间的相对位置误差呈递减趋势,最终位置误差收敛到5~10 cm的范围内,仿生机器鱼编队的速度误差也呈递减趋势,速度误差收敛到1.5~3 cm/s的范围.

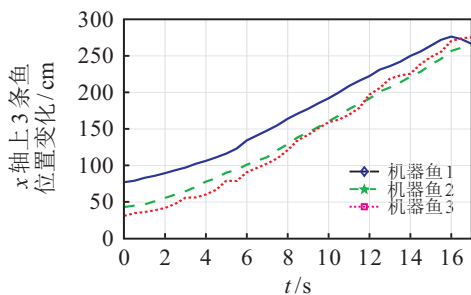


图29 x轴方向仿生机器鱼位置变化

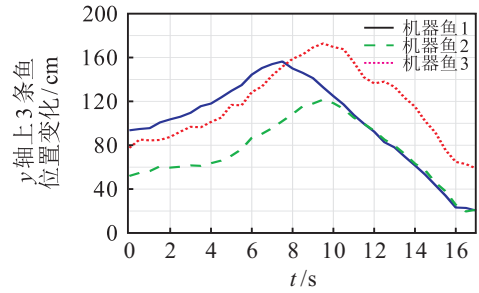


图30 y轴方向仿生机器鱼位置变化

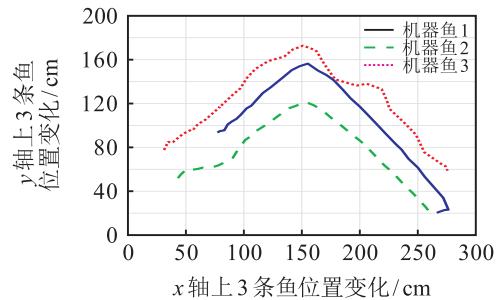


图31 全局坐标下仿生机器鱼位置变化

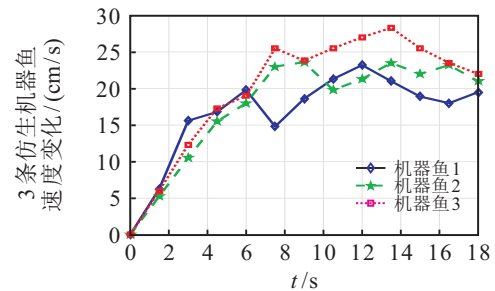


图32 仿生机器鱼速度变化

图33为3条仿生机器鱼角速度变化,仿生机器鱼的角速度最终收敛到0 rad/s左右. 图34~图37为仿生机器鱼三角形编队运动过程中模糊控制器的输入及输出变化.

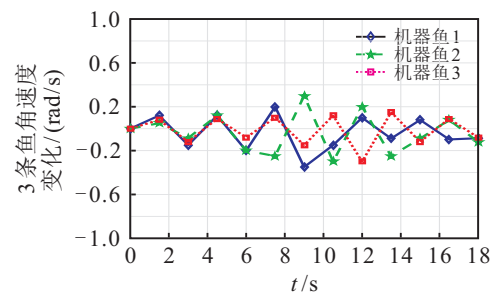


图33 仿生机器鱼角速度变化

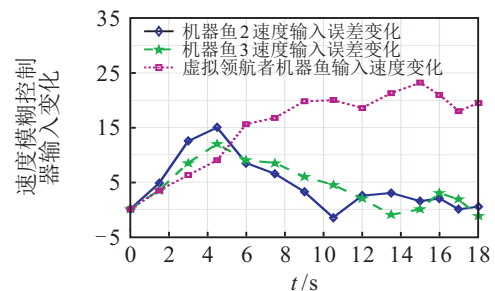


图34 机器鱼速度模糊控制器输入变化

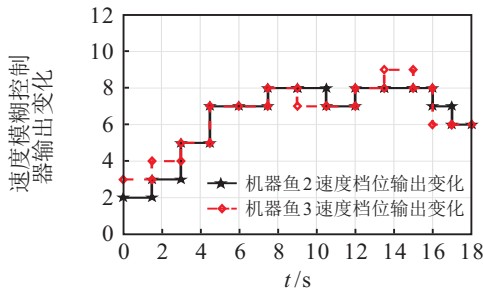


图 35 机器鱼模糊控制器速度档位输出变化

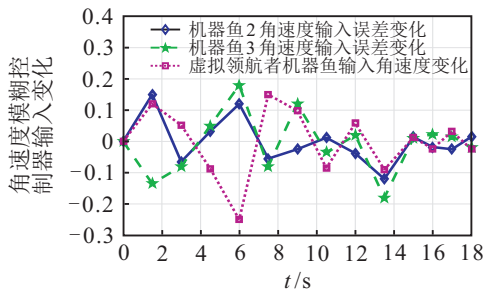


图 36 机器鱼角速度模糊控制器输入变化

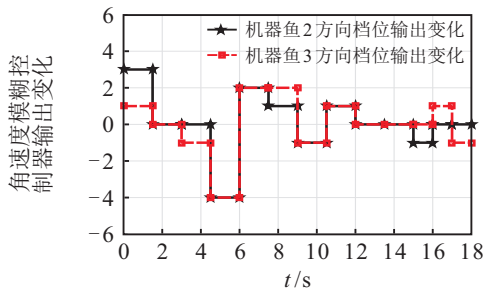


图 37 机器鱼模糊控制器方向档位输出变化

4.2 圆形编队实验

本实验中,机器鱼在水池中央随机布置,通信拓扑如图 10 所示.实验设定为领航者机器鱼的速度档位选为 4,即 $\bar{v}^{vc} = 12.75 \text{ cm/s}$;方向档位取 -2 档,即 $\omega^{vc} = -0.085 \text{ rad/s}$.圆形轨迹半径为 80 cm,圆心坐标为 (140, 96),从而有 $D_1^d = D_2^d = D_3^d = 80 \text{ cm}$. $\varphi_1^d = -3\pi/10$, $\varphi_2^d = \pi/10$, $\varphi_3^d = \pi/2$,取 $k_1 = 0.01$, $k_2 = 0.01$.式 (16) 中其余各参数在实验过程中实时采集得到.图 38 给出了圆形编队过程中的 3 条仿生机器鱼的实际运动轨迹.从图 38 可以看出,仿生机器鱼在游动的过程中,在 18 s 左右进入圆形轨道形成圆形编队,各跟随者机器鱼能够实时地跟踪其期望轨迹,从而形成和保持固定编队稳定游动.

图 39~图 42 分别给出了圆形编队中各仿生机器鱼实际运动轨迹的位置和速度变化曲线.从图中可以看出,该编队中各仿生机器鱼之间的相对位置误差呈递减趋势,最终位置误差收敛到 5~10 cm 的范围内,仿生机器鱼编队的速度误差也呈递减趋势,速度误差收敛到 0.5~1.5 cm/s 的范围.

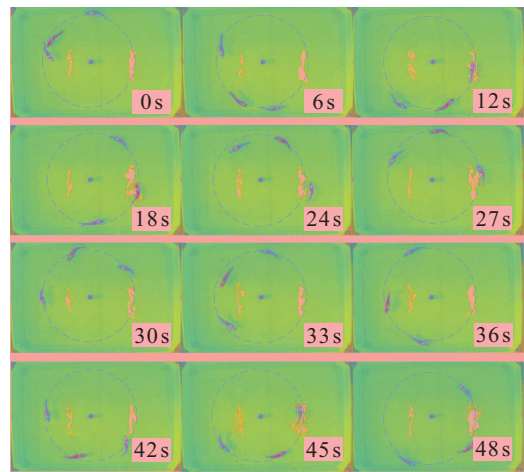


图 38 仿生机器鱼圆形编队实体实验

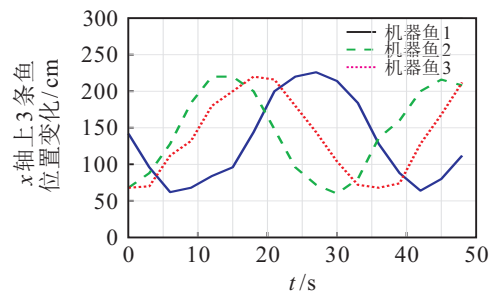


图 39 x轴方向仿生机器鱼位置变化

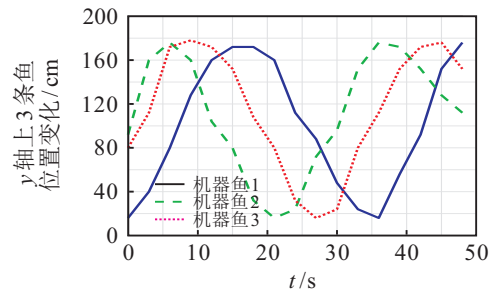


图 40 y轴方向仿生机器鱼位置变化

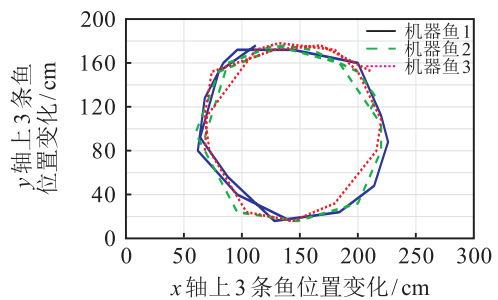


图 41 全局坐标下仿生机器鱼位置变化

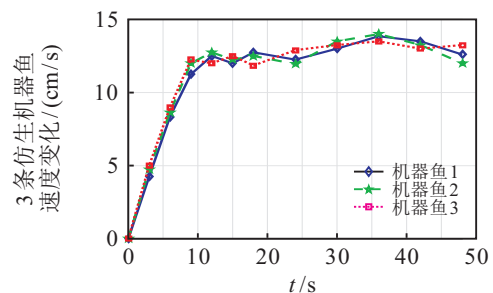


图 42 仿生机器鱼速度变化

图43为3条仿生机器鱼角速度变化,仿生机器鱼的角速度最终收敛到 -0.08 rad/s 左右. 图44~图47为仿生机器鱼圆形编队运动过程中模糊控制器的输入及输出变化.

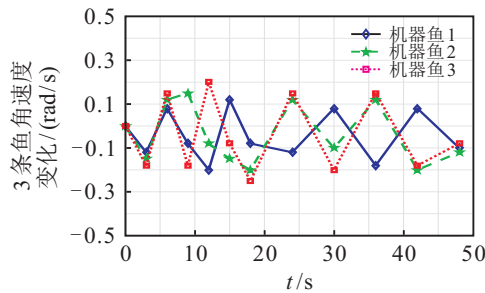


图 43 仿生机器鱼角速度变化

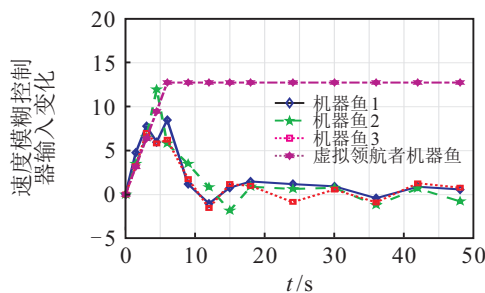


图 44 机器鱼速度模糊控制输入变化

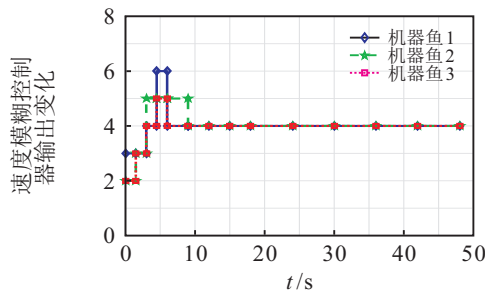


图 45 机器鱼模糊控制方向档位输出变化

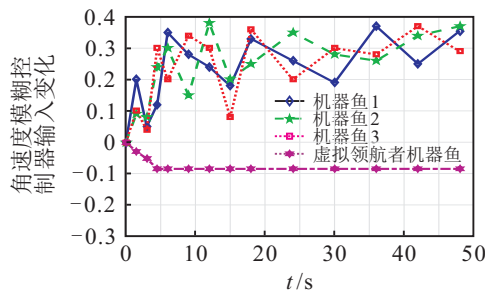


图 46 机器鱼模糊控制角速度输入变化

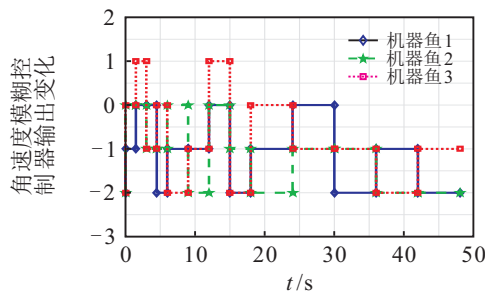


图 47 机器鱼模糊控制方向档位输出变化

5 结论

本文针对动态领航者按照自身动力学模型运动,多个跟随者机器鱼以其为编队参考点,根据编队要求形成队形并整体跟随领航者运动的问题,提出了一种多仿生机器鱼分布式编队控制方案. 所提算法由3部分组成:一是分布式估计算法,即利用二阶一致性算法实现了跟随者机器鱼对领航者位姿信息的估计;二是基于动态参考点的编队描述方法,即每个跟随者机器鱼仅根据与参考点的位姿关系确定其在编队中的位姿;三是各跟随者机器鱼位姿的精确控制,利用模糊控制器在处理不确定性信息方面的优势,实现了各机器鱼形成和保持队形所需期望速度和角速度的实时计算,以及其速度档和方向档的确定. 仿真和实验结果均表明,所提方法能够实现多仿生机器鱼的分布式编队控制.

需要说明的是,实体实验中通过信息舍取实现分布式算法的验证还存在一定的不足. 在后续工作中将以自主机器鱼为载体,对所提算法进行实体实验验证和改进.

参考文献(References)

- [1] Zhang Y, Streitlien K, Bellingham J G, et al. Acoustic doppler velocimeter flow measurement from an autonomous underwater vehicle with applications to deep ocean convection[J]. J of Atmospheric & Oceanic Technology, 2001, 18(12): 2038-2051.
- [2] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups[C]. Proc of the Conf on Decision and Control. Xi'an: IEEE, 2001: 2968-2973.
- [3] Zhang D, Wang L, Yu J, et al. Coordinated transport by multiple biomimetic robotic fish in underwater environment[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2007, 15(4): 658-671.
- [4] Zhang D, Wang L, Yu J. Geometric topology based cooperation for multiple robots in adversarial environments[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(9): 1092-1100.
- [5] Shao J, Yu J, Wang L. Formation control of multiple biomimetic robotic fish[C]. Int Conf on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 2503-2508.
- [6] Zou K, Wang C, Xie G, et al. Cooperative control for trajectory tracking of robotic fish[C]. Proc of the American Control Conf. St. Louis: IEEE, 2009: 5504-5509.
- [7] Zhao W, Hu Y, Wang L. Leader-following formation control of multiple vision-based autonomous robotic

- fish[C]. Proc of the 48h IEEE Conf on Control and Decision. Shanghai: IEEE, 2009: 579-584.
- [8] 张瑞雷, 李胜, 陈庆伟. 一类非完整移动机器人编队控制方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1751-1755.
(Zhang R L, Li S, Chen Q W. Formation control for a kind of nonholonomic mobile robots[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1751-1755.)
- [9] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613.
(Wang X K, Li X, Zheng Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613.)
- [10] Shao J, Xie G, Yu J, et al. Leader-following formation control of multiple mobile robots[C]. Proc of the 2005 IEEE Int Symposium on Mediterrean Conf on Control and Automation Intelligent Control. Limassol: IEEE, 2005: 808-813.
- [11] Shao J, Wang L. Cooperation of multiple fish-like microrobots based on reinforcement learning[C]. IEEE Symposium on Artificial Life. Hoaolulu: IEEE, 2007: 348-354.
- [12] Sang H, Wang S, Tan M, et al. Research on patrol algorithm of multiple behavior-based robot fish[J]. Int J of Offshore & Polar Engineering, 2005, 15(1): 1-6.
- [13] Zhang D, Fang Y, Xie G, et al. A coordination method for multiple biomimetic robotic fish box-pushing[C]. IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Nagara: IEEE, 2005: 940-945.
- [14] Jia Y, Zhang W. Distributed adaptive flocking of robotic fish system with a leader of bounded unknown input[J]. Int J of Control Automation & Systems, 2014, 12(5): 1049-1058.
- [15] Jia Y, Wang L. Experimental implementation of distributed flocking algorithm for multiple robotic fish[J]. Control Engineering Practice, 2014, 30(9): 1-11.
- [16] Ren W, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [17] Yu W, Chen G, Cao M. Some necessary and sufficient conditions for second-order consensus in multi-agent dynamical systems[J]. Automatica, 2010, 46(6): 1089-1095.
- [18] Yu W, Chen G, Cao M, et al. Second-order consensus for multi agent systems with directed topologies and nonlinear dynamics[J]. IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics Part B, 2010, 40(3): 881-891.
- [19] Dong X, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems subjected to switching topologies with application to quadrotor formation flying[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5014-5024.
- [20] Zavlanos M M, Egerstedt M B, Pappas G J. Graph-theoretic connectivity control of mobile robot networks[J]. Proc of the IEEE, 2011, 99(9): 1525-1540.
- [21] Wei R, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: Theory and applications[M]. London: Springer, 2008: 112.
- [22] 李宗刚, 郭志龙, 石慧荣, 等. 基于分布式估计与模糊控制的多机器鱼编队控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(3): 40-46.
(Li Z G, Guo Z L, Shi H R, et al. Formation control of multiple robotic fish based on distributed estimation and fuzzy control[J]. Complex Systems & Complexity Science, 2016, 13(3): 40-46.)
- [23] Sadati S H. A fuzzy logic-based formation controller for wheeled mobile robots[J]. Industrial Robot, 2011, 38(3): 269-281.
- [24] Liao Y, Huang J, Zeng Q. Preview fuzzy control method for intelligent vehicle path tracking[C]. IEEE Int Conf on Progress in Informatics and Computing. Shanghai: IEEE, 2010: 1211-1214.
- [25] Barrett D S, Triantafyllou M S, Yue D K P, et al. Drag reduction in fish-like locomotion[J]. J of Fluid Mechanics, 1999, 392: 183-212.

(责任编辑: 齐 霁)