

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.020

## 基于位置反馈的多机器鱼编队控制

刘舒<sup>1</sup>, 禹梅<sup>1</sup>, 谢广明<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

**摘要:** 为实现多机器鱼的队形控制, 在图论队形控制理论的基础上引入一种基于位置反馈的队形控制策略。介绍参考机器鱼的概念, 在任一时刻都设定一个保持不动的参考机器鱼, 其它机器鱼则根据当前参考机器鱼的位置及机器鱼之间的信息交互来调整其相对位置, 使多机器鱼系统在有限时间内实现任意队形的形成。在水下机器人 2D 仿真平台上进行实验, 并给出不同情况的实验结果。仿真结果表明: 该方法整体性好, 鲁棒性强, 抗干扰性强, 计算简单, 可实现任意队形。

**关键词:** 多机器鱼; 编队控制; 位置反馈; 2D 仿真平台

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Formation Control of Multiple Robot Fish Based on Position Feedback

Liu Shu<sup>1</sup>, Yu Mei<sup>1</sup>, Xie Guangming<sup>2</sup>

(1. School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** To realize the formation control of multi-robot fish system, this paper presents a new method, a position feedback control strategy, which considering both graph theory and information interaction between the robots. And a concept of reference robot fish is introduced, which means a different fish is set to stay still at any time. Other fish adjust the positions according to the position of reference fish through the information interaction, which can make the robot fish achieve any formation in the limit time. We conduct simulations on the underwater robot polo game 2D simulation platform and give out the experimental results under different situations. Simulation results show the method good integrity, good robustness and the immunity to interference, which verify the effectiveness of the proposed algorithms.

**Keywords:** multi-robot fish; formation control; position feedback; 2D simulation platform

### 0 引言

在多机器人的协作研究中, 队形控制是较早受到关注的协作问题。受到自然界物种编队行为的启示, 机器人团队若是在执行任务的过程中保持队形, 可以在团队基础上充分发挥机器人个体优势, 充分获取环境信息, 增强抵抗外界入侵的能力, 提高整体工作效率<sup>[1-2]</sup>。随着编队控制的发展, 很多控制方法被提出, 最常用的有跟随领航者法<sup>[3-4]</sup>、基于行为法<sup>[5-6]</sup>、虚拟结构法<sup>[7-8]</sup>和强化学习法<sup>[9]</sup> 4 种。

由于鱼类生存水环境的独特性, 单用上述几种策略很难满足水中机器人的编队控制需要, 由此在其基础上衍生出一些独特的控制策略。文献[10]提出了队形分解的多水下机器人编队控制方法, 将复杂的多机器人编队问题分解为若干组 2 个机器人之间的协调问题, 并设计了机器人的各个子行为, 简化了多水下机器人编队的基本队形模型。但当水下机器人数量较多时, 很难对每个机器人都进行控制, 无法维护编队稳定性; 文献[11]结合领航者法和基

于行为法, 提出了分层式编队控制方法, 将自主式水下机器人的编队体系划分为人物规划层、队形设计层、行为控制层和编队评价层 4 个层次; 文献[12]针对机器鱼在几何外形和机械性能的限制, 结合领航者法, 提出了基于几何理论的形成队形方法, 引入一个曲率坐标来描述不同的成员在队形中的相对位置。但是这种方法计算非常复杂, 只用 Matlab 仿真平台下进行试验, 没有经过水环境的验证。文献[13]结合了虚拟结构的模型, 介绍了一类新颖的基于流场的队形避障算法, 将整个系统看作油滴式可变形的流体, 实现了机动灵活的避障。但是由于鱼群数量较少, 效果不明显; 文献[14]提出了一种队形反馈控制方法, 并应用到陆地机器人的编队控制方法。该方法将机器鱼系统中的位置和方向信息作为输入, 不以动力学模型为基础, 很好地结合了领航者法和分布式控制, 算法简单并容易实现。因此, 笔者将这种队形控制方法加以改进引入到机器鱼编队控制中, 并通过实验验证其有效性。

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2011-09-05

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4092038)

作者简介: 刘舒(1987—), 女, 吉林人, 硕士, 从事多水下机器人系统和网络控制研究。

### 1 反馈控制策略描述

考虑一个个体数为  $M$  的多机器鱼系统  $F$ ，机器鱼编号分别为  $F_1, \dots, F_M$ 。假设系统中每个机器鱼都实时地知道自己和其它机器鱼的位置，也就是当前的位置和鱼体方向，则每个机器鱼都可以将自己的位置信息反馈给其它机器鱼。每一时刻，只允许一个机器鱼将自己的当前位置反馈给其它机器鱼，称此机器鱼为这一时刻的参考机器鱼。成为参考鱼的机器鱼不主动调整自己的位置。

设  $p_i(t) \in R^n$ ,  $i=1, \dots, M$  为各机器鱼在  $t$  时刻的位置向量,  $p_i(t) = (x_i, y_i)^T$ ,  $P_t = \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_2(t) \\ \vdots \\ p_M(t) \end{bmatrix} \in R^{Mn}$  表示在  $t$

时刻整个系统的位置。

任意给定  $f_i \in R^n$ ,  $i=1, \dots, M$ , 满足  $f_i \neq f_j$ ,

$i \neq j$ , 记  $f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_M \end{bmatrix} \in R^{Mn}$ , 若存在常量  $c \in R^n$ , 使得

$P_t - 1_M \times c = f$ , 成立, 称多机器鱼系统在时刻  $t$  处于队形  $f$ 。

如图 1 所示, 在  $t_1$  时刻, 系统的状态为  $P_{t_1} = \begin{bmatrix} p_0(t_1) \\ p_1(t_1) \end{bmatrix}$ , 给定队形为  $f = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \end{bmatrix}$ , 假设机器鱼  $F_0$  在  $p_0$  位置不动, 则到  $t_2$  时刻, 机器鱼  $F_1$  需要从位置  $p_1$  游到位置  $p'_1$  才能保证式  $P_t - 1_M \times c = f$  成立, 即形成队形, 其中  $p'_1(x, y) = p_1(x_1, y_1) + ((\Delta x_1 - \Delta x_0), (\Delta y_0 - \Delta y_1))$ 。

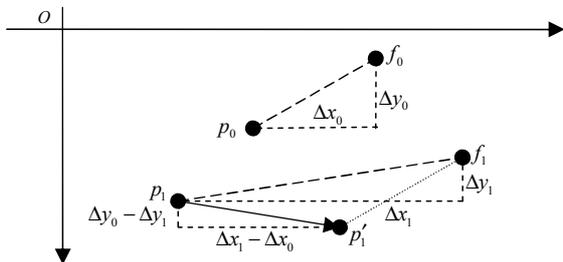


图 1 控制策略示意简图

在初始时刻, 系统的初始状态为  $P_0$ 。

在  $t=1$  时刻, 令机器鱼  $F_1$  作为参考机器鱼, 其速度为 0, 不主动调整位置, 而系统中其它机器鱼根据机器鱼  $F_1$  的当前位置按式 (1) 更新自己的位置:

$$p_i(1) = p_i(0) + \varepsilon((p_1(0) - f_1) - (p_i(0) - f_i)) \quad (i=2, \dots, M) \quad (1)$$

其中  $\varepsilon > 0$  为反馈强度控制参数, 用于调整反馈量的大小, 即调整机器鱼改变距离的大小。此时整个系统的位置调整为:

$$P_1 = P_0 + \varepsilon \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix} \times (P_0 - f) \quad (2)$$

记  $L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$ , 则式 (2) 可以写成

$$P_1 = P_0 + \varepsilon L_1 (P_0 - f) = (I_M + \varepsilon L_1) P_0 - \varepsilon L_1 f \quad (3)$$

同理, 在  $t=2$  时刻, 令机器鱼  $F_2$  为参考机器鱼, 系统中其它机器鱼根据机器鱼  $F_2$  的当前位置按照式 (4) 更新自己的位置:

$$p_i(2) = p_i(1) + \varepsilon((p_2(1) - f_2) - (p_i(1) - f_i)) \quad (i=1, 3, \dots, M) \quad (4)$$

此时, 整个系统的位置可调整为:

$$P_2 = P_1 + \varepsilon \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix} \times (P_1 - f) \quad (5)$$

记  $L_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}$ , 则式 (5) 可表示为:

$$P_2 = P_1 + \varepsilon L_2 (P_1 - f) = (I_M + \varepsilon L_2) P_1 - \varepsilon L_2 f \quad (6)$$

依此类推: 在  $t=M$  时刻机器鱼  $F_M$  为参考鱼, 系统中其它机器鱼根据机器鱼  $F_M$  的当前位置按照如下公式更新自己的位置:

$$p_i(M) = p_i(M-1) + \varepsilon((p_M(M-1) - f_M) - (p_i(M-1) - f_i)) \quad (i=1, \dots, M-1) \quad (7)$$

同理整个系统的位置调整为:

$$P_M = P_{M-1} + \varepsilon \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \times (P_{M-1} - f) \quad (8)$$

$$\text{记 } L_M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & -1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \text{ 式 (8) 可表示为:}$$

$$P_M = P_{M-1} + \varepsilon L_M (P_{M-1} - f) = (I_M + \varepsilon L_M) P_{M-1} - \varepsilon L_M f \quad (9)$$

从  $t = M + 1$  时刻开始, 再从机器鱼  $F_1$  开始重复上述过程, 一直循环, 即整个过程是以  $M$  为周期的循环过程。由此可得整个系统调整位置的动态方程为:

$$P_t = P_{t-1} + \varepsilon L_{r(t)} (P_{t-1} - f) \quad (10)$$

其中  $L_i = (-I_M + E_i)$ , 定义  $E_i$  为  $M$  阶方阵, 其第  $i$  列全部为 1, 其余为 0, 即

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{M \times M}$$

第  $i$  列

$r(t)$  为从 1 到  $M$  的周期函数,

$$r(t) = \begin{cases} t, & 0 \leq t \leq M \\ t - iM, & iM \leq t \leq (i+1)M \end{cases}$$

## 2 仿真研究

### 2.1 仿真实验研究

对机器鱼数量  $M$  为 4 的系统进行仿真研究, 令其目标队形为菱形。

如图 2, 首先给定要生成的队形, 即给定  $f = \{(2\ 300, -1\ 800)^T, (1\ 900, -1\ 500)^T, (2\ 700, -1\ 500)^T, (2\ 300, -1\ 200)^T\}$ 。

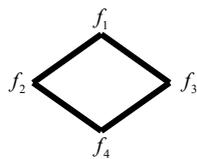


图 2 目标队形示意图

每个机器鱼的初始位置和方向都是随机生成, 如图 3。

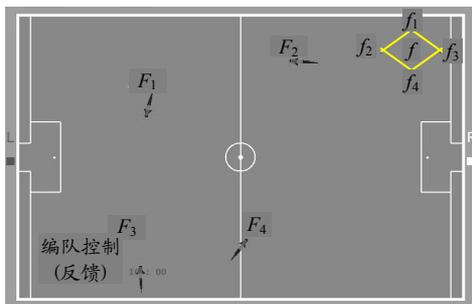


图 3 系统初始位置仿真图

经多次测试, 发现反馈强度控制参数取  $\varepsilon = 0.5$

时, 效果比较好。

最终形成队形如图 4, 可以看出, 机器鱼基本上形成了事先设定的队形。

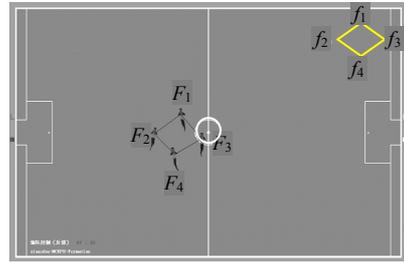


图 4 形成队形仿真图

### 2.2 仿真误差分析

由于本算法的条件之一是每一时刻都会有一个机器鱼作为参考机器鱼, 而参考机器鱼保持不动, 但实际情况下, 鱼是不可能保持不动的, 即使没有速度也会随着水的波动漂移。因此, 在其它机器鱼根据参考机器鱼的位置作为反馈时, 参考机器鱼的位置已经改变了。同时, 鱼不能倒游, 当计算出来的下一时刻的位置是在鱼的游动方向的反方向时, 机器鱼不能很快地倒退到所需要的位置, 而只能转一定的角度游到反方向, 可能需要很长时间都没法游到所需位置。因此, 机器鱼很难达到精确的队形。

同时, 由于机器鱼所在的水环境非常复杂, 水中的干扰很大, 也很难使机器鱼达到预想的队形效果, 而机器鱼之间的碰撞也是不可避免的, 因此最终形成的队形与目标队形之间必定会有误差。

如图 5(a), 目标队形的四边边长都是 500 mm, 2 个对角线长度分别为 600 mm, 800 mm 经测得实际队形如图 5(b)。



图 5 误差计算对比图

图 5(b)中  $F_1F_2=509.624\ 8$ ,  $F_1F_3=484.377\ 5$ ,  $F_2F_4=472.545\ 6$ ,  $F_3F_4=485.981\ 1$ 。根据相对误差公式

$$\delta = \frac{|\text{实际值} - \text{理论值}|}{\text{实际值}}$$

得到 4 条边的相对误差分别为 1.89%, 3.23%, 5.80% 和 2.88%, 对角线的相对误差为 7.81%, 6.13%。经过多次测试, 基本上相对误差都在 10% 以内, 其结果可以接受。

### 2.3 异常情况仿真

在队形控制过程中, 令机器鱼  $F_1$  既不调整队形, 也不向其它机器鱼发送自己的当前位置, 观察其它

机器鱼的队形情况如图 6。

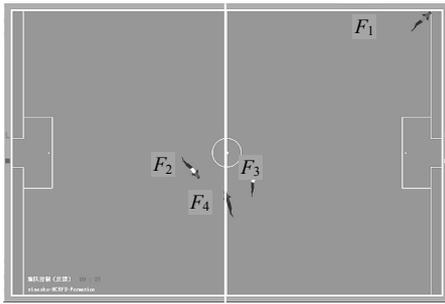


图 6 异常情况仿真结果

由仿真结果可以看出，其它机器鱼仍然进行队形调整，构成了事先设定队形的其余部分。在这种控制策略下，当有队员通信中断时，其它队员并没有受到影响，仍然可以保持队形。

### 3 结论

多机器鱼系统中的每个个体之间都互相依存，以多机器鱼系统中的位置信息作为控制输入，可以实现任意队形。该算法对于多机器鱼系统队形控制的优势在于整体性强，且计算简单，鲁棒性强。同时，由于参考机器鱼不是唯一的，当有某一个机器鱼无法进行通信时，其他鱼仍然轮流成为参考机器鱼，并不影响队形中的其他部分的形成，即使是在系统中个体数很多的时候，也不会对整个队形造成太大的影响。

### 参考文献：

[1] 张磊. 多智能体机器人系统设计与编队问题的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

[2] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous* \*\*\*\*\*

(上接第 64 页)

[4] Zhang Dandan, Fang Yimin, Wang Long, et al. Coordinated box-pushing of multiple biomimetic robotic fish[C]. USA: IEEE Conference on Decision and Control, and European Control Conference, 2005: 5474-5479.

[5] Shao Jinyan, Wang Long. Cooperation of multiple fish-like microrobots based on reinforcement learning[C]. Australia: The First IEEE Symposium on Artificial Life, 2006: 348-354.

[6] Zhang Dandan, Wang Long, Yu Junzhi, et al. Coordinated transport by multiple biomimetic robotic fish in underwater environment[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(4): 658-671.

[7] Shao Jinyan, Wang Long, Yu Junzhi. Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation[J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(6): 569-584.

[8] Shao Jinyan, Wang Long, Yu Junzhi. Collision-free motion planning for a biomimetic robotic fish based on numerical

robots, 1997, 4(4): 387-403.

[3] Wang PKC. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1991, 8(2): 177-195.

[4] Desai J, Ostrowski J, Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]. Leuven, Belgium. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1998: 2864-2869.

[5] Balch T, Arkin RC. Behavior-based Formation Control for Multi-robot Teams[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 1-15.

[6] Lawton J, Beard R W, Young B. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003, 19(6): 933-941.

[7] Anthony Lewis M, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures autonomous [J]. *Autonomous Robots*, 1997(4): 387-403.

[8] Ren W, Beard R W. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures[C]. *IEEE Proceedings Control Theory and Applications*, 2004, 151(3): 357-368.

[9] 王醒策. 基于强化学习的多机器人编队方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.

[10] 徐宏根. 多水下机器人编队协调问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.

[11] 范士波. 多水下机器人编队控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

[12] Jinyan Shao, Junzhi Yu, and Long Wang. Formation Control of Multiple Biomimetic Robotic Fish[C]. Beijing, China. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: 1412-1417.

[13] 邵金燕. 多机器人协作控制研究[D]. 北京: 北京大学, 2007.

[14] 李华. 多四腿机器人系统队形控制研究[D]. 北京: 北京大学, 2007.

flow field[C]. USA: 2006 American Control Conference, 2006: 2736-3741.

[9] Breder CM. The locomotion of fishes[J]. *Zoologica*, 1926, 1(4): 159-256.

[10] Sfakiotakis M, Lane DM, Davies JBC. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237-252.

[11] Fang Yimin, Yu Junzhi, Fan Ruifeng, et al. Performance optimization and coordinated control of multiple biomimetic robotic fish[C]. China: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2005: 206-211.

[12] Hirata K, Takimoto T, Tamura K. Study on turning performance of a fish robot[C]. Australia: First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms, 2000: 287-292.

[13] 方奕敏. 仿生机器鱼的优化与协作控制研究[D]. 北京: 北京大学智能控制实验室, 2006.

[14] 水中机器人大赛官方网站 <http://robot.pku.edu.cn/>.