

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.019

# 基于一致性理论的多机器鱼编队控制

乔琳, 邓彦松, 田晓亮

(西南民族大学电气信息工程学院, 成都 610041)

**摘要:** 针对多机器鱼系统的一致性问题的, 设计一种基于一致性理论的多机器鱼编队控制模型。采用一个基于拓扑结构的多机器鱼编队控制模型描述机器鱼之间的信息交换方式, 分析该模型下的有向网络取得渐近一致性的条件, 并应用到领航者—跟随者模式下的编队控制中, 将任意的队形转化为“一跟一”的局部“领导—跟随”关系并奔向目标区域, 并在水中机器鱼 2D 仿真平台上进行仿真分析。仿真结果表明: 该编队理论在多机器鱼控制系统中是有效的。

**关键词:** 多机器鱼; 一致性; 编队控制模型; leader-follower 模式

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Formation Control of Multiple Robot Fish Based on Consensus Theory

Qiao Lin, Deng Yansong, Tian Xiaoliang

(College of Electrical Information Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** For the consensus problem of multiple robot fish system, design a multiple robot fish system based on the consensus theory. A multiple robot fish motion model is presented to communication information which based on topology structure. The consensus problem in directed networks of multiple robot fish is analyzed and applied to the formation of leader-follower. With any formation into the local leader-follower mode, the formation and the goal area reaching control is presented based on this model, and put up simulated analysis on underwater Robot fish 2D platform. Finally, simulations are provided to demonstrate the scheme in multiple robot fish system control is efficient.

**Keywords:** multiple robot fish; consensus; formation control model; leader-follower mode

## 0 引言

Agent 的概念<sup>[1]</sup>首先出现在 Minsky 于 1986 年出版的《思维的社会(The Society of Mind)》中, Minsky 认为社会中的某些个体经过协商可求得问题的解, 这些个体就是 Agent, 根据一定的规则可以组成一个多 Agent 系统(multi-agent system)。与单智能系统相比, 多智能体系统能更快更有效地完成特定任务, 现已成为智能体研究领域的热点。近几年来, 随着计算机技术、网络技术和通信技术的飞速发展, 多智能体技术广泛应用于无人飞行器联合控制、编队控制、交通控制、智能机器人、分布式传感器网络及通信网络拥塞控制<sup>[2]</sup>等领域。在多智能体系统的这些应用中, 单个智能体经常要在某些量值上与其余智能体趋于一致。在多机器鱼编队控制中, 一致性问题是多机器鱼协调控制中需要解决的重要问题之一。

因此, 笔者从宏观的角度对多机器鱼的拓扑结构和拓扑标识进行设计, 给机器鱼群一个通用的控

制模型, 使它们以一定的队形奔向目标区域。在依托拓扑结构设计控制算法中, 去掉了机器鱼系统的物理控制部分, 再将每条机器鱼都独立编号, 在运动过程中, 每条机器鱼都知道自己的初始物理位置和邻近机器鱼的编号, 且知道邻近机器鱼相对于自己的相对物理位置, 但不知道其绝对物理位置。该模型经过数值仿真, 最终能够实现算法一致性。为便于理解, 将基于拓扑结构的多机器鱼控制模型应用到 leader-follower 的编队控制中, 通过描述该群体的编队行为, 对多机器鱼系统型进行一致性分析, 并通过仿真证明其有效性。

## 1 图论及网络的一致性问题的

### 1.1 图论知识

对一个拓扑系统而言, 用集合和几何的概念对其进行简化更容易表述。在多智能体编队队形控制中, 通常采用图论的概念进行定义, 将编队中的智能体作为图中的一个节点, 称为“多机器鱼队形

收稿日期: 2011-08-15; 修回日期: 2011-09-19

基金项目: 西南民族大学中央高校基本业务经费项目“基于切换策略的多智能体协作系统研究”(10NZYJ05)

作者简介: 乔琳(1989—), 女, 吉林人, 本科, 从事基于切换策略的多智能体协作系统研究。

通信作者: 邓彦松(1976—), 男, 博士, 讲师, 从事信号处理和非线性控制研究。

图”<sup>[3]</sup>。该图是由顶点和边组成的, 记为  $G=(V,E)$ , 其中:  $V$  为顶点集;  $E$  为边集; 图的阶即为图的顶点数。假定  $V$  是由  $N$  条机器鱼形成的队形图里面的节点, 每条机器鱼用整数  $i \in \{1,2,\dots,N\}$  来标注。每条边可以用一对不同的点  $(v_i,v_j)$  来表示, 这里  $v_i$  是输入节点,  $v_j$  为输出节点。

设  $q_i \in R^d (d=2)$ ,  $i \in N$  表示第  $i$  个节点  $v_i$  的物理位置, 以  $q_i$  为圆心,  $r_i \geq 0$  为半径的圆形区域作为节点  $i$  的邻域, 定义为:

$$B(q_i, r_i) := \{x \in R^d : \|x - q_i\| < r_i\} \quad (1)$$

记  $r = \text{col}(r_i)$ 。设图中节点的邻接关系是基于节点的物理位置, 定义权重邻接矩阵  $A(q) = [a_{ij}(q)]$ , 其中:

$$a_{ij}(q) = \begin{cases} 1, & \text{存在机器鱼} \\ 0, & \text{不存在机器鱼} \end{cases} \quad (2)$$

而且:

$$a_{ii}(q) = - \sum_{i=1, i \neq j}^N a_{ij}(q) \quad (3)$$

这样, “多机器鱼队形图”就可以由上述定义的权重邻接矩阵描述, 记为图  $G(q)$ , 它也可称为网络, 该网络中节点的连接关系由节点物理位置所决定, 节点  $i$  的邻域  $N_i$  定义为:

$$N_i = N(q) := \{j : a_{ij}(q) > 0\} \quad (4)$$

以上定义的网络是一个有向图, 如果  $r_i > r_j$ , 则  $j \in N_i$  并不意味着  $i \in N_j$  一定成立。

对于图  $G$ , 如果任意两个节点间都有一条通路, 则称图  $G$  是连通的<sup>[4]</sup>。规定如果一有向边从节点  $v_i$  指向节点  $v_j$ , 则将  $v_i$  定义为  $v_j$  的父节点, 而将  $v_j$  定义为  $v_i$  的子节点。在一个图中, 有向树是一个有向图, 图中除了根节点以外, 每个节点只有唯一的父节点。有向图的生成树是由图中连接所有节点的边组成的。如果图中边的子集形成一个生成树, 此时该图包含一个生成树。

## 1.2 一致性问题

在一个由  $N$  个节点组成的网络中,  $x_i(t) = \{x_{i1}(t), x_{i2}(t)\} \in R^2$  表示节点  $i$  的物理位置,  $x_i(t)$  可以作为机器鱼在群集编队中的逻辑状态<sup>[5]</sup>, 则编队控制中的一致性问题的表示为:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t)(x_j(t) - x_i(t)) \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

当所有智能体的状态两两相等时, 即满足  $x_i = x_j$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 也即对于任意的初始值  $x_i(0)$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\|x_i(t) - x_j(t)\| = 0$ , 此时所有的智能体渐进一致, 并称所有的智能体达到一致时的状态为决策状态。

式 (5) 的拉普拉斯矩阵定义为:

$$\dot{x}(t) = -L(t)x(t) = A(t)x(t) \quad (6)$$

$L$  为网络  $G$  在时刻  $t$  的拉普拉斯矩阵, 它决定了整个系统的特性。拉普拉斯矩阵和权重邻接矩阵  $A(t)$  的关系为  $L(t) = -A(t) = [-a_{ij}(t)]$ , 它们随着时间切换。当队形固定时,  $A(t)$  为常数, 即  $A(t) = A$ , 则方程式 (6) 可以写成:

$$\dot{x}(t) = -Lx(t) = Ax(t) \quad (7)$$

引理 1<sup>[6]</sup>: 在网络拓扑结构固定不变的情况下, 当且仅当网络图能够包含一个生成树时, 式 (7) 所描述的系统可以渐进的趋于一致性。

## 2 多机器鱼系统模型

由前述分析可知, “多机器鱼队形图”  $G(q)$  是一个有向图, 可用来描述机器鱼间的相互作用。在  $G$  中, 第  $i$  个节点代表第  $i$  条机器鱼, 从  $v_i$  到  $v_j$  的一条有向边记为  $(v_i, v_j)$ , 表示节点  $i$  和  $j$  间的一个有向的信息交换, 即机器鱼  $j$  能收到或感应到机器鱼  $i$  的信息, 则称机器鱼  $v_i$  为机器鱼  $v_j$  的邻近机器鱼。

当  $N$  条机器鱼在同一个平面运动时, 每条机器鱼都有一个圆形邻域。随着整个机器鱼群的运动, 机器鱼  $i$  的近邻机器鱼的集合会随着时间的变化而发生切换, 即权重邻接矩阵  $A(t)$  发生切换。给每条机器鱼一个编号, 为使机器鱼群能以一定的队形奔向目标点, 在每个时间间隔内, 机器鱼  $i$  需求得其近邻的机器鱼及目标点相对于自己的相对物理位置。

为了实现多机器鱼按目标队形运动, 每条机器鱼最终的控制模型应为:

$$\dot{x}_i(t) = \dot{x}_i^* + \sum_{j=1}^N a_{ij}(t)(x_j - x_i^*) \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

其中,  $x_i^* \in R^2$  为机器鱼  $i$  指定的目标队形, 它可以是时变的, 也可以是固定不变的。

### 3 在 leader-follower 编队中的应用

#### 3.1 群体编队分析

群体编队的控制目标是使群体在控制规律的作用下能维持某些几何队形。在群体编队系统中, 个体之间通过相互作用以及与环境交互来完成编队, 在大多数应用中, 群体的动力学方程和局部控制器都是相似的<sup>[7]</sup>。

在领航者-跟随者 (leader-follower) 模式中, 有一个个体被作为是 leader, 其余的个体则为 follower。Leader 的引导者 (master) 是计算机, 通过编程控制, 使 leader 不断的向预定轨道靠近, follower 机器鱼只需获得本身与 leader 间的相对信息, 就可以不断地调整自己与 leader 的相对位姿。

#### 3.2 编队实现

如果在多机器鱼系统运动过程中, 有一条机器鱼  $f$  向所有其他机器鱼发送信息, 而没有一条机器鱼的信息反送到机器鱼  $f$ , 这时, 机器鱼  $f$  充当 leader 机器鱼的角色, 则方程 (8) 就可以表示基于 leader-follower 模式的多机器鱼队形控制系统, 其中, leader 的运动由 master 控制, follower 之间无通讯通道。

Leader-follower 模式下的编队即是一个有向图的例子, 3 条机器鱼以固定的连接关系运动, 设 leader 编号为①; follower1、follower2 编号依次为②、③。3 个节点的有向图<sup>[8]</sup>如图 1。

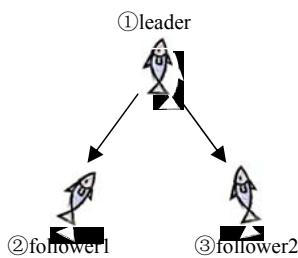
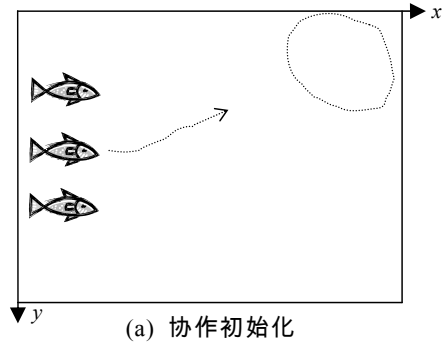


图 1 三节点有向图

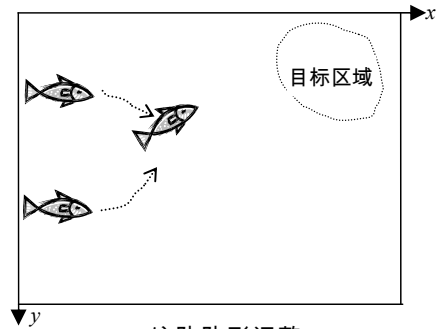
由于最终的编队结果使 3 条机器鱼之间的邻接关系保持不变, 由引理 1 易见, 该有向图中包含生成树, 则该系统可以逐渐趋于一致性。

通过前面对基于拓扑结构的多机器鱼系统的分析可知, 在固定规模编队条件下, 多机器鱼的拓扑策略可以通过机器鱼拓扑关系的规律将复杂队形转

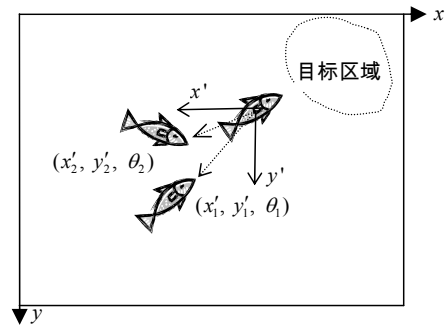
化成“一跟一”的局部“领导-跟随”。笔者主要描述一般环境下, 多机器鱼队形的建立即奔向目标区域的实现过程, 包含 4 个阶段: (a) 协作初始化; (b) 编队队形调整; (c) 编队队形形成; (d) 固定队形奔向目标点, 如图 2。



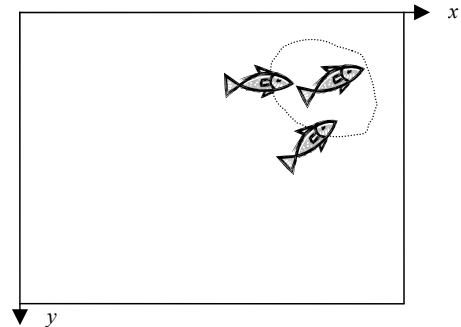
(a) 协作初始化



(b) 编队队形调整



(c) 编队队形形成点



(d) 固定队形奔向目标

图 2 多机器鱼协作实现

### 3.3 程序举例

在 leader-follower 模式下的多机器鱼协作过程中, 由于 follower 的本质任务并不是到达和 leader 完全相同的状态, follower 只是跟随 leader 附近一个虚拟智能体, 它在 leader 的邻域范围内。follower 满足在 leader 的坐标系中, 与 leader 距离为  $d$ , 所处角度为  $\theta$ (图 2(c))。在水中机器人比赛 2D 仿真平台上, 这 2 个参数可由下面的程序实现:

函数 1(两点间的距离计算函数):

```
public static double Distancetopoint (double x,double y,double a,double b)
{ return Math.Sqrt((a-x)*(a-x)+(b-y)*(b-y));
}
```

函数 2(两点间方向角计算函数):

```
public static double Angletopoint (double x,double y,double a,double b)
{ double distance X=a-x;
  Double distance Y=b-y;
  If(distance X<0)
  { if (distance Y>0)
    {return Math.PI+Math.Atan(distance Y/distance X);
  }
  Else if (distance Y<0)
    {return Math.Atan(distance Y/distance X)-Math.PI;
  }
  }
  Else if (distance X>0)
    {return Math.Atan(distance Y/distance X);
  }
  Return;
}
```

## 4 仿真实验

### 4.1 数值仿真

在笔者提出的“多机器鱼队形图”中, 没有输入节点的机器鱼为 leader。在基于 matlab 的数值仿真中, 赋予 leader 一组坐标对, follower1 和 follower2 的坐标数据可由式 (8) 计算得到。

为使 3 条机器鱼以固定的拓扑结构运动, 运动队形不随时间变化, 设初始坐标为 leader(0,0), follower1(0,-0.2), follower2(0,0.2), 允许误差设为  $r_i=0.4$ 。

目标队形设为:

$$x^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0.3 \\ 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

机器鱼群的位置状态如图 3, 机器鱼群的速度状态如图 4, 表明该编队控制模型可以使处在各节点的机器鱼按目标队形奔向目标区域。由给定的目标队形及各机器鱼的初始坐标数据可以看出, 3 条机器鱼在  $x$  轴方向的一致性是显然的, 因此只需要对  $y$  方向数据进行一致性仿真。图 5 表明  $y$  方向的一致性误差在误差允许的范围之内。数值的仿真结果表明, 该系统最终能够取得渐进一致性。

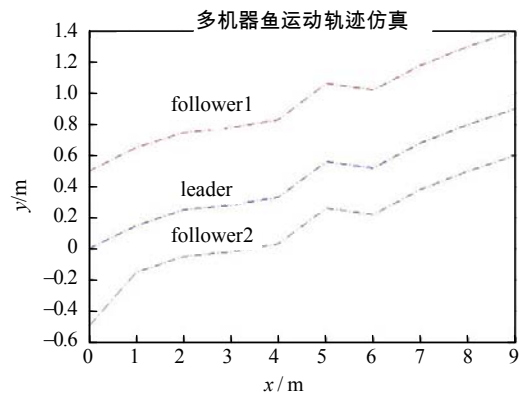


图 3 位置仿真

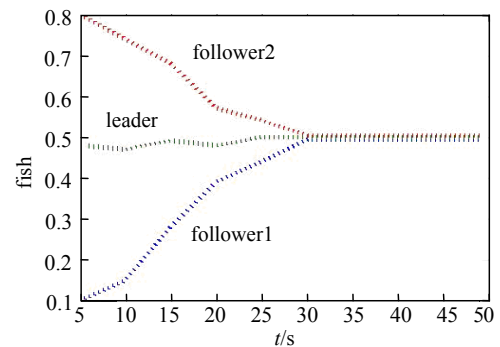


图 4 速度仿真

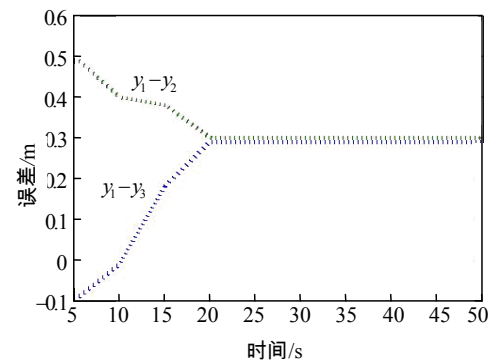


图 5  $y$  方向一致性误差

## 4.2 2D 实验平台仿真

在水中机器人比赛 2D 仿真平台上进行仿真测试,目的是让机器鱼群以固定队形奔向目标场地,该平台是基于 Microsoft Robotics Studio SDK1.5 开发的,充分利用了平台提供的仿真引擎服务,可以模拟真实的水下环境,仿真界面如图 6。在实验过程中,机器鱼群能够较好的相互协调,当第一条机器鱼 (leader)调整好方向向着目标场地运动时,其它机器鱼能够按预先设定好的仿真算法自动跟随 leader 的运动轨迹,形成固定的队形结构奔向目标区域。

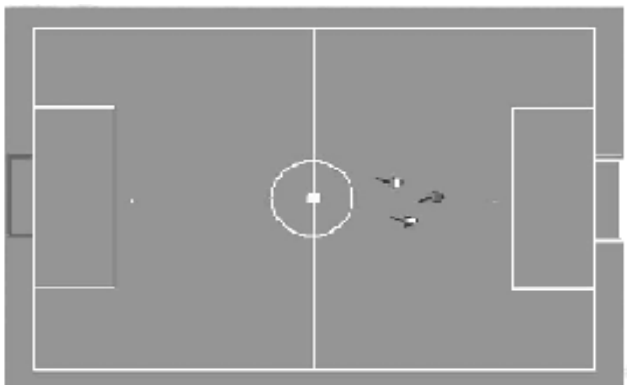


图 6 仿真主界面

## 5 结束语

笔者设计机器鱼群的拓扑结构已应用到 leader-follower 结构的编队控制中。在水中机器鱼 2D 仿真平台上进行的仿真实验结果表明:该模型下的多机器鱼系统一致性良好,机器鱼群能以固定队形奔向目标场地。但当多机器鱼编队达到一定规模时,还需要考虑处于特殊位置的机器鱼的稳定性<sup>[9]</sup>,将在下一步的工作中进行解决。

## 参考文献:

- [1] Mackworth A K h. On seeing robots. In: Computer Vision: System, Theory and Application [M]. A Basu, Li X (Eds), Singapore: World Science Press, 1993: 1-13.
- [2] 林鹏, 贾英民. 二阶智能网络的一致性控制[DB/OL]. 中国科技论文在线. (2006) [2011-04]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [3] 刘磊. 多移动机器人编队及协调控制研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 武汉: 华中科技大学, 2009: 60-63.
- [4] 王银涛, 严卫生, 闫伟. 多智能体信息一致性在机器人编队控制中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 4-7.
- [5] 吴正平, 关治洪, 吴先用. 基于一致性理论的多机器人系统队形控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1241-1244.
- [6] Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [7] 李向舜. 网络化群体系统编队及一致性分析[D]. 华中科技大学博士学位论文, 武汉: 华中科技大学, 2009: 88-91.
- [8] 杨洪勇, 徐群叁. 具有单向时延的多智能体系统的一致性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(3): 62-67.
- [9] 张玉礼, 吴怀宇, 程磊. 基于领航者模式的多机器人编队实现[J]. 信息技术, 2010(11): 17-23.