

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.021

基于二阶邻居网络拓扑的多机器鱼一致性研究

李丽娟¹, 禹梅¹, 谢广明²

(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: 为加快多仿生机器鱼群体游动的一致性收敛速度, 采用一种基于二阶邻居网络拓扑结构的多机器鱼控制模型来描述机器鱼之间的信息交换方式。为易于分析描述, 用图论概念进行定义, 将编队中的机器鱼构成“多机器鱼队形图”。探讨群体机器鱼系统一致性问题, 利用数学模型进行一致性分析, 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, 基于二阶邻居网络拓扑的多机器鱼有良好的一致性和快速的收敛性。

关键词: 多机器鱼; 一致性; 二阶邻居网络拓扑; 快速收敛性; 2D 仿真平台

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Research of Consensus of Multiple Robot Fish Based on Second-Order Neighbors' Information Network

Li Lijuan¹, Yu Mei¹, Xie Guangming²

(1. College of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To speed up the convergence rate, a multiple robot fish topology model was presented to show the transmission of the information which is based on the second-order neighbors' information. To simplify the analysis, the concept of graph theory is used, then a “robotic fish formation map” is formed. What's more, a mathematical model is constructed to analysis the consensus and put up simulated analysis on underwater robot fish 2D platform. Finally, simulations are provided to demonstrate the consensus of multi-robot fish which is based on the second-order neighbors' information, and its faster convergence rate.

Key words: multiple robot fish; consensus; second-order neighbors' information network; fast consensus speed; 2D simulation platform

0 引言

受到自然界中一些如成群的蚂蚁、鸟、鱼、浮游生物、蜜蜂等的迁徙、觅食和逃亡等现象的启发, 采用群体智能的方法来解决实际中所遇到的问题已成为当今研究的热点。多智能体系统已经应用到许多领域, 例如无人飞行器的协调控制、队形控制、海底勘探等^[1-4]。经过 20 多年的发展, 多智能体协作系统方面的研究已经在理论和实践方面取得了很大的进展, 相对而言, 多机器人协作系统能够完成单个机器人无法或者是难以完成的任务, 具有更强的优越性, 如并行性和鲁棒性等^[5]。

多机器鱼的协调控制属于多机器人协作的范畴, 设计、开发多仿生鱼实验系统的目的就是先进的鱼类仿生技术与多机器人技术紧密结合到一起。多仿生机器鱼协调系统指: 多条仿生机器鱼(主体)在一个实时、噪声以及对抗性的环境下, 通过协作、配合完成一个共同的目标(或复杂任务)。目前, 在陆地机器人迅速发展的同时, 水下机器人的发展

却比较缓慢。而水下世界将是人类未来生存、利用开发的资源宝库。但在水下机器人的研究过程中, 对于期间的加工制作、传感器的信息整合及水下环境的不确定性等复杂问题, 要解决这些问题需要花费大量的时间和精力进行水下机器人技术测试的前期准备工作及数据处理工作^[6-7]。针对研发中遇到的困难, 水中机器人比赛 2D 仿真平台提供了一种真实的仿生机器鱼水球比赛实时仿真系统, 真实地模拟了水下仿生机器鱼的各个关节的位姿变化、运动状态变化情况以及机器鱼水球比赛运行状况, 能更好地测试水下仿生机器鱼的各种运动学理论、水波扰动理论、碰撞理论、运动策略算法等水下仿生机器鱼体系结构, 从而更好地对水下仿生机器鱼结构系统及控制策略系统进行改进, 并降低了研发成本, 更好地促进了水下机器人技术的发展。

多鱼系统的一致性, 即在没有中心协调器或全局通信下, 每条机器鱼利用自身的状态和相互通信的邻近智能体的状态进行状态更新, 最后使所有的

收稿日期: 2013-06-17; 修回日期: 2013-07-12

基金项目: 北京市自然科学基金项目(61004031)

作者简介: 李丽娟(1987—), 女, 河北人, 硕士, 从事多智能体系统和多水下机器人系统研究。

机器鱼能够达到一个共同的状态^[8]。针对多机器鱼之间的协调控制问题，笔者利用多智能体系统的一致性分析理论，设计机器鱼群的网络拓扑结构并利用 2D 仿真平台进行实现。

1 图论及群体机器鱼系统一致性问题

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“多机器鱼队形图”^[9]，该无向拓扑图表示为 $G = \{v, \varepsilon, A\}$ ，这里 v 是结点集 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，边界集： $\varepsilon \subseteq v \times v$ ，非负邻接矩阵 $A = [w_{ij}] \in \Lambda^{n \times n}$ ，如果 $(v_j, v_i) \in \varepsilon$ ，则有 $w_{ij} > 0$ ，即存在机器鱼邻居，否则 $w_{ij} = 0$ ，即不存在机器鱼邻居。机器鱼 i 的邻居集合用 N_i 表示。这里假定 v 是由 n 条机器鱼形成的队形里面的节点，每条机器鱼用整数 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 来标注。定义相应的拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] \in \Lambda^{n \times n}$ 其中， $l_{ij} = -w_{ij}, i \neq j$ ； $l_{ii} = \sum_{j \in N_i} w_{ij}$ 。

如果一个无向拓扑图是连通的， L 是对称并且半正定的，即所有 L 的非零特征值都是正的，零特征值对应的特征向量为 $\hat{T} = [1 \ 1 \dots 1]^T$ 。

这样，多机器鱼队形图可由上述定义的权重邻接矩阵描述，记为图 G ，即机器鱼之间形成的网络拓扑，其节点的连接关系由及节点物理位置所决定。

1.2 群体机器鱼系统一致性问题描述

在一个由 n 个节点组成的网络中， $x(k)$ 表示节点的物理位置，可以作为机器鱼在群集编队中的逻辑状态， $u(k)$ 作为机器鱼得到了控制协议输入，用向量表示为：

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$$

$$u(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_n(k)]^T$$

考虑如下二阶系统：

$$\dot{x}_i = u_i \tag{1}$$

利用采样周期 T 和一个零阶保持器，这样任意机器鱼 i 的动态系统可以描述为：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + Tu_i(k) \tag{2}$$

如式 (3) 所示，机器鱼之间的网络通信拓扑通

过分别采用传统的分布式一致性算法，以及基于二阶网络邻居信息的两跳中继网络算法，如式 (4) 所示：

$$u_i(k) = -r_c \sum_{j \in N_i} w_{ij} [(x_i(k) - x_j(k))] \tag{3}$$

$$u_i(k) = -r_c \sum_{j \in N_i} w_{ij} [(x_i(k) - x_j(k))] + \sum_{h \in N_j} w_{jh} (x_i(k) - x_h(k)) \tag{4}$$

其中 r_c 为控制增益，分别记基于单跳网络和两跳中继网络的拉普拉斯矩阵为：

$$L_1(k) = [l_{ij}(k)] \in \Lambda^{n \times n}, \quad L_2(k) = [l_{ih}(k)] \in \Lambda^{n \times n}$$

其中，

$$L_1 : l_{ij}(k) = -w_{ij}, i \neq j$$

$$l_{ii}(k) = \sum_{j \in N_i} w_{ij}$$

$$L_2 : l_{ih}(k) = - \sum_{\substack{j \in N_i \\ h \in N_j}} w_{ij} w_{jh}, i \neq h$$

$$l_{ii}(k) = \sum_{j \in N_i} w_{ij} \sum_{h \in N_j} w_{jh}$$

这样，单跳网络算法，即式 (3) 的控制输入协议为： $u(k) = -r_c L_1 x(k)$ ，两跳中继网络算法，即式 (4) 的控制输入协议为： $u(k) = -r_c (L_1 + L_2) x(k)$ 。在这 2 种控制协议下的系统分别动态地表示为式 (5) 和式 (6)：

$$x(k+1) = x(k) - r_c T L_1(k) x(k) = [I - r_c T L_1(k)] x(k) \tag{5}$$

$$x(k+1) = x(k) - r_c T (L_1(k) + L_2(k)) x(k) = [I - r_c T (L_1(k) + L_2(k))] x(k) \tag{6}$$

引理 1^[10] 式 (5) 所描述的系统可渐进地趋于一致。

引理 2^[11] 式 (6) 所描述的系统可渐进地趋于一致。

2 多机器鱼仿真系统实例分析

为证明上述一致性理论的有效性，笔者采用 5 条仿真机器鱼构成相互通信的系统，并分别基于单跳网络算法和两跳中继网络算法给出其相应的网络通讯拓扑图 $G^{(1)}$ 和 $G^{(2)}$ 如图 1 所示。

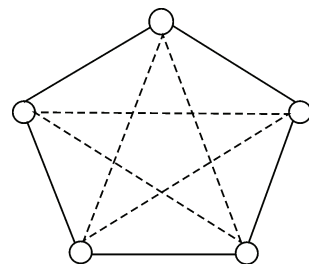


图 1 基于单跳网络算法和二跳中继算法的网络拓扑图

为了简化分析, 拓扑中的权重均设为 1。相应地, 基于单跳网络以及两跳中继网络拓扑的拉普拉斯矩阵 $L^{(1)}$ 和 $L^{(2)}$ 如下所示:

$$L^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad L^{(2)} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

3 2D 实验平台仿真

利用北京大学提供的 URWPGSim2D 平台, 即水中机器人水球比赛仿真器 2D 版本, 其包括服务器和客户端 2 部分。服务端模拟水中环境, 控制和呈现仿真过程及结果, 向客户端发送实时仿真环境和过程信息; 半分布式客户端模拟水中机器人队伍, 全分布式客户端模拟单个水中机器人, 加载比赛或实验策略, 完成决策计算过程, 向服务端发送决策结果。

仿真界面如图 2、图 3 所示。图 2 给出 5 条机器鱼的初始位置, 方向随机。图 3 为最终趋于一致性并结束静止。



图 2 系统初始位置仿真图



图 3 达到一致性仿真图

实验结果表明: 在实验过程中, 机器鱼能够较好地相互协调, 按照预先设定好的仿真算法进行一致性收敛。并且, 基于两跳中继网络算法的收敛速度大约比单跳网络算法快 10 s, 实现快速收敛性。

4 结束语

仿真实验结果表明: 基于单跳网络通信拓扑和两跳网络通信拓扑结构的多机器鱼系统一致性良好, 其中基于两跳网络通信拓扑的多鱼系统具有更快的收敛性。但实际工程中还存在一些网络通信问题如: 数据时延、丢包以及高阶系统的模型实现等, 还有待于做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Sinha A, Kirubarajan T. Autonomous ground target tracking by multiple cooperative UAVs[C]. Big Sky, MT: Aerospace Conference, IEEE, 2005: 1-9.
- [2] Kovacina M A, Palmer D, Yang G, et al. Multi-agent control algorithms for chemical cloud detection and mapping using unmanned air vehicles[C]. Lausanne, Switzerland: RSJ International conference on intelligent robots and systems, IEEE, 2002(3): 2782-2788.
- [3] 席裕庚, 陈卫东. 机器人向智能化的发展和多移动机器人协作系统[J]. 自动化博览, 2002(1): 149-153.
- [4] 李俊华. 多机器人的协调合作技术与群组控制策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学硕士论文, 2006: 7-57.
- [5] 李成凤. 群体自主机器人系统分布式优化与一致性控制[D]. 长春: 吉林大学硕士论文, 2012: 11-63.
- [6] 李晔, 常文田, 孙玉山. 自治水下机器人的研发现状与展望[J]. 机器人技术与应用, 2007(1): 25-31.
- [7] Zhu Yunhang, Chen Penghui, Cai Qiong. Design and implementation of the robot-fish simulation system[C]. Kuala Lumpur: Electrical & Electronics Engineering, IEEE, 2012: 539-542.
- [8] 覃勇, 李宗刚, 谢广明. 机器鱼比赛中的协作策略[J]. 兵工自动化, 2012, 31(11): 56-58.
- [9] 刘磊. 多移动机器人编队及协调控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2009: 60-63.
- [10] 郑军, 颜文俊. 多主体汇聚问题离散算法的稳定性[J]. 浙江大学学报, 2006, 41(10): 1684-1687.
- [11] Jin, Z.P., Murray, R.. Multi-hop relay protocols for fast consensus seeking[C]. CA: Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, San Diego, USA, 2006: 1001-1006.