
《自动化前沿专题》期末论文

多智能体协同控制的研究

RESEARCH ON Multi-Agent Collaborative Control

姓	名：方尧
学	号 190410102
专	业：自动化
学	院：机电工程与自动化学院

哈尔滨工业大学

2023 年 01 月

摘 要

本文结合老师专题讲座内容以及搜集的相关知识，初步学习了解了多智能体协同控制领域的主要理论知识、前沿问题、应用场景以及发展前景。

本文从通信、编队、以及避撞三个方面对以无人机集群编队为研究问题时多智能体领域的国内外研究现状进行了综述和简易分析。主流通信策略有集中式、分布式和分散式三种方法；常用的无人机编队策略有领航-跟随法、虚拟结构法、行为法、一致性控制方法；常用无人机避撞策略有最优化方法、人工势场法、感知规避法。本文对这些方法一一进行了简单原理介绍、应用场景介绍以及各自的优缺点分析。

关键词：多智能体；协同控制；集群；

目 录

摘 要	I
1 讲座内容简介	1
2 国内外研究现状综述	2
2.1 多无人机通信策略	3
2.2 多无人机编队策略	5
2.3 多无人机避撞策略	5
3 未来的研究方向	6
4 自我的心得体会	6
5 参考文献	7

1 讲座内容简介

张宏伟老师开展的“多智能体协调控制之魅力”课程讲座围绕多智能体协同控制介绍了多智能体系统的由来、多智能体协同控制的应用、多智能体集群控制的发展趋势、多智能体理论研究的概述以及多智能体前沿问题。

大自然群体现象启发多智能体协同控制理论研究，理论研究指导工程应用，工程应用需求启发新的理论研究。



图 1-1 大自然集群现象

大自然中多智能体系统具有以下特点：

- (1) 多个个体，个体间存在信息交流
- (2) 具有自主行为
- (3) 没有中央“领导者”
- (4) 仅能感知到邻居行为
- (5) 呈现一定的群体行为

其具体工程应用有：

- (1) 电脑动画制作
- (2) 灾难现场搜救
- (3) 军事：人、无人机、地面机器人协同作战、探测
- (4) 无人机编队

多智能体协同控制将会以 5S（小型、安全、智能、敏捷、集群）为发展要求，发展前沿趋势有：

- (1) 无人机分布式空中作战

- (2) 无人舰艇编队
- (3) 多无人机协同搬运
- (4) 智能电网

课程讲述中理论研究概述介绍了 Boids 模型以及 Vicsek 模型，Jadbabaie 等人运用了控制论、矩阵论、图论等知识对 Vicsek 模型进行了理论研究。并提出多智能体协同控制问题将会从问题描述、拓扑结构、个体动力学特性三个维度进行延拓。

多智能体协同控制前沿问题有：

- (1) 一致性问题
- (2) 蜂拥问题
- (3) 编队问题
- (4) 领导跟随问题
- (5) 多领导-跟随者包含控制问题
- (6) 二分一致性问题

2 国内外研究现状综述

多智能体协同控制领域主要应用对象是无人机、轮式机器人以及机械臂等。这里分析以无人机集群编队为研究问题时多智能体领域的国内外研究现状。

随着控制领域的不断拓展以及无人机技术的不断进步，无人机的应用逐渐广泛，各国家和企业都对无人机应用有着广泛研究。无人机（UAV, Unmanned Aerial Vehicle）一般指通过基站遥控或自主控制的具有完备动力装置系统的无人驾驶舱飞行器，也被称为“空中机器人”。常用的无人机包括固定翼机、多旋翼飞行器、扑翼飞行器、伞翼机等。

随着电子信息技术的进步，无人机在侦察任务中表现出色。在越战期间，美国就曾使用大量无人机对高价值或者防御严密的军事目标进行侦察工作，这样一来可以减少人员伤亡或者被俘虏风险。到了 21 世纪，得益于电池、控制、通信、芯片等相关领域的发展，无人机尤其是四旋翼无人机发展迅速，民用消费级无人机逐渐走进人们生活的各个角落，代替人们完成危险、繁琐、枯燥的任务，例如科学研究、交通运输、高空拍摄、农业自动化、地质探测、自然灾害救援等。

即使单无人机已经具备十分优秀的性能，但仍存在许多局限。相比于集中

式基站控制下单无人机执行任务，多无人机协同的优势有：

- (1) 执行侦察任务时，多无人机视野广阔，侦察效率高^[1]；
- (2) 减少飞行阻力，提高效率，节省能量，提高续航；
- (3) 单无人机故障，编队其余无人机仍可继续执行任务；
- (4) 执行任务成功率和抗突发事件能力比单机任务高^[2]。

研究人员们观察自然界中鸟类的编队飞行，动物界中动物成群季节性迁徙以及蚁群搬运等自然现象^[3]，发现单无人机执行任务具有一定的局限性，多智能体之间的协同行为能起到节能、省力、省时等积极作用。



图 2-1 自然界鸟类协同飞行

与单无人机控制相比，多无人机协同控制具有适应性强、灵活性高的优点；因此国内外许多学者都在协同控制领域做研究，并且在理论部分，国内外学者已经完成了很多的工作，并取得了一定的成果。下面从通信、编队、以及避撞三个方面对国内外文献进行综述和简析。

2.1 多无人机通信策略

编队算法是基于自身和相邻（其他）智能体的位置、速度、角速度等状态给出控制指令的，故无人机间的通信策略会伴随着不同的控制算法，通信策略是多智能体编队控制中十分重要的一环。目前较为主流的通信策略主要分为三种：集中式、分布式、分散式，其中集中式和分布式通信策略更为常见^[4]。

(1)集中式 集中式通信策略是指将所有无人机的位姿信号返回到中央基站或者中央无人机，这种中央处理单元一般专门用于接发数据、进行数据处理、向各无人机返回控制指令。文献[5]采用的是集中式中央通信策略，为无人机建立三自由度模型，并建立起两个碰撞检测模型，在 Simulink 和基于 Qt 仿真平台-地面控制系统（GCS）中都通过了测试。在实验中，尽管人为施加了信号中

断,任一无人机通过地面站集中控制都可以在不修改程序的情况下实现编队飞行。

由于通信策略简单,集中式控制精度基本取决于中央单元的算力上限以及编队控制程序,控制效果是三种中最好的。但是该方法存在一定不足:由于过度依赖中央单元,中央单元的位置、算力、以及通信带宽等制约着可支持同时编队的最大机群数量。随着机群数量上升,通信时延会增加,编队系统稳定性可能会受到影响,严重甚至会失稳。

(2)分布式 分布式通信策略是各无人机通过处理自身位姿信息以及与临近无人机通信得到的位姿信息做出控制指令。随着处理器以及通讯设备的不断发展,这种方法受到越来越多的关注,其主要是因为这种方法所需的通信带宽小,且设计灵活^{[6]-[7]}。

起初,基于分布式通讯策略的多数研究内容集中于无向拓扑结构,但由于无向拓扑结构对通信带宽仍有着较高的带宽需求,用分布式策略处理庞大无人机集群时仍显得有些吃力。随着无人机集群编队领域的发展,通讯拓扑结构逐渐转向有向拓扑结构,对同一网络结构来说,单向拓扑结构的通讯量是无向拓扑结构的一半。发展至今,通讯拓扑结构也从单一固定的网络结构转变为变拓扑网络结构,以适应如变通信拓扑编队、无人机掉电或程序错误导致的通信中断、变成员数量动态编队等问题。李长江利用预测控制方法确定了在变通信拓扑结构和切换拓扑结构以及可变时滞下的一致性协议^[8]。Parker C. Lusk 等人率先使用机载定位传感器用现成的商用视觉惯性测程法实现了切换拓扑下的分布式无碰撞编队策略^[9]。

但是这种通讯方式仍有弊端,建立合理拓扑结构是使得编队控制系统稳定运行的前提,这也会导致控制系统设计困难。另外在控制精度上,分布式通信没有集中式高,这是因为在信号传输上,某一特定无人机的位姿信息传输到另一特定无人机通常上不是直接传输的,需要经过中间通讯节点传输,这会带来一定的通讯时延以及测量误差,并且误差和时延会随着中间节点数目的增加而增加。

(3)分散式 分散式通信策略是通过与某特定坐标点的位置关系确定编队位置,不需要信号收发中心,也不与临近智能体交换状态信息,各无人机分别到达编队任务点即可完成编队任务。Jie 等人在风力干扰的情况下,用分散式方法对无人机进行了编队控制系统设计^[10]。当然,这种方法下无人机不知道邻居无人机的位姿信息,编队过程需额外注意智能体间的避碰问题。其优点也十分明朗,既脱离了中央单元实现了去中心化,编队控制设计上较其他方法更为

直观简单。

2.2 多无人机编队策略

常用的无人机编队策略有：领航-跟随法、虚拟结构法、行为法、一致性控制方法，下面一一介绍。

(1)领航-跟随法 该方法中需要僚机跟随长机，僚机利用与长机之间的相对位姿信息与期望信号作对比，辅以比例控制，实现编队控制。该方法常见且使用广泛，但是这种控制策略十分依赖于长机，长机坠毁或者出现故障，整个机群会失去控制，没有很好得去中心化，将控制决定权分布在系统每一个智能体上，这是该方法的最大缺点。

(2)虚拟结构法 在领航-跟随法的基础上，虚拟结构法定义一虚拟中心点代替长机作用，即各无人机利用其与该虚拟中心点的位置关系进行编队控制。该方法将编队队形看做一虚拟刚体，通过各无人机与该刚体的相对位置进行定位。该方法解决了长机问题，但是由于编队是一动态过程，不能时刻保持这种刚体结构，该方法仍需进一步优化改善。

(3)行为法 该方法的基本思想是将编队中可能发生的事件用基本行为如避让、状态保持、伺服等描述出来。该方法是一种先因后果的运动控制系统方法，该方法难点在于如何抽象这些行为以及如何将事件描述成这些行为。其优点是仅需知道临近无人机信息，通讯量小，系统简单；缺点是难以描述动态特性、难以精确控制。

(4)一致性控制方法 该方法设计思想是所有个体仅接收相邻个体状态信息，通过控制程序，使得所有个体状态达到一致，其要求的通讯带宽不高，且能取得较好的控制效果，是当下一一种十分火热的编队策略。2004 年，Olfati-Saber 等人提出一致性控制方法，其分别对有向固定拓扑、有向切换拓扑以及无向有时延拓扑进行分析，建立了多智能体与网络拓扑结构的一致性理论^[11]。三年后，Olfati-Saber 等人提出了多智能体系统一致性分析的基本方法，考虑了通讯节点故障下多智能体稳定性，奠定了一致性控制理论的基础^[12]。

2.3 多无人机避撞策略

常用无人机避撞策略有最优化方法、人工势场法、感知规避法。

最优化方法是考虑寻找某一函数描述障碍物与无人机之间的关系，通过极值求解找到合适的控制输出，避免碰撞。该方法需要着重考虑的是时效性，以及确定一种确保时间收敛的标准，故难以用于实时控制。

人工势场法是类比于重力场和磁场将目标点设为引力点、障碍物点设置为排斥点，通过相应的引力斥力函数，智能体可以在避开障碍物的同时到达编队目标点。该方法与李雅普诺夫函数十分匹配，在无人机集群编队避障领域得到了广泛的应用。文献[13]应用人工势场法设计了一种非线性控制器，实现了轨迹跟踪、编队保持和避撞，并用李雅普诺夫方法证明了闭环系统的稳定性。该方法的缺点是引力场和斥力场共同作用下可能存在平衡点，在控制的过程中状态达到该平衡点时会出现局部振荡或者陷入局部最优解中，使得被控对象无法达到目标点。解决方法是在遇到平衡点时施加扰动或者回溯，跳出僵局。

感知规避法是通过感知障碍物，设定避障规则实现无人机避撞。其代表性方法是碰撞锥方法，知道与障碍物之间的距离以及相对速度，通过碰撞锥的方法实时预测可能碰撞位置和碰撞时间，从而实现避碰。该方法的缺点是需要知道每架无人机的位姿与速度信息，所需通信带宽较高。

3 未来的研究方向

就如老师课程讲座上所说，多智能体协同控制领域的前沿问题有一致性问题、蜂拥问题、编队问题、领导跟随问题、多领导-跟随者包含控制问题以及二分一致性问题；前沿发展应用场景有无人人机分布式空中作战、无人舰艇编队、多无人机协同搬运及智能电网等。

4 自我的心得体会

老师的这次讲座以及自己搜集的相关资料，让我初步了解了多智能体协同控制领域的主要思想以及前沿问题和发展趋势，丰富了我对控制领域应用的了解。该方向具有广泛前景，前沿应用贴合时代需要和科学技术的发展，相信该方向在不久的将来会得到很好的发展。

5 参考文献

- [1] 朱战霞,袁建平.无人机编队飞行问题初探[J].飞行力学,2003(02):5-7+12.
- [2] 宗群,王丹丹,邵士凯,张博渊,韩宇.多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(03):1-14.
- [3] Seiler P, Pant A, Hedrick K. Analysis of bird formations[C]//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002. IEEE, 2002, 1: 118-123.
- [4] 李元. 无人机编队协同控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学,2021.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.003007.
- [5] Zheng W, Wang H, Ji H, et al. UAV formation flight and collision warning with centralized control of ground control station[C]//2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). IEEE, 2019: 103-108.
- [6] Fu X, Pan J, Wang H, et al. A formation maintenance and reconstruction method of UAV swarm based on distributed control[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 104: 105981.
- [7] Belfo J P, Aguiar A P, Lemos J M. Distributed inverse optimal control for discrete-time nonlinear multi-agent systems[J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(6): 2096-2101.
- [8] 李长江. 具有变拓扑与变时滞的网络化多智能体系统的一致性研究[D]. 哈尔滨工业大学,2018.
- [9] Lusk P C, Cai X, Wadhwania S, et al. A distributed pipeline for scalable, deconflicted formation flying[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5213-5220.
- [10] Zhang J, Meng F, Zhou Y, et al. decentralized formation control of multi-UAV Systems under wind disturbances[C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2015: 7392-7397.
- [11] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [12] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [13] de Angelis E L, Giulietti F, Rossetti G. Multirotor aircraft formation flight control with collision avoidance capability[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 77: 733-741.