

多无人机协同自组织机制研究

岳源

(中国民航飞行学院, 四川 广汉 618300)

摘要: 首先分析了已有的两种多无人机自组织机制的优劣, 提出了基于桥联模型的多无人机自组织机制; 然后阐述了该机制的工作原理并给出了两种典型的工作情况; 最后基于该机制建立了多无人机协同的架构, 分析了协同架构中的各个系统的组成; 在考虑动态战场环境下, 对无人机平台和系统之间的信息交互方式做了分析。

关键词: 多无人机协同; 自组织机制; 桥联模型

本文引用格式: 岳源. 多无人机协同自组织机制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018(1): 153–156, 178.

Citation format: YUE Yuan. Research on Multi-UAVs Cooperative Self-Organization Mechanism[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(1): 153–156, 178.

中图分类号: V279+.3; TJ8

文献标识码: A

文章编号: 2096–2304(2018)01–0153–04

Research on Multi-UAVs Cooperative Self-Organization Mechanism

YUE Yuan

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China)

Abstract: First of all, based on the analysis of the advantages and disadvantages of the existing two kinds of UAVs self-organization mechanism, the bridging model self-organization mechanism of multi-UAVs was put forward; Then the working principle of the mechanism was described and two typical working conditions were given; Finally, based on this mechanism, a multi-UAVs cooperative architecture was established, and the composition of each system in the cooperative architecture was analyzed. Considering the dynamic battlefield environment, the information interaction between UAV platform and system was analyzed.

Key words: multi-UAVs cooperative; self-organization mechanism; bridging model

无人机被广泛使用于工作环境恶劣的场所, 多个无人机组成集群协同完成任务成为无人机使用的主流方法^[1–6]。这种方法一方面弥补了现阶段无人机智能化水平的不足, 另一方面又提高了任务完成度。但是无人机数量较多时, 多无人机协同带来了调度困难、协同不利的问题, 增加了无人机使用的难度。多无人机集群进行协同的关键在于多无人机内部的自组织机制。合适的无人机自组织机制可以在提高任务完成度的同时降低调度难度。因此, 多无人机自组织机制被各国研究人员广泛关注。

近年来, 研究人员根据无人机的智能水平, 主要研究了两种模式的无人机自组织机制。

集中式自组织机制, 针对不同功能的无人机将集群设定为长机——僚机模式, 主要被用于多无人机的密集编队飞行^[7–9]。由一架或多架无人机作为指挥机, 承担长机角色。其他无人机承担僚机角色, 执行长机发布的命令完成相应的任务。这一模式通常抽象为轮式模型。这种模式适合使用在小编队的无人机协同中, 且需要处在长机位置的无人机智能化程度比较高, 同时, 一旦长机故障或损毁, 将影响任务

收稿日期: 2017–08–14; 修回日期: 2017–09–20

基金项目: 中国民用航空局民航教育类人才资助项目(14002600100017J173)

作者简介: 岳源(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞机总体设计与系统仿真研究, E-mail: wodengshanghaonan@126.com。

完成。

分布式自组织机制,针对相同功能的无人机将集群设定为蜂群模式,每一架无人机都独立承担任务,这一模式通常抽象为星式模型。这模式适合使用同构型无人机协同,且适用于低烈度战场环境,面对动态战场环境或集群中某无人机不能执行任务时,这种协同机制也有一定的局限性^[10-15]。

也有学者将集中式、分布式的自组织机制综合应用,虽然对无人机的协同能力有了深入的挖掘,但这一模型更适用于多无人机协同完成已装订好的任务^[16-18]。如果处于指挥位置的无人机损失,那么整个集群处于混乱状态中。如果执行任务的无人机发现了目标却不在良好的任务执行位置,也会降低任务完成度。

1 基于桥联模型的自组织机制

1.1 桥联模型的特性分析

桥联模型是一种常用的系统可靠性模型,如图1所示。A1、A2、C1、C2是组成一个电路的4个电阻,K为电路开关。当四个电阻没有故障时,开关K断开,A1、A2、C1、C2组成并联电路。当4个电阻任一出现故障时,开关K闭合,将故障电阻断路,其他3个电阻组成混联电路。以A1故障为例,分析桥联模型特性(图2)。当A1故障时,开关K闭合后,电阻C1、C2并联后与电阻A2串联组成混联模型,这样保障了电阻A1损毁后,电路依然畅通,且电流依然分别通过电阻C1、C2,这样并没有破坏原电路。因此,桥联模型的特性可以归纳如下:

1) 该系统具有良好的冗余度,可以在单元发生故障时,保障系统继续应用;

2) 该系统内的单元具有良好的自组织性,当单元发生故障时,依然能够保障原有系统的内部结构,不需要外界干预;这保障该系统内的单元具有无中心化的特点,没有一个单元处于系统中心控制的位置,不会因为处于中心位置的无人机受损导致系统瘫痪;

综上,可以发现如果以桥联模型为基础构建多无人机自组织机制,不但提高了多无人机的任务完成度,又满足多无人机协同的无中心化、自组织性的要求。因此本文应用桥联模型研究多无人机协同时的自组织机制。

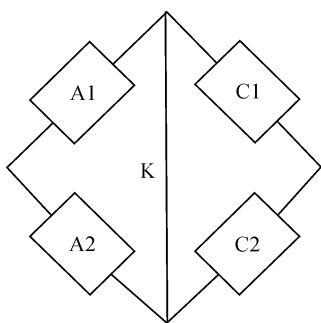


图1 桥联模型

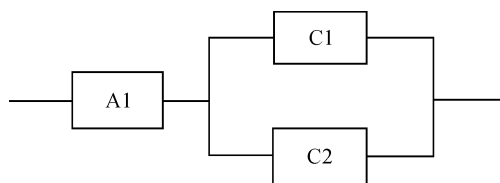


图2 A1故障后的混联模型

1.2 任意无人机损伤情况下自组织机制

通过多个无人机平台组建无人机集群的目的就是为了提高任务完成度,因此多无人机自组织机制的好坏就是以任务完成度为判断标准。然而,面对动态环境,无人机集群中一旦有无人机损失,就会带来任务完成度的降低。这里通过桥联模型的自组织机制,集群可以自动调配无人机执行未完成的任务,自然就提高了任务完成度。

无人机集群执行任务之前都进行了任务装订,例如,无人机A1完成C1任务,无人机A2完成C2任务。如图3所示。当无人机A1不能完成任务时,机群接受这一信息后,进入桥联自制协同机制。距离目标最近的A2承担任务C1,先完成任务C1再接着完成任务C2。任务步骤:

步骤1:按任务装订执行任务;

步骤2:当无人机A1不能执行任务C1,将这一信息共享于机群;

步骤3:无人机A2无人机接受信息执行任务C1;

步骤4:任务C1完成终止或无人机A2也损毁时,任务结束。

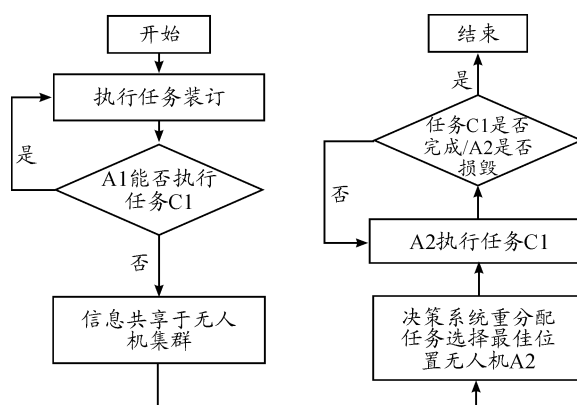


图3 任意无人机损伤情况下自组织机制

在这种情况下,无人机A1和A2相当于桥联模型中的电阻,无人机集群决策系统相当于桥联模型中的开关。这一决策系统根据无人机A1是否损毁,决定是否实施桥联模型的自组织机制。在无人机集群中选择无人机A2来执行任务C1。其中无人机A2被选中的条件包括:A2的实时位置是集群中最佳执行C1任务的无人机,原任务装订中A2执行的任务等级比C1任务的等级低。

1.3 A导B射的多无人机自组织机制

因为无人机携带的导弹数目有限,往往无人机A1能够获得攻击任务目标良好的观测窗口,却因为导弹已经耗尽无

法打击目标,造成时效性任务的失败。这里采用桥联模型的自组织机制来提高任务的完成度。当无人机 A1 使用完导弹,但仍旧能够有效锁定目标时,将这一信息共享与机群,由无人机 A2 发射导弹,无人机 A2 发射的导弹接受无人机 A1 的雷达制导信息攻击目标,完成任务,如图 4 所示。任务步骤:

步骤 1: 按任务装订执行任务;

步骤 2: 无人机 A1 导弹用完不能攻击任务目标 C1, 将这一信息共享于机群;

步骤 3: 无人机 A2 接受信息执行任务 C1;

步骤 4: 无人机 A2 发射导弹,导弹接受无人机 A1 制导,攻击 C1

步骤 5: 任务目标 C1 被击毁或无人机 A2 导弹用完时,任务结束。

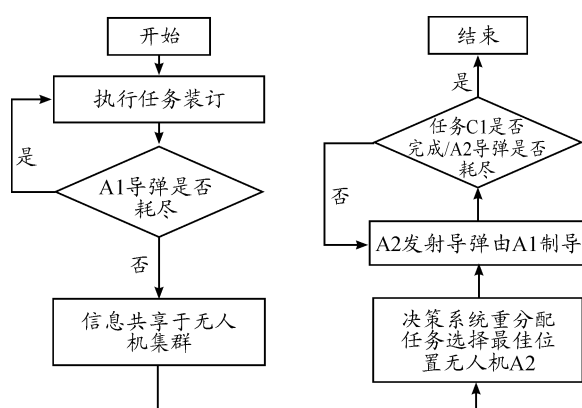


图4 A导B射的多无人机自组织机制

在这种情况下,无人机 A1 和 A2 相当于桥联模型中的电阻,无人机集群决策系统相当于桥联模型中的开关。这一决策系统根据无人机 A1 导弹是否耗尽,决定是否实施桥联模型的自组织机制,选择无人机集群中最适合发射导弹的无人机为 A2 与无人机 A1 组成桥联系统,A2 发射导弹,导弹接受 A1 无人机火控雷达制导攻击任务目标 C1。其中任务目标 C1 应处在 A2 导弹攻击的有效射程内。

2 多无人机协同架构

2.1 协同架构描述

在面对动态战场环境中执行任务,无人机集群不可避免的会出现预定任务无法完成的情况,这就要求多无人机在协同完成任务时要有良好的自组织机制。这一机制的建立来源于多无人机的协同架构。多机协同架构包括功能系统、决策系统、战场环境系统,每个分系统通过链路通信接口实现信息交互,如图 5 所示。

该架构的功能系统可以拓展为多个功能系统,其中功能系统可由 1 个或多个无人机平台组成,构成整个架构的执行层;决策系统由任务分配系统和任务评估系统组成,构成整个架构的决策层;战场环境系统为决策系统和功能系统提供

战场动态,决策系统可以根据新的战场动态重新分配任务、功能系统中的无人机平台根据新的战场动态提出该平台的新的任务策略并将这一策略传递给决策系统和其他功能系统。

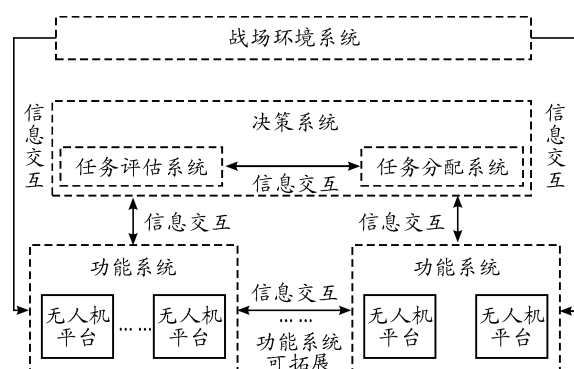


图5 多无人机协同架构

2.2 功能系统描述

功能系统由无人机平台构成,无人机的数量可以根据任务情况而定。功能系统中的无人机平台既可以兼容同构无人机,也可以兼容异构无人机,通过信息交互,无人机平台既可以知道自己的战场环境情况,也可以知道友邻无人机的战场情况,具有很强的信息共享能力。各无人机之间通过数据链进行信息交互,共享战场信息、无人机位置、无人机武器信息、无人机雷达信息。

2.3 决策系统描述

决策系统包括任务分配系统和任务评估系统组成。当无人机平台智能水平不高时,控制站提供的信息和指令。当无人机平台智能决策系统在桥联模型的自组织机制中起的作用就是开关 K 的作用,根据平台或战场环境系统反馈的信息进入任务评估系统,经过评估后决定是否启动任务重分配从而实现无人机集群的决策自组织。通过相互间信息通信产生整体效应,实现较高度度的自主协作。智能水平较高时,无人机平台集成决策系统,任务分配系统与任务评估系统集成于地面控制站,无人机平台通过数据接口接受地面信息如图 6 所示,通过集成于无人机平台上的决策系统通过数据链接受战场环境信息和无人机平台的信息。一旦集群中的无人机因为损伤或者其他的原因不能完成任务时,通过数据链将信息共享于集群,集群的决策系统根据新的信息进行任务重分配。

2.4 战场环境系统描述

战场环境系统集成于各个无人机平台上。由无人机平台携带的探测系统探测战场环境,并信息共享于集群。由集群中所有无人机平台战场环境系统整合所有信息,生成实时战场环境信息,共享于集群。战场环境系统的信息包括战场地理信息、战场气象信息、战场目标信息、战场威胁信息、自身速度位置信息、友邻无人机信息。

整个架构由战场环境系统驱动,当战场环境未与任务装订中的环境不同时,决策系统不工作,功能系统按原任务装

订执行任务。一旦战场环境发生变化,决策系统启动,进行任务重分配。

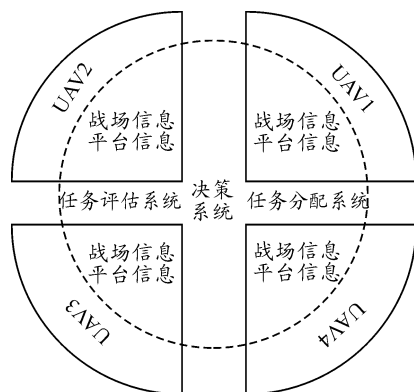


图6 决策系统

3 算例分析

设定: 两架具有自主协同能力的察打一体无人机 A1、A2 构成作战单元, 执行对地攻击任务。编队数据通信正常率为 0.8, 在到达战场的航线上会遭遇敌方防空火力袭击, 敌防空火力由便携式防空导弹班组成, 装备 2 发导弹, 摧毁目标概率为 0.75。

无人机则以恒定高速发射导弹攻击敌地面目标, 每架无人机携带 1 枚远程空对地导弹, 单发导弹命中目标的概率为 0.85, 且认为命中即摧毁。

1) 基于桥联模型的任务完成度计算:

$$P_{wk} = P(A_{1sur}C_{wk} \cup A_{2sur}BC_{wk} \cup A_{2sur}C_{wk})$$

其中: P_{wk} 为编队成功完成任务的概率, A_{sur} 为无人机的生存概率, C_{wk} 为无人机攻击成功的概率, B 为无人机集群数据通信正常概率。据此有:

$$\begin{aligned} P_{wk} &= P(A_{1sur}C_{wk} \cup A_{2sur}BC_{wk} \cup A_{2sur}C_{wk}) = \\ &P(A_{1sur}C_{wk}) + P(A_{2sur}BC_{wk}) + P(A_{2sur}C_{wk}) - \\ &P(A_{1sur}BC_{wk}) - P(A_{2sur}BC_{wk}C_{wk}) - \\ &P(A_{2sur}BC_{wk}C_{wk}) + P(A_{1sur}A_{2sur}BC_{wk}C_{wk}) = \\ &0.938 \end{aligned}$$

2) 非协同的任务完成度计算

$$P_{wk} = P(A_{1sur}C_{wk}) \times P(A_{2sur}C_{wk}) = 0.272$$

通过计算, 可得编队协同作战完成任务的效率比非协同情况高。这表明: 第一, 桥联模型能够表征无人机内在协同的机理。非协同模式中无人机只能独立完成的任务模式, 基于桥联模型的协同模式可以在 A1(A2) 的效率比非协同情况高。可由集群控制决策中心协调 A2(A1) 来完成。第二: 基于桥联模型的协同模式提高了任务完成度。基于桥联模型的任务完成度是非协同模式的三倍多。

4 结论

1) 分析了多无人机协同方式, 研究了桥联模型的特点,

建立基于桥联模型的多无人机自组织机制。基于这一机制研究了任意无人机损伤及 A 射 B 导的两种典型多无人机自组织机制中的桥联模型应用。

2) 基于桥联模型的多无人机自组织机制提出了面向高智能化无人机的多无人机协同架构, 并阐述了构建协同架构的各个系统工作原理和组成。面向动态战场环境, 多无人机协同一方面依赖于无人机平台的软硬件水平, 无人机平台需要集成大量的电子设备, 在同一集群中电磁信号既要保障兼容性好, 又要保障较高频率的信息交互, 另一方面, 在较高的无人机技术的基础上, 需要有良好的自组织机制以发挥无人机平台的优势。其中, 随着技术水平的提高, 要增强无人机面对战场突发情况的自治水平, 体现无人机在协同时的无中心、自组织的特点。从而提多无人机协同任务完成度, 增强多无人机使用的范围。

3) 通过给出的算例可以清楚看到, 基于桥联模型的自组织协同机制相对于非协同模式有着极大的优势。

参考文献:

- [1] ZHANG T, LI Q, ZHANG C S et al. Current Trends in the Development of Intelligent Unmanned Autonomous Systems [J]. Front. Inform. Technol. Electron. Eng. 2017, 18(1): 68-85.
- [2] HUNG S M, GIVIGI S N. A Q-Learning Approach to Flocking With UAVs in a Stochastic Environment [J]. IEEE transactions on cybernetics 2017, 47(1): 186-197.
- [3] ROBERTO G V, SHIN H S. Communication-Aware Task Assignment for UAV Cooperation in Urban Environments [J]. IFAC Proceedings Volumes 2013, 46(30): 54-58.
- [4] SUJIT P B, RANDY B. Multiple UAV Exploration of an Unknown Region [J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence 2009, 52(2): 17-22.
- [5] ZHU S Q, WANG DW, LOW C B. Cooperative Control of Multiple UAVs for Moving Source Seeking [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems 2014, 74(1/2).
- [6] 尹高扬, 周绍磊, 贺鹏程, 雷肖剑, 康宇航. 国外多无人机协同任务分配研究现状及发展趋势 [J]. 飞航导弹, 2016(5): 54-58, 82.
- [7] 赵锋, 杨伟, 杨朝旭. 无人机紧密编队飞行控制仿真研究 [J]. 航空科学技术, 2012(5): 14-17.
- [8] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究 [J]. 机器人, 2010(4): 505-509.
- [9] 赵锋, 杨伟, 杨朝旭. 基于局部综合制导与控制的无人机紧密编队飞行仿真 [J]. 四川兵工学报, 2013(3): 78-82.

(下转第 178 页)

- 482-489.
- [25] 李雪峰, 夏申琳, 杨晓. 增材制造技术在船舶制造中的应用和展望[J]. 金属加工: 冷加工, 2016(16): 6-8.
- [26] 祁斌. 3D 打印技术在船舶领域的应用[J]. 中国船检, 2016(6): 94-100.
- [27] 陈超, 刘李明, 徐江敏. 金属增材制造技术在船舶与海工领域中的应用分析[J]. 中国造船, 2016, 57(3): 215-225.
- [28] 西门子中国. 3D 打印在目前应用的领域中具体发展到什么地步[EB/OL]. [2015-04-21]. <https://www.zhi-hu.com/org/xi-men-zi-zhong-guo/answers>.
- [29] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5-7.
- [30] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002(3): 40-43.
- [31] 颜永年, 齐海波, 林峰, 等. 三维金属零件的电子束选区熔化成形[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 87-92.
- [32] 陈光霞, 曾晓雁, 王泽敏, 等. 选择性激光熔化快速成型工艺研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(1): 1-3.
- [33] 邓贤辉, 杨治军. 钛合金增材制造技术研究现状及展望[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(5): 113-120.
- [34] 中国有色金属. 新材料等十大重点领域成制造业科技创新主战场[EB/OL]. [2016-06-28]. <http://www.cnmm.com.cn/ShowNewsList.aspx?id=29&pageindex=3>.
- [35] 王华明. 金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光快速成形技术研究进展[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 473-478.
- [36] YAN X, GU P. A review of rapid prototyping technologies and systems[J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(4): 307-318.
- [37] 杨永强, 刘洋, 宋长辉. 金属零件 3D 打印技术现状及研究进展[J]. 机电工程技术, 2013(4): 1-7.
- [38] 陈济轮, 董鹏, 张昆, 等. 金属材料增材制造技术在航天领域的应用前景分析[J]. 电加工与模具, 2014(1): 66-69.
- [39] 胡孝昀, 沈以赴, 李子全, 等. 金属粉末激光快速成形的工艺及材料成形性[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(3): 378-383.
- [40] 张巧凤. 浅谈增材制造技术在电子设备结构研制中的应用[J]. 机械研究与应用, 2015(5): 198-199.
- [41] 赵剑峰, 马智勇, 谢德巧, 等. 金属增材制造技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014(5): 675-683.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 156 页)

- [10] MIRZAEI M, GORDON B, RABBATH C A, et al. Cooperative multi-UAV Search Problem with Communication Delay [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2010: 8420.
- [11] RIEHL J R, COLLINS G E, HESPANHA J P. Cooperative search by UAV teams: A Model Predictive Approach Using Dynamic Graphs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2637-2656.
- [12] WANG Y C, LIU J G. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(26): 3409-3418.
- [13] ZHAO Z, LU G. Receding Horizon Control for Cooperative Search of Multi-UAVs Based on Differential Evolution[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2012, 5(1): 145-158.
- [14] YANG Y, POLYCARPOU M M, MINAI A A. Multi-UAV Cooperative Search Using an Opportunistic Learning Method [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2007, 129(5): 716-728.
- [15] ESMAILIFAR S M, SAGHAFI F. Cooperative Localization of Marine Targets by UAVs [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 23-42.
- [16] 邓启波. 多无人机协同任务规划技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [17] 林林. 基于协同机制的多无人机任务规划研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [18] 杨华江. 求解未知环境下多无人机任务自组织的蚁群算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.

(责任编辑 杨继森)