

MUAVs 系统的混合组织模型

张凯龙^{1,2}, 杨 静^{1,2}, 梁 克^{1,2}, 周兴社^{1,2}

(1. 西北工业大学计算机学院, 西安 710072; 2. 陕西省嵌入式系统技术重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 分析多 UAV 系统的协作控制以及 2 种基本的组织模型及其优缺点, 结合大规模 UAVs(MUAVs)系统协作的复杂特征, 提出适用于 MUAVs 系统的几种分级混合网络组织模型以及具有自适应能力的动态杂类混合组织模型。研究结果表明, 该方法可有效降低 MUAVs 系统管理和通信复杂度, 提高系统的可靠性与鲁棒性。

关键词: 大规模 UAVs; 协作; 组织; 模型; 重组

Hybrid Construction Models of MUAVs

ZHANG Kai-long^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, LIANG Ke^{1,2}, ZHOU Xing-she^{1,2}

(1. School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Embedded System Technology, Xi'an 710072)

【Abstract】 This paper analyzes the mechanisms and characteristics of two primary construction models for UAVs. Some new multi-level hybrid construction models, which are suitable to the application of Massive UAVs(MUAVs), are brought forward and discussed. An adaptive construction model and its key issues are studied based on the (quasi-)static models above. Simulation results show that these models are effective to reduce costs, and to improve the reliability and robustness of a MUAVs.

【Key words】 Massive UAVs(MUAVs); cooperation; construction; model; reconfiguration

1 概述

随着 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)个体自主控制能力及协作控制能力的不断增强, 多 UAV 系统在安全反恐、环境监测等领域得到了广泛的应用。由于多 UAV 系统在执行任务过程中, 可以依据外界环境的变化及其自身状态等信息进行动态编队管理、任务规划与协同等, 因此其较多个单 UAV 集合在执行任务时有更高的可靠性、鲁棒性及有效性^[1-3]。随着应用环境及任务的日益复杂, 大规模多 UAV 系统(Massive UAVs, MUAVs)开始成为一个重要的研究与应用方向。

与目前研究的多 UAV 系统相比, MUAVs 具有系统规模与资源消耗大、通信及协同/协作过程复杂等特点。本文在分析多 UAV 系统协作基本问题与几种基本组织模式的基础上, 结合 MUAVs 特性重点研究了新型的 UAV 混合作网络组织模型。

2 多 UAV 的基本协作组织模型

UAV 机群被整体部署以前, 使用者要先为各 UAV 设定任务、机群等信息, 如编队成员、环境状态、空域信息等, 此后整个机群就开始自主执行任务并依据外界环境进行动态的任务调整等^[4]。因此, 基本的多 UAV 协作控制问题可被描述为: 在高度动态、开放的环境中, 不需过多的人为干预, 多 UAV 可以一致、有效地进行机动并完成特定任务。假定各 UAV 实体的嵌入式系统中都包含了一个预先指定的、按特定顺序执行且满足特定时间及能耗约束的全局任务列表, 以及一些有限的关于环境及编队成员信息, 基本的协作控制问题描述如下^[1]:

在考虑环境扰动(如突然出现的威胁)和有限可用信息导致的不确定情况下, 通过为每一个飞行器适当地划分任务, 动态规划、协调各 UAV 的路径与动作(如路径规划、控制命

令等), 从而保证编队任务成功执行。同时, 为使 UAV 个体行为能够有效满足系统的整体行为, 进一步定义如下个体行为规则:

- (1) 不能伤害友机, 必要时主动保护友机;
- (2) 必须服从友机给定的方向, 除非这个命令违反规则(1);
- (3) 在不违反前 2 条规则的前提下, UAV 必须尽量保证自己生存。

2.1 C 模式协作控制

集中式(Centralized 模式, C 模式)控制中, 机群中存在一个中心主控 UAV(或有人机等), 其他 UAV 则属于被控对象。其中, 主控 UAV 接受来自地面的任务, 并根据所获得的编队状态信息进行任务规划、分配等。而被控 UAV 则主要是通过数据链接收主控 UAV 发来的控制和任务命令, 并进一步对自身任务、状态进行适应性控制。由此可知, 主控 UAV 要进行大量的计算以完成任务的规划和分配, 因此, 通常都采用具有多个高性能处理机的硬件平台。另外, 由于主控 UAV 要将规划后的任务子集及时部署到其他 UAV, 因此要具有一定的实时通信能力及足够的信道与带宽。文献[2]研究了一种符合集中规划、分散执行策略的“领导者-追随者”协作控制模型, 如图 1 所示, 其中, UAV1 为具有高性能计算能力的领导者。

集中式控制模式的优点在于其组织结构与控制方式都较为简单, 也仅对主控 UAV 的计算能力有较高要求。与传统方

作者简介: 张凯龙(1977-), 男, 讲师、在职博士研究生, 主研方向: 自适应嵌入式实时计算, 嵌入式软件测试; 杨 静, 硕士研究生; 梁 克, 博士研究生; 周兴社, 教授、博士生导师

收稿日期: 2007-10-15 **E-mail:** kl.zhang@nwpu.edu.cn

式的集中式控制类似,其不足是主控 UAV 是通信与计算的瓶颈,且属于单点故障系统,实际应用中需要采用辅助策略来解决这些问题。

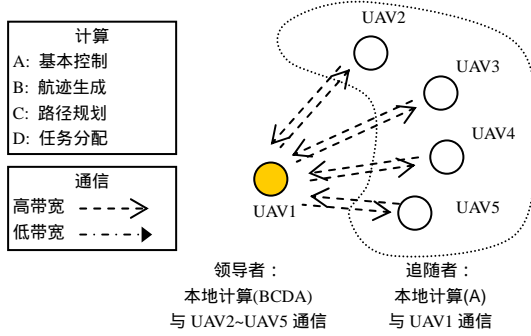


图1 多 UAV 的集中式协作控制模式

2.2 D 模式协作控制

与集中控制模式不同的是,分散式(Decentralized 模式, D 模式)控制中采用协作规划、分散执行的机制。这种模式中,各 UAV 都有一定的计算能力和协作控制能力,相互之间需要传输任务数据、状态信息和控制指令等,进而合作完成最终任务。D 模式中没有中心控制点,也就没有单点故障问题及对某高性能 UAV 的特殊需求,这有效提高了 UAV 编队的容错能力和整个系统的鲁棒性^[1]。

但该模式要求全局优化的原始任务分解、UAV 间的深度信息交换、编队运行性能的方法保障。图 2 为 5 架 UAV 组成分散式协作控制机群,其中,各 UAV 通过相互通信共享所有的全局信息。但这将大大加剧对 UAV 个体资源的消耗,同时降低 UAV 机群对外界环境变化的感知效率,管理难度加大。

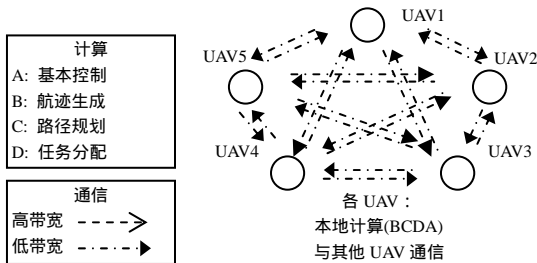


图2 多 UAV 的分散式协作控制模式

一种解决方法是利用约束通信带宽与频段来限制各 UAV 所能通信的范围和对象,使得 UAV 不需与特定范围以外的 UAV 通信,如图 3 所示^[1]。在需要进行超范围通信时,UAV 可通过其他 UAV 进行中转,这可转化为 Ad Hoc 网络与路由管理问题。

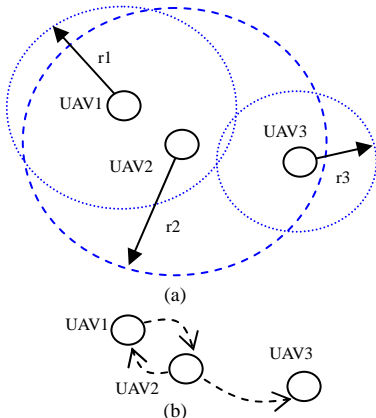


图3 约束带宽时的 UAV 通信与协作

3 分级协作的混合网络组织模型

随着多 UAV 系统规模的增大,单一的集中式控制或是分散式控制模型已无法再满足 MUAVs 的应用需求^[5]。为了进一步有效发挥以上 2 种基本组织模型的优点,本文提出了分级的混合式 UAV 网络组织模型,即在 MUAVs 中采用多层次、多种类的组织模式。其中,多级分散式(C_C 模式)和多级集中式(D_D 模式)仅由多个同构子网络构成,其特性与传统 C 模式、D 模式类似。本文仅重点研究基于 C_D 模式、D_C 模式以及动态的混合协作模型。

3.1 C_D 型分级混合协作控制

C_D 型分级混合组织模型是一个二级控制模型,上层子系统采用 C 模式,下层的各个子系统则采用 D 模式,其体系结构如图 4 所示。UAV 机群分为两级子系统,UAV1~UAV4 组成了一个集中控制的一级 UAV 机群子系统 1。UAV1 作为该子系统的领导者负责感知 UAV2~UAV4 的状态,进行任务规划与分配等,而 UAV2~UAV4 即是一级子系统内的追随者,也是各分散式二级子系统的成员和业务代理。在这种情况下,UAV2~UAV4 向 UAV1 提交的不再只是其自身的状态信息,而是各子系统当前的状态与能力描述,这是 UAV1 为各二级子系统分配任务的依据。UAV2~UAV4 把从 UAV1 接受的子任务集合向其子系统广播,进而完成分散式协同分配与控制。在 UAV1 未收到新任务的情况下,各分散式子系统独立运行、互不干涉。

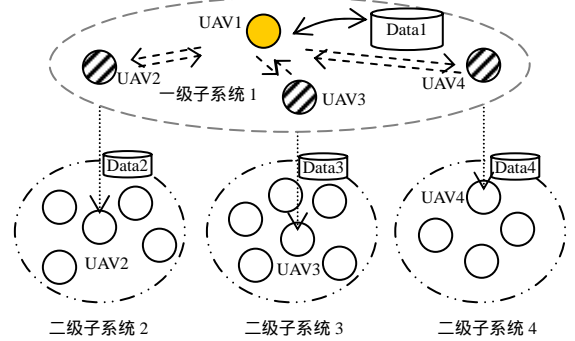


图4 C_D 混合控制模式

分析 C_D 模式可知,整个系统除了对一级子系统中领导者的计算、通信能力有较高要求外,对二级子系统所选举的代理没有特别要求。由于各一级、二级子系统的规模减小,因此对其领导者的性能要求以及通信的消耗也大大降低。该模式的缺点在于,一级子系统仍然是单点故障系统,因此,这一模式常用于领导者远离危险区域的环境中。为进一步提高系统的可靠性,二级子系统内的代理采用了动态选举机制。动态机制将有助于提高各子系统的鲁棒性。

3.2 D_C 型分级混合协作控制

图 5 是一种 D_C 分级混合组织模型,即一级子系统采用分散控制模式,二级子系统采用集中控制模式。一级子系统由二级子系统内的领导者组成,其系统规模取决于二级子系统的划分数量。UAV1~UAV3 是一级子系统的成员,互相共享整个一级子系统的所有数据,并通过分散式规划、分散式协作的方式进行任务规划与协同控制。同时 UAV1~UAV3 又是二级子系统的领导者,具有较高的计算能力和通信能力。该模式的优点在于,分散式控制子系统的规模大大降低,其通信消耗较小,对外界环境变化的感知灵敏度提高。较 C_D 模型而言,该模型中需要多个高性能的 UAV 实体作为二级子

系统的领导者,而对这些领导者的平均性能需求则与子系统体积成正比,与子系统数量成反比。

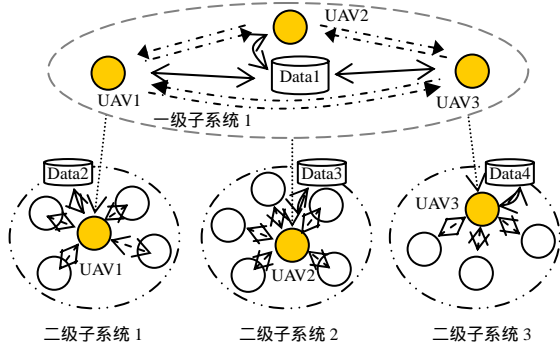


图5 D_C混合控制模式

在该模型中,各二级子系统仍存在单点故障问题,可通过以下方法解决:(1)可适度降级的领导者动态选举,即领导者失效后选择另一同等或较低性能的 UAV 作为领导者;(2)动态组织模型转换,即从该二级子系统选择一个代理进入一级子系统,此时该二级子系统由集中式控制转换为分散式控制,整个组织模型转化为新的 D_C/D 杂类模型。

3.3 自适应动态混合协作控制

以上几种 MUAVs 网络组织模型都采用静态或半静态机制。随着高性能嵌入式计算、嵌入式并行计算等技术的不断发展,新型智能 UAV 大都采用了由多个嵌入多处理机组组成的高性能分布式计算平台,处理能力大大增强。因此,对于多用途、高性能 UAV 组成的 MUAVs 而言,使用动态杂类混合协作组织模型就成为可能。以下仍以一级子系统和多个二级子系统为基本架构。

(1)全局信息的共享访问机制

动态组织模型转换的目的是适应任务变化,优化 MUAVs 的可靠性等整体性能,其主要发生在二级子系统中。在 UAV 个体性能存在差异的情况下,主要是指 D 模式转为 C 模式,但当编队是由多用途、高性能 UAV 组成时,也可是 C 模式、D 模式的相互转换。

模型转换的根本问题在于各 UAV 可访问的数据范围,这将直接制约这些 UAV 成员所能体现的能力大小。在 D 模式中,各个 UAV 拥有相同的数据信息库,因此,其转为 C 模式时不存在数据迁移问题。对于 C 模式而言,由于数据都被收集并存放在领导者 UAV 中,其他成员只拥有部分信息,因此要实现转换就必须考虑新的机制来解决信息共享问题。

(2)MUAVs 的自适应动态重组

本文进一步引入自适应动态重组机制,即在任务目标发生变化、子系统任务处理能力过剩或不足时,MUAVs 可在全局优化的基础上对各子系统的规模、组织模型等进行自适应动态调整。自适应动态重组过程主要涉及单个 UAV 迁出或迁入特定子系统以及子系统的拆解与合并等。

在二级 C 模式中的领导者以及 D 模式中的代理不能被迁出子系统的前提下,领导者或代理根据任务的变化(如突然出现的多个跟踪目标等)以及当前子系统的状态进行能力评估,并将相关的资源过剩迁出与不足迁入请求发送到一级子系统内的其他成员,进行协商。在结合时间、距离、效能等因素进行综合评价后,一级子系统控制特定子系统将 UAV 迁移到另一个子系统。这类似于战场环境中的援军策略。子系统的分离较合并更为复杂一些,除了要对领导权/代理权进行动态

分配或收回,同时还要按照任务状态对子系统进行划分,具体可由集合划分的相关知识进行求解。因此,自适应动态重组是 MUAVs 可变结构组织模型研究的一个重要问题。具有自适应能力的可变结构组织模型是未来多 UAV 系统实现自适应管理及智能协作控制的重要支撑技术。

4 通信性能分析

设编队中共有 N 架 UAV($N \geq 2$), C 是一级子系统接受一次任务时所需的通信量,各组织模型所需的通信量可由下式计算。

(1)C 模式的通信总量 C_c

$$C_c(N) = l \times (N-1) \times AverC1 + \Delta C \quad (1)$$

其中 l 是一次任务分配过程中两 UAV 之间需要通信的次数, $AverC1$ 是 UAV 之间的平均通信量。

(2)D 模式的通信总量 C_d

$$C_d(N) = m \times N(N-1) \times AverC2 + N \times \Delta C \quad (2)$$

其中,忽略各 UAV 获取任务集合的时间后,仅考虑各 UAV 与其他 $(N-1)$ 个成员进行通信来协商任务的情况。设平均通信量为 $AverC2$,常量 m 为完成任务分配所需的平均通信次数,则总的要有 $m \times N(N-1)$ 次通信。

(3)C_D 模式的通信总量 C_{C-D}

假设两级系统采用了非冲突信道进行通信,且划分为 1 个一级子系统和 $k(k \geq N-1)$ 个二级子系统,二级子系统 $i(i=1,2,\dots,k)$ 中有 r_i 个成员。那么一级子系统 C_{C-D1} 的通信量可由式(3)计算。

$$C_{C-D1}(k) = l \times k \times AverC1 + \Delta C \quad (3)$$

由于有效缩小了二级子系统的规模,且各子系统内部独立通信,因此二级子系统 i 内的通信总量 C_{C-D2} 可由式(4)计算。

$$C_{C-D2}(r_i) = m \times AverC2 \times r_i(r_i - 1) + r_i \times \Delta C \quad (4)$$

整个编队的通信量总和可由式(5)计算。

$$C_{C-D}(k, r_i) = l \times k \times AverC1 + m \times AverC2 \times \sum_{i=1}^k r_i(r_i - 1) + (N+1) \times \Delta C \quad (5)$$

其中, $\sum_{i=1}^k r_i + 1 = N$ 。

(4)D_C 模式的通信总量 C_{D-C}

同样地,设有 $k(2 \leq k \leq N)$ 个二级子系统。那么一级子系统、二级子系统及整个系统的通信量 $C_{D-C1}, C_{D-C2}, C_{D-C}$ 可分别由式(6)~式(8)来计算。

$$C_{D-C1}(k) = m \times AverC2 \times k(k-1) + k \times \Delta C \quad (6)$$

$$C_{D-C2}(r_i) = l \times (r_i - 1) \times AverC1 + \Delta C \quad (7)$$

$$C_{D-C}(k, r_i) = m \times AverC2 \times k(k-1) + l \times \sum_{i=1}^k (r_i - 1) \times AverC1 + 2k \times \Delta C \quad (8)$$

其中, $\sum_{i=1}^k r_i = N$ 。

由式(1)~式(8)可知,分级混合模式管理可以有效降低 MUAVs 管理的复杂性,有效发挥了两种基本组织模型各自的优势。图 6 是各种模型的通信总量随着 MUAVs 规模增加而变化的曲线。实际上,由于各子系统内部采用了独立的通信与管理,互不干扰,因此各子系统内的管理、通信复杂度更低。同时,经分析可知,分级协作模式也可降低对中心控制 (下转第 107 页)