

有人机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究

刘宏强, 魏贤智, 付昭旺, 周中良
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 任务分配方法直接决定协同作战效果。针对有人机/无人机编队协同空战的任务分配问题进行研究, 给出时序约束下的任务分解方法, 采用改进的合同网协议建立任务分配模型, 通过引入熟人库来提高任务分配的效率, 通过引入任务有效性和黑板机制来实现对时序任务的处理, 最后对任务分配算法进行仿真。结果表明任务分配方法是可行的。

关键词: 有人机/无人机编队; 任务分配; 合同网协议; 时序约束; 黑板模型

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)06-0016-04

Cooperative Task Assignment of Manned /Unmanned Aerial Vehicle Formation in Air Combat

LIU Hongqiang, WEI Xianzhi, FU Zhaowang, ZHOU Zhongliang
(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Task assignment method plays a key role in manned /unmanned aerial vehicle formation cooperative air combat. Firstly, a task decomposition method with constraint of timing sequential was presented. Then, the task assignment model was established based on the improved Contract Net Protocol (CNP). The task assignment efficiency was enhanced by adopting the acquaintance model. The timing sequence task was processed by adopting the task validity parameter and blackboard mechanism. Finally, simulation was carried out based on the CNP task assignment model, the result shows the well performance of the task assignment method, which can fulfill the requirement of cooperative air combat.

Key words: manned /unmanned aerial vehicle formation; task assignment; Contract Net Protocol(CNP); timing sequential constraint; blackboard model

0 引言

有人机/无人机协同空战是指将有人战斗机作为指挥机, 将无人机作为攻击机, 在数据链支持下, 攻击机和指挥机通过密切协同来完成作战任务。有人机/无人机协同作战需要有人机/无人机成员的密切配合, 由于无人机具有自主执行任务的能力, 所以任务分配在协同空战中具有基础性和全局性的影响^[1-2]。空战任务具有非确知性、耦合性和动态的特点, 一直是协同作战的重要研究内容。国内外对协同作战的任务分配

进行了大量的研究, 并给出了如博弈论^[3]、线性规划^[4]、遗传算法^[5]和蚁群算法^[6]等分配算法, 但是这些方法难以处理具有时序约束的任务分配问题。基于此, 本文采用合同网协议(Contract Net Protocol, CNP)研究有人机/无人机编队的任务分配问题, 通过对 CNP 的改进实现对时序约束任务的处理。

1 有人机/无人机编队任务分配结构

有人机/无人机编队协同空战中, 有人机根据外部信息支援系统和编队传感器获得的信息进行态势评估, 结合作战意图形成作战任务, 如目标跟踪、目标识别、隐蔽接敌、电子干扰、导弹发射和导弹制导等任务, 并对任务进行分配、管理和监控, 无人机根据自身能力和工作状态响应执行任务。有人机/无人机协同空战任务分配结构如图 1 所示。

收稿日期: 2011-12-04 修回日期: 2012-06-13

基金项目: 航空科学基金(20095196012)

作者简介: 刘宏强(1988-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 研究方向为武器系统与运用工程。

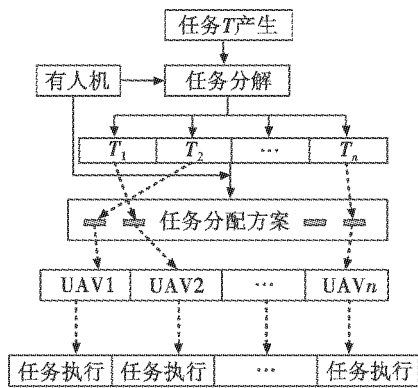


图1 有人机/无人机编队任务分配

Fig.1 Manned /unmanned aerial vehicle task assignment

2 任务分解

由于单个无人机的能力、资源受限而不能单独完成一项复杂的作战任务,所以必须将复杂任务进行分解,将复杂任务逐层逐级转化为单个无人机能直接执行的具体任务状态。

任务分解需要根据不同的问题来建立,目标是确保任务分解有合适的粒度。设 t 时刻有人机形成任务 T^s ,将任务 T^s 分解为相互独立的子任务组合,记为

$$T_g^s = \{t_1^s, t_2^s, \dots, t_n^s\} \quad (1)$$

任务分解后得到的各子任务 $t_k^s (k \in [1, n])$ 之间并不是完全独立的,而是存在一定的关系,包括并发关系、时序关系、促进关系、抑制关系等。本文主要考虑直接影响任务执行的时序约束关系。任务的时序约束是指对 $t_i^s, t_j^s \in T_g^s (i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j)$ 而言,如果只有当任务 t_i 完成后,任务 t_j 才能开始执行,则称任务 t_i 和 t_j 存在时序约束关系 $TimOrd(T_i, T_j)$ 。任务时序约束主要由任务之间信息的依赖性决定,时序约束可以采用偏序关系描述为

$$t_i < t_j \quad (2)$$

式中, t_i 是 t_j 的前题,记为 $t_i = t_{jp}$ 。

3 有人机/无人机编队任务分配建模

3.1 任务分配问题的数学描述

不失一般性,设作战编队由 1 架有人机和 m 架无人机组成, t 时刻生成的任务为 T^s ,将 T^s 分解为

$$T_g^s = \{t_1^s, t_2^s, \dots, t_n^s\} \quad (3)$$

定义任务分配矩阵 $S_{m \times n}$ 为

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{将 } t_j^s \text{ 分配给 } V_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

任务分配的目标是将 n 个任务分配给 m 架无人机,使编队达成最大的作战效能。

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (5)$$

式中, U_i 为任务分配方案下完成 T_i^s 的效能。

3.2 编队任务分配的效能函数

从执行任务的相对优势角度来描述无人机执行某项任务的收益,针对指定子任务,如果无人机 V_i 执行该任务相对 $V_j (j \neq i)$ 的优势越大,则将任务分配给 V_i ,编队获得的收益越大,定义无人机 $V_i (i \in [1, m])$ 完成任务 $t_j^s (j \in [1, n])$ 的作战收益为

$$R_{ij} = \lambda_1 \cdot g_{ij} + \lambda_2 \cdot (1 - t_{ij}/t_j) + \lambda_3 \cdot \omega_i \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^3 \lambda_k = 1$$

式中: $g_{ij} \in [0, 1]$ 为 V_i 完成任务 t_j^s 的能力优势; t_{ij} 为 V_i 完成任务 t_j^s 的预计时间; t_j 为任务 t_j^s 容许的执行时间; ω_i 为 V_i 执行任务的可靠度,根据 V_i 多次的任务执行情况来评估。

$$\omega_i = \frac{n_f}{n_i} \quad (7)$$

式中: n_i 为 V_i 历史接受的任务数; n_f 为完成的任务数。 $\lambda_k^c (k = 1, 2, 3)$ 由决策者的决策偏好进行取值, λ_k^c 越大表示决策越重视第 k 个因素。

编队在分配方案 S 下的作战收益函数为

$$U(S) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij} \quad (8)$$

最优分配方案对应的任务分配矩阵为

$$S_{opt} = U^{-1}(U_{max}) \quad (9)$$

3.3 任务分配的约束条件

为了提高任务的执行效率,必须对任务分配的均匀性进行约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m s_{ij} \leq n_{max} \\ \sum_{j=1}^n s_{ij} \leq m_{max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: m_{max} 表示给任务 t_j^s 最多分配的无人机数量; n_{max} 表示给无人机 V_i 分配的最大任务量。

4 基于 CNP 的任务分配算法^[7]

4.1 CNP 任务分配模型的改进

采用传统合同网协议进行任务分配存在以下问题:

- 1) 招标者每次都以广播的方式进行招标,对每个投标进行评价,增加了通信量和计算负担,也延长了协商时间,导致系统性能降低;
- 2) 固定投标者的任务执行能力,没有充分考虑投标者可用资源和任务能力的动态变化;
- 3) 任务分配的协商具有单向性,投标者不能主动

感知任务并进行投标。

针对以上问题,为了增强有人机/无人机编队任务分配模型的高效性和鲁棒性,对合同网协议进行如下改进。

1) 建立熟人库。有人机根据编队成员的属性和能力建立一个熟人库,有人机在进行任务分配时,根据任务属性和能力需求在熟人库中进行筛选,优先向熟人发送招标信息,采用熟人库能缩小招标范围,提高协商速度和求解效率。为了维护熟人库的有效性,应定期对熟人库的成员、属性和资源等进行评估和更新。

2) 引入公共消息黑板机制。针对传统合同网中无人机感知和接受任务的被动性,采用无人机主动感知方法。在有人机上建立一个公共消息黑板,将公共消息黑板作为合同网的中间媒介,黑板由有人机进行统一管理,所有成员通过感知黑板上的消息来了解编队的任务分配情况和执行情况,并据此调整自身作战状态。

4.2 时序约束任务的处理

在进行任务分配时,给每个子任务 t_i 的属性都增加任务有效性 $B_{t_i}^{\text{valid}}$ 和任务状态 $B_{t_i}^{\text{state}}$ 两个布尔型变量,定义为

$$B_{t_i}^{\text{state}} = \begin{cases} 1, & t_i \text{ 完成} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$B_{t_i}^{\text{valid}} = \begin{cases} 1, & B_{\text{pre}t_i}^{\text{state}} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

任务分配后,任务分配情况将写入公共消息黑板,所有无人机在执行任务后,在黑板上对任务状态进行更新,对于具有时序约束的子任务,无人机通过黑板机制来感知任务的有效性,任务有效后开始执行。

4.3 基于改进 CNP 的任务分配流程

前面建立了任务分配的效能计算模型,并对合同网协议进行了相应改进,下面给出基于改进合同网的任务分配流程。

1) 招标。任务产生后,由有人机进行任务分解并形成子任务集合 T_g^s ,并进行招标。

2) 投标。无人机 $V_i (i=1,2,\dots,m)$ 收到招标信息后,根据自身的能力和资源约束进行投标决策。如果选择投标,则对 T_g^s 中的子任务构造自己所有可能的任务方案,分别计算各种方案下的效用,将效用最大的方案作为自己的投标方案进行投标。

3) 评标。有人机随机生成各无人机的投标顺序,按照顺序由 V_i 出示自己的投标方案,并根据 V_i 所出示的方案构造任务分配矩阵,然后根据效能函数计算此轮投标的效能值。

4) 中标。投标结束后,有人机将效能值最大的方

案组合作为中标方案,并分别向中标的无人机发送合同授权信息。

5) 确认。中标的无人机在收到授权信息后,发送合同确认信息,并将任务加入任务列表。

6) 合同建立。有人机发布合同授权信息后,如果在 ΔT_{ack} 时间内收到 V_i 的合同确认消息,则合同建立;如果没有收到合同确认消息,则转入 7),同时将任务分配结果写入公共消息黑板。

7) 流标。有人机在规定时间内没有找到合适的无人机来完成任务,则宣布任务流标。此时,有人机将任务挂起,当有无人机投标时转入 3) 重新进行拍卖。

5 仿真分析

假设在某次空战对抗中,我机编队由 1 架有人机和 6 架无人机组成。 t 时刻产生的作战任务为 T_g^s ,将任务分解为 $T_g^s = \{T_1^s, T_2^s, T_3^s, T_4^s\}$,分别为目标识别、电子干扰、接敌发射导弹和导弹制导,为叙述简便,没有给出任务效能的计算过程,直接给出各无人机与任务之间的效能关系,如表 1 所示。

表 1 无人机完成任务的效能值

Table 1 The efficiency of UAV in accomplishing mission

任务	UAV					
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
T_1^s	0.46	0.63	×	-0.12	0.36	0.45
T_2^s	0.35	0.41	-0.31	0.48	0.22	×
T_3^s	0.45	0.29	0.50	-0.33	0.56	0.48
T_4^s	-0.22	-0.12	0.43	×	0.46	0.58

表 1 中,×表示受资源和性能的限制,无人机不具备完成该任务的功能,在形成攻击方案时不予考虑。

依据约束条件,无人机 $V_i (i=1,2,\dots,m)$ 接收到招标信息后,依据上述表中的效能值构造自己的投标方案,然后循环进入投标、评标、中标、确认、合同建立、流标的过程,最后将所有任务分配得到优势解。

由于问题规模较小,为了验证提出的多轮竞标算法,假定每次只允许 4 架无人机竞标,且按照随机生成的投标顺序进行,竞标可以进行多轮,每轮竞标后保存效能值最大的方案组合与各轮进行比较。显然,为了保证遍历所有无人机的竞标方案,理论上至少需要进行 $C_6^4 = 15$ 轮竞标。

根据本文建立的分配算法进行仿真,最终得到的任务分配结果如表 2 所示,分配方案整体效能变化曲线如图 2 所示。

表 2 任务分配结果

Table 2 The result of task assignment

无人机	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
任务	×	T_1^s	×	T_2^s	T_3^s	T_4^s

从效能变化曲线可以看出,整体效能随竞标次数的增加而增加,经过10次竞标,编队任务分配的效能达到理想值2.26,得到了最优分配方案。

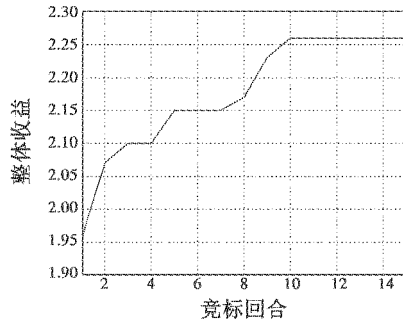


图2 整体效能变化曲线

Fig. 2 The overall efficiency curve

从仿真结果可以看出,经过任务分配后,每个子任务都找到了最合适的无人机来完成,通过各个局部效能最大来达成整体效能最大化。需要指出的是,由于本仿真问题规模小,条件设置简单,所以能很快地得到最优解。在对规模较大和约束复杂的空战任务进行分配时,很可能最终不能得到最优解,而是次优解。但是,如果从空战实际需求出发,任务分配需要在分配效果和计算时间之间进行权衡,保证以较快的速度、较高的概率获得较好的可行解,以满足空战对抗对大规模、复杂的动态任务分配的需求。

6 结论

有人机/无人机编队协同空战是一种新的协同空战模式和作战理念,采用有人机/无人机编队进行协同作战可以提高无人机完成任务的能力,使无人机的优势得到更充分的发挥。本文以有人机/无人机协同作战为背景,研究有人机/无人机编队协同空战的分配问题,通过改进的合同网协议能够快速实现任务分

配,并可以实现对具有时序约束任务的协同处理。最后对分配方法进行了仿真,结果表明,该方法适用于有人机/无人机编队协同空战的分配。

在任务分配完成后,如何协调和控制无人机执行所分配的任务是一个值得研究的问题,也是本文下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 彭辉,相晓嘉,吴立珍,等. 有人机/无人机协同任务控制系统[J]. 航空学报,2008,29(s):5135-5141.
- [2] 刘跃峰,张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(3):584-588.
- [3] 姚宗信,李明,陈宗基. 基于博弈论模型的多机协同对抗多目标任务决策方法[J]. 航空计算技术,2007,37(3):7-11.
- [4] DARRAH M A, NILAND W A, STOLARIK B M. Multiple UAV dynamic task allocation using mixed integer linear programming in a SEAD mission [C]//AIAA conference on Infotech @ Aerospace, Arlington, Virginia, AIAA 2005-7164, 2005:58-62.
- [5] SIMHA T, RASMUSSEN S J, SPARKS A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33:3252-3269.
- [6] 寇英信,王琳,周中良. 多目标攻击条件下作战任务分配模型研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(16):4408-4411.
- [7] 龙涛,朱华勇,沈林成. 多UCAV协同中基于协商的分布式任务分配研究[J]. 宇航学报,2006,27(3):457-462.

欢迎投稿 欢迎刊登广告