

面向协同任务的多UCAV分布式任务分配与协调技术

龙涛¹ 沈林成¹ 朱华勇¹ 牛轶峰¹

摘要 对多架无人作战飞机 (Unmanned combat aerial vehicle, UCAV) 分布式控制中的任务分配与任务协调问题开展研究. 采用合同网实现任务执行过程中的任务分配. 通过对合同网进行扩展, 使 UCAV 能够在招标和竞标的同时处理任务间的时间约束. 设计了一种新的部分全局规划协商机制, 能够更有效地对执行相关任务的 UCAV 的任务计划进行协调. 通过 Petri 网建模方法, 将两种协商机制模型化为 Petri 网并分析了协商过程的正确性与协商结果的可行性. 仿真实验验证了方法的有效性.

关键词 无人作战飞机, 任务分配, 任务协调, 合同网, 部分全局规划, Petri 网
中图分类号 TP273.5

Distributed Task Allocation & Coordination Technique of Multiple UCAVs for Cooperative Tasks

LONG Tao¹ SHEN Lin-Cheng¹ ZHU Hua-Yong¹ NIU Yi-Feng¹

Abstract The task allocation and task coordination problem for multiple unmanned combat aerial vehicles (UCAVs) distributed control is studied. Firstly, the contract net is expanded to resolve task allocation during task execution process. Thus UCAVs can deal with the temporal constraints among tasks when participating in auction and bid. Then, partial global planning is improved to coordinate the task plans of the UCAVs that perform correlative tasks. The two types of negotiation mechanisms are modeled with Petri nets, and the correctness of the negotiation process and the feasibility of the negotiation result are analyzed. Simulation results demonstrate the validity of our approaches.

Key words Unmanned combat aerial vehicle, task allocation, task coordination, contract net, partial global planning, Petri net

1 引言

如何通过有效的控制策略支持多架无人作战飞机 (Unmanned combat aerial vehicle, UCAV) 相互协作完成复杂任务, 是目前 UCAV 研究领域的热点问题^[1~3]. 多 UCAV 控制方法主要分为集中式控制与分布式控制^[2], 集中式控制能够从全局对问题进行求解, 但需要前方 UCAV 不断将自身状态与探测到的信息传回中央节点, 中央节点经过集中计算与规划后再将任务指令下达给 UCAV. 这使集中式控制存在以下不足^[2,3]: 对通信依赖性大, 对通信带宽要求高; UCAV 与中央节点间的通信延迟, 以及中央节点集中求解的计算复杂性, 导致难以实现对态势变化的快速反应; 如果中央节点的信息不准确, 即便 UCAV 具有更精确的局部信息, 中央节点也会将其规划出的计划强制下发; 中央节点出现故障将使整个系统陷于瘫痪. 因此集中式的方法主要适用于任务开始前的预先规划, 以及当战场态势发生重

大变化时在较粗的时间粒度和控制粒度上对任务进行全局性调整, 而难以满足多 UCAV 协同作战过程中动态控制的实时性要求.

在 UCAV 自主能力不断提高的趋势下, 分布式控制成为多 UCAV 协同控制技术的一个重要发展方向^[1~3]. 分布式控制将多 UCAV 系统作为有限中央控制下的多 Agent 系统, 各 UCAV Agent 在自主规划基础上通过相互协商实现彼此之间的任务划分和分工协作. 基于分布式的体系结构, 多 UCAV 作战过程中的协同控制可以分为如图 1 所示的五个层次. 1) 任务分解: 出现新目标后, 最先探测到目标的 UCAV 将其分解为一系列 UCAV 可以执行的任务; 2) 任务分配: UCAV 通过协商实现任务在彼此之间的动态分配与调整; 3) 任务规划: 根据分配到的任务, 各 UCAV 对完成任务的行为步骤进行规划, 形成个体任务计划; 4) 任务协调: 各 UCAV 通过协商实现个体任务计划的时间同步与行为协调, 形成联合任务计划; 5) 任务执行: UCAV 按照协调后的计划执行任务.

任务分配和任务协调是多 UCAV 分布式控制中的两个关键环节, 但目前的研究大多集中在任务分配上, 忽视了其后的任务协调过程. UCAV 任务之间往往存在着时间和功能上的约束, 而目前的分

收稿日期 2006-3-8 收修改稿日期 2006-7-16
Received March 8, 2006; in revised form July 16, 2006
国家 973 基础研究 (5130801) 资助
Supported by National 973 Program of P. R. China (5130801)
1. 国防科技大学机电工程与自动化学院 长沙 410073
1. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073
DOI: 10.1360/aas-007-0731

布式任务分配方法对此缺乏充分考虑^[2,3]. 为了有效解决多UCAV分布式控制中的任务分配和任务协调, 本文提出合同网(Contract net, CN)^[4]与部分全局规划(Partial global planning, PGP)^[5]相结合的方法. 扩展了合同网协议, 使其能够在实现动态任务分配的同时处理任务间的时间约束. 设计了新的PGP协商机制, 能够在任务分配结束后对执行相关任务的UCAV的任务计划进行协调. 通过将两种协商机制建模为Petri网, 对协商过程的正确性与协商结果的可行性进行分析.

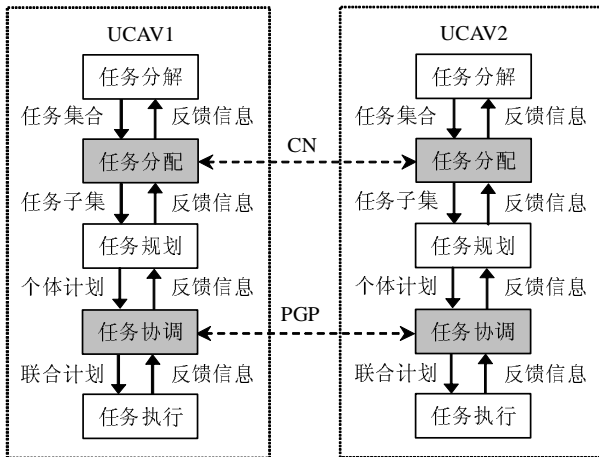


图1 多UCAV分布式控制的层次

Fig.1 Distributed control hierarchy for multiple UCAVs

2 问题描述

多UCAV任务分配与任务协调问题中的相关元素可以用六元组 $\langle E, V, T, M, F, C \rangle$ 表示, E 是战场环境, $V = \{V_1, \dots, V_{N_V}\}$ 是UCAV集合, $T = \{T_1, \dots, T_{N_T}\}$ 是任务集合, M 是威胁集合, F 是禁飞区集合, C 是约束条件集合.

由于作战任务的复杂性, 任务集合 T 中的任务可以分为两类, 一类是独立任务, 即仅与其本身约束相关的任务; 另一类是协同任务, 即相互之间存在时间或功能约束的任务. 时间约束是指任务之间的时序约束 $Precede(T_i, T_j)$, 表示任务 T_i, T_j 必须同步或按顺序依次完成. 任务之间的功能约束包括使能约束和促进约束, 使能约束 $Enable(T_i, T_j)$ 表示如果 T_i 不完成, 则 T_j 无法完成, 也就是 T_j 的完成依赖于 T_i 的实现. 使能约束实际上也就是意味着任务之间存在着特定的时序约束, 因此使能约束可以作为一类特殊的时序约束处理. 促进约束 $Facilitate(T_i, T_j)$ 表示 T_i 的完成有助于 T_j 的实现, 可以缩短完成 T_j 的时间、减少完成 T_j 的代价或提高完成 T_j 的质量, 但如果 T_i 没有完成, 也不会影响 T_j 的最终实现. 任务之间的时序约束是强制性

关系, 在作战过程中必须满足, 而促进约束是非强制性关系, 在作战过程中应尽量满足. 以图2所示为例, 三架UCAV V_1, V_2, V_3 联合执行任务, 整个任务包括对威胁的攻击 T_1, T_2, T_3 , 和对主目标的探测 T_4^1 、攻击 T_4^2 、毁伤评估 T_4^3 . 因为探测、攻击、毁伤评估必须依次完成, 所以 T_4^1, T_4^2, T_4^3 构成时序约束, V_1, V_3 提前摧毁威胁 T_2, T_3 有利于 V_2 执行 T_4^1 , 所以 T_2, T_3 对 T_4^1 构成促进约束.

UCAV执行任务的代价包括时间代价 $TimeCost$ 和风险代价 $RiskCost$, 其中时间代价

$$TimeCost = t_{flight} + t_{wait} + t_{execute} \quad (1)$$

t_{flight} 是飞行到任务点所需的时间, $t_{execute}$ 是执行任务所需的时间, 如果该任务与其它任务存在约束关系, 则需要与执行相关任务的UCAV进行协调, t_{wait} 表示为此可能增加的等待时间. 在图2示例中, 为了等待 V_1 和 V_3 摧毁 T_2 和 T_3 , V_2 在执行 T_4^1 步骤中需要增加相应的等待时间; 为了实现 T_4^1, T_4^2, T_4^3 的任务协调, V_1 执行 T_4^2 , V_3 执行 T_4^3 的步骤中均需要增加相应的等待时间. 风险代价 $RiskCost$ 为执行任务过程中被敌方威胁发现和攻击的风险^[1]. UCAV V_i 从位置 P_j 飞行到任务点 T_k 执行任务的代价为

$$C_{i,j,k} = \alpha \cdot TimeCost_{i,j,k} + \beta \cdot RiskCost_{i,j,k} \quad (2)$$

α, β 分别为时间代价和风险代价的影响因子.

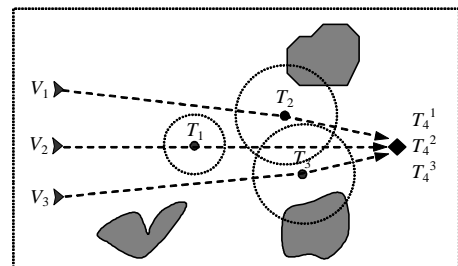


图2 UCAV任务示意图

Fig.2 Illustration of UCAV tasks

当 V_i 分配到的任务为包含多个任务的任务集 $S_i = \{T_j^i | T_j^i \in T, j = 1, \dots, N_i\}$ 时, 因为任务点之间的时间代价和风险代价不同, V_i 按不同的顺序执行任务, 完成其中某一项任务的代价以及整个任务集的代价也不同. 由于任务之间的约束关系, V_i 执行任务的代价还可能与其它UCAV执行任务的顺序和时间相关. 多UCAV任务分配与任务协调的目标是使UCAV集合 V 完成任务集合 T 的整体代价最

小, 其数学模型可以描述如下

$$\min \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_V+N_T} \sum_{k=1}^{N_T} x_{i,j,k} \cdot C_{i,j,k} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_V+N_T} x_{i,j,k} = 1, k = 1, \dots, N_T \quad (4)$$

$$\bigcap_{i=1}^{N_T} \bigcap_{j=1}^{N_T} \text{Precede}(T_i, T_j), i \neq j \quad (5)$$

$$\bigcup_{i=1}^{N_T} \bigcup_{j=1}^{N_T} \text{Faciliate}(T_i, T_j), i \neq j \quad (6)$$

目标函数(3)与约束(4)描述了任务分配模型. 约束(5)与(6)描述了任务协调模型, 其中式(5)表示必须满足任务间的时序约束, 式(6)表示应尽量满足任务间的促进约束.

3 基于扩展合同网的时序任务分配

在基于合同网的多UCAV任务分配过程中^[2~4], 当UCAV发现自己没有足够的处理能力某些任务, 或执行任务的代价过大时, 就把这些任务对外进行拍卖, 由其它UCAV根据其能力和状态进行竞标, 然后主持拍卖的UCAV将任务迁移给能够以更低代价执行任务的UCAV. 每次态势变化或买入/卖出任务后, UCAV都要根据自身代价最小化原则确定其任务集的执行顺序, 在此基础上计算各个任务的代价以作为协商的依据.

对于时序任务分配, 需要考虑前继任务与后续任务之间的约束关系, 而传统合同网对此缺乏有效的处理, 因此需要对其进行扩展, 使UCAV能够在招标竞标过程中兼顾任务间的约束. 设 V_i 发现新目标并将其分解为时序任务 $\{T_1^{new}, \dots, T_n^{new}\}$, 不妨设 $\text{StartTime}(T_{k+1}^{new}) = \text{EndTime}(T_k^{new}) + \Delta t_{k,k+1}, k = 1, \dots, n-1$, 扩展后的合同网协商机制描述如下:

第1步. V_i 向外公布时序任务序列 $\{T_1^{new}, \dots, T_n^{new}\}$ 的信息.

第2步. 收到拍卖信息后, 各UCAV $V_j(j = 1, \dots, N_V)$ 针对 $T_k^{new}(k = 1, \dots, n)$ 竞标. 设此时 S_j 中任务个数为 m , 因为是时序任务竞标, V_j 不再仅仅提交把任务插入到任务计划 $Plan_j$ 后使自己代价最小的任务排序方案^[3], 而是提交将 T_k^{new} 插入到 $Plan_j$ 不同位置的多种备选方案 $\{Bid_j(T_k^{new}, N_j, C_j^+(T_k^{new}), \text{STime}_j(T_k^{new}), \text{ETime}_j(T_k^{new})) | N_j = 1, \dots, m+1\}$. 其中 $C_j^+(T_k^{new})$ 和 $\text{STime}_j(T_k^{new}), \text{ETime}_j(T_k^{new})$ 分别

为将 T_k^{new} 插入到 $Plan_j$ 第 N_j 个位置后 V_i 的代价变化、 T_k^{new} 的预计开始时间和结束时间.

第3步. V_i 收到竞标信息后, 对各UCAV的竞标方案进行匹配. 匹配时不仅考虑竞标方案提出的代价, 还需考虑竞标方案的时间差异. 设 $V' = \{V'_j | V'_j \in V, j = 1, \dots, n\}$ 提交的竞标方案 $Bid(V') = \{Bid'_j(T_j^{new}, N'_j, C'_j(T_j^{new}), \text{STime}'_j(T_j^{new}), \text{ETime}'_j(T_j^{new})) | j = 1, \dots, n\}$ 能够匹配, 匹配后系统整体代价变化为

$$C^+(\bigcap_{j=1}^n T_j^{new} | Bid(V')) = \sum_{j=1}^n C'_j(T_j^{new}) + \gamma \cdot \sum_{j=1}^{n-1} |\text{STime}'_{j+1}(T_{j+1}^{new}) - \text{ETime}'_j(T_j^{new}) - \Delta t_{j,j+1}| \quad (7)$$

γ 为时间差异的影响因子. 如果该匹配方式能够使系统增加的代价为最小, 则 V_i 选择该匹配方式为中标方案, 向 $V'_j(j = 1, \dots, n)$ 发送中标信息.

第4步. 收到中标信息后, V'_j 向 V_i 返回确认信息.

当时序任务经过初次分配后, 此后的拍卖可以将其处理为具有固定时间约束的任务.

4 基于部分全局规划的任务协调

对于执行时序任务的UCAV, 需要使其同时或按特定时间顺序执行任务. 对于不存在时序约束的任务, 虽然UCAV可以按照自身代价最小化原则对任务进行排序, 但为了满足任务之间的促进约束, 必要时需要调整任务执行顺序实现与其它UCAV的行为配合, 在自身代价相对增加条件下更多地降低系统整体代价.

在利用合同网进行任务分配后, 可以进一步采用PGP^[5]对UCAV的任务执行过程进行协调. 根据PGP协商机制, 当UCAV之间通过交换任务视图, 某UCAV检测到其它UCAV的任务对自己任务的制约关系后, 可以向这些UCAV发出请求. 其它UCAV收到请求后, 根据其自身规划, 以承诺的形式返回相关任务的预计完成时间和效果, 然后请求方根据收到的承诺安排自己的任务执行计划. 由于缺乏相互之间协商的依据, 无法比较与权衡协商双方的得失, 当UCAV收到请求后只能返回根据其自身规划得到的结果, 但这不一定能够较好地满足对方的要求, 请求方只能被动地依据对方的承诺来安排自己的计划, 无法主动地对其它UCAV施加影响, 使其通过适当的调整满足自己的要求. 由于作战任务的复杂性, 可能多个任务和某一个任务之间存

在着促进约束, 这些促进约束同时满足或部分满足对完成该任务代价的影响也可能不同, 如图 2 中 T_2 , T_3 对 T_4^1 的促进约束, 而 PGP 协商机制对此缺乏有效的处理。

借鉴合同网的招标竞标思想, 本文设计一种新的 PGP 协商机制, 使各 UCAV 在自主规划基础上以彼此的代价变化作为依据进行协商, 从而以更高的效率实现任务协调。设有 n 个任务 $T' = \{T'_j | T'_j \in T, j = 1, \dots, n\}$ 对 V_i 的任务 T_k^i 形成促进约束, 这些任务分别属于 $V' = \{V'_j | V'_j \in V, j = 1, \dots, n\}$, 新的协商机制描述如下:

第 1 步. V_i 检测到 $V'_j (j = 1, \dots, n)$ 的任务 T'_j 对自己任务 T_k^i 的促进约束后, 向 V'_j 发出请求 $Request(T'_j, RTime_i(T'_j), Effect(T'_j), Query)$, 请求 V'_j 在 $RTime_i(T'_j)$ 之前完成任务 T'_j , 完成的效果为 $Effect(T'_j)$ 。

第 2 步. 收到 V_i 的请求后, 如果能满足请求, V'_j 计算为了满足请求自己需要付出的代价 $C_j^+(S'_j | RTime_i(T'_j))$ 并发送给 V_i 。

第 3 步. 收到返回的信息后, V_i 计算以上多个促进约束以不同组合方式满足时自己减少的代价。设有属于 $V'' = \{V''_j | V''_j \in V', j = 1, \dots, m, m \leq n\}$ 的组合 $T'' = \{T''_j | T''_j \in T', j = 1, \dots, m, m \leq n\}$, 在该组合方式下 V_i 减少的代价为

$$C_i^-(S_i | \bigcap_{j=1}^m RTime_i(T''_j)) = C_i(S_i | \bigcap_{j=1}^m (ETime''_j(T''_j) < RTime_i(T''_j))) - C_i(S_i) \quad (8)$$

系统整体减少的代价为

$$C^- \left(\bigcap_{j=1}^m RTime_i(T''_j) \right) = C_i^-(S_i | \bigcap_{j=1}^m RTime_i(T''_j)) - \sum_{j=1}^m C_j^+(S'_j | RTime_i(T''_j)) \quad (9)$$

如果 T'' 能最大程度减少系统整体代价, V_i 分别向 $V''_j (j = 1, \dots, m)$ 发送请求 $Request(T''_j, RTime_i(T''_j), Effect(T''_j), Inform)$, 如果不存在这样的组合方式, 则中止本次协商。

第 4 步. 收到请求后, $V''_j (j = 1, \dots, m)$ 对任务计划进行相应调整并向 V_i 作出承诺 $Commit(T''_j, RTime_i(T''_j), Effect(T''_j))$ 。

第 5 步. 收到 V''_j 的承诺后, V_i 将任务计划调整为 T'' 对 T_k^i 促进约束满足下的方式。

5 基于 Petri 网的协商机制建模与分析

相对于合同网与 PGP 在许多领域成功的实际应用, 其理论研究目前远远落后, 对其的分析大多是定性的或基于实验统计。究其原因, 是因为合同网与 PGP 缺乏形式化的模型, 缺乏对控制逻辑的分析能力以及对系统动态行为的预见能力, 使得难以对协商过程的动态特性以及协商结果的优劣进行分析。

Petri 网^[6] 作为一种图形化的建模工具, 既有直观的图形表示, 又有严格的数学基础, 具有描述和分析并行、异步、分布式系统的能力。本文接下来采用 Petri 网对扩展合同网和改进 PGP 协商机制进行建模与分析: 首先对协商的执行部分进行建模, 描述协商参与者之间的协商行为, 从而对协商过程的正确性(如协商过程中是否存在死锁)进行分析; 然后对协商的控制和决策部分进行建模, 描述协商参与者如何根据自己的决策模型确定最好的活动集, 从而对协商结果的可行性(如根据协商能否得到可行或最优的方案)进行分析与求解。

5.1 协商过程建模与正确性分析^[6~8]

应用 Petri 网对系统进行建模, 其局限性在于当系统比较复杂时, 产生的 Petri 网非常庞大和复杂, 给分析带来很大的困难。随着 Petri 网的不断发展, 人们开始将 Petri 网的行为分析能力与 Agent 的智能特点结合起来, 形成基于 Agent 的 Petri 网, 以降低模型的规模与复杂度, 并增强表达能力。结合基于 Agent 的建模思想后, 建立 UCAV 之间协商过程的 Petri 网模型如图 3 所示, 协商过程的正确性可以通过分析 Petri 网模型的可达性、有界性、活性、完整性等加以验证, 分析的方法包括可达树法、矩阵方程法、约简或分解法等, 限于文章篇幅不再详述。

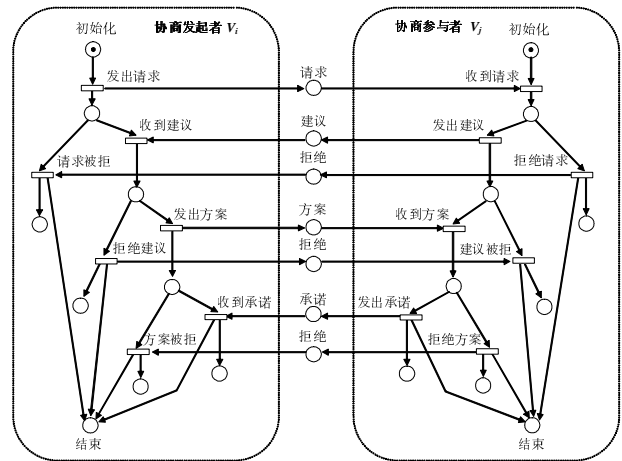


图 3 协商过程的 Petri 网模型

Fig. 3 Petri net model of the negotiation process

5.2 协商结果建模与可行性分析

在工作流系统的描述和分析方面, Petri 网已显示出强大的模型描述和性能分析能力. 本文研究中的时序任务可分解为在不同UCAV上执行的任务组合, 就这点而言和工作流类似, 与基于扩展合同网的任务分配方法结合后, 可以视为参与者相关的工作流模型^[9,10]. 基于以上思想, 采用代价时间Petri网对基于扩展合同网的时序任务分配进行建模, 包括任务工作流模型、竞标者的竞标方案模型、招标者的竞标方案匹配模型, 在此基础上对协商结果的可行性进行分析并求解最优的任务分配方案.

代价时间Petri网可以描述为四元组 $CTPN = (PN, D, \Gamma, C)^{[11]}$, 其中 1) PN 是Petri网; 2) $D = \{d_i | i = 1, \dots, m\}$, $d_i \in \mathbf{R}^+ \cup \{0\}$, 表示完成每个变迁 t_i 所需要的时间; 3) Γ 是一个集合, 其元素 (t_i, τ_i) 表示变迁 t_i 的实施时刻为 τ_i ; 4) $C = \{c_i | i = 1, \dots, m\}$, $c_i \in \mathbf{R}^+ \cup \{0\}$, 表示每个变迁 t_i 实施所需要的代价. 采用代价时间Petri网建模后, 任务可以表示为如图4所示的模型.

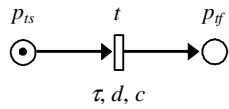


图4 任务的代价时间Petri网模型

Fig.4 CTPN model of a task

为了更形象地说明如何利用代价时间Petri网对合同网协商结果的可行性进行分析并求解最优分配方案, 接下来结合一个具体的例子进行描述. 以图5所示时序任务工作流为例, 该任务包括依次对某目标的探测 T_1 , 电子干扰 T_2 , 协同攻击 T_3, T_4 , 毁伤评估 T_5 . 基于单个任务的代价时间Petri网模型, 招标者可以建立时序任务的工作流模型如图6所示, 其中时间变迁 $t_1 \sim t_5$ 表示任务 $T_1 \sim T_5$ 的执行过程, 用矩形表示, 各任务之间通过瞬时变迁连接, 用竖线表示.

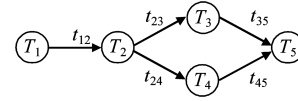


图5 任务工作流示意图

Fig.5 Illustration of a task workflow

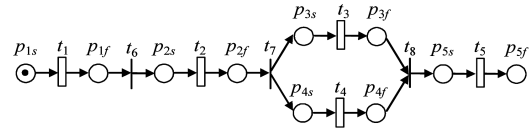


图6 任务工作流的Petri网模型

Fig.6 Petri net model of a task workflow

收到招标者公布的信息后, 各UCAV针对自己能力范围内的任务提出竞标方案. 设 $V_1 \sim V_5$ 竞标方案的Petri网模型如图7所示, $t_{i,j,k}$ 表示 V_i 针对任务 T_j 提出的第 k 套竞标方案, 也就是将 T_j 插入其任务计划第 k 个位置后的竞标方案, V_i 在 $\tau_{i,j,k}$ 开始执行 T_j , 持续时间为 $d_{i,j,k}$, 执行代价为 $c_{i,j,k}$.

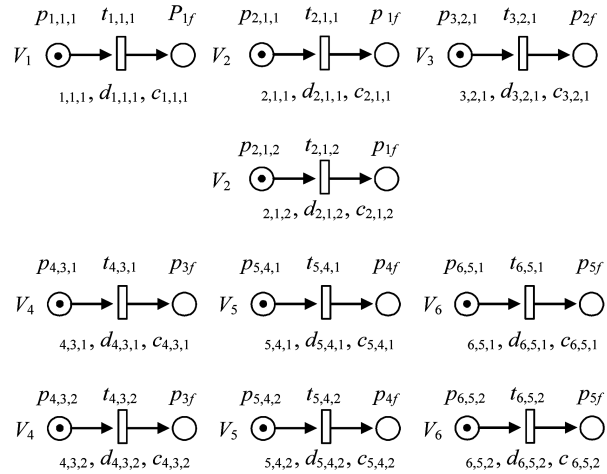


图7 竞标者竞标方案的Petri网模型

Fig.7 Petri net model of Bidder's proposals

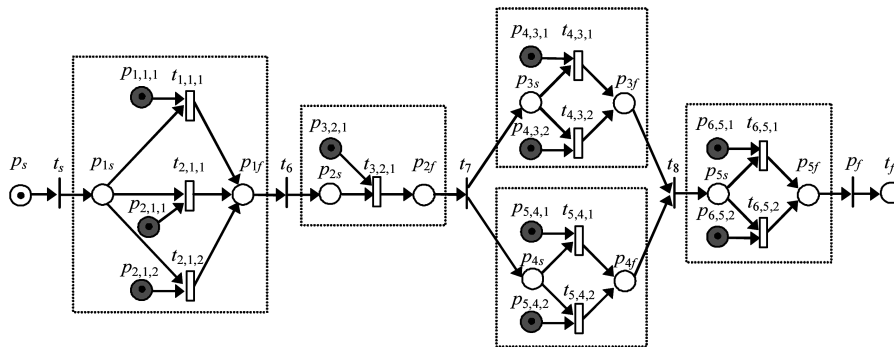


图8 竞标方案匹配的Petri网模型

Fig.8 Petri net model for matching proposals

收到竞标方案后, 招标者对竞标方案进行匹配, 匹配模型如图 8 所示 (见上页下方). 图中黑色位置中的托肯表示外来消息, 即竞标者的竞标方案, 其后续时间变迁对应于按该竞标方案执行任务. 采用启发式算法生成并搜索竞标方案匹配 Petri 网模型的部分可达图^[12], 得到代价最小的变迁实施序列即为最优的分配方案. 搜索可行变迁序列时, 需考虑为消除各竞标方案中的时间差异而额外增加的代价, 如第 3 节所述.

改进 PGP 协商结果的建模与分析方法和以上类似: 发出请求的UCAV 首先建立其任务计划的工作流模型, 然后根据其它UCAV 返回的信息确定执行任务的方式.

6 仿真实验

为验证基于扩展合同网的时序任务分配机制, 进行如下仿真实验: 5 架UCAV $V_1 \sim V_5$ 构成的编队执行目标探测任务, 当前任务分配结果如图 9(a) 所示, 图中多边形所示区域为禁飞区, 圆形区域为敌方威胁及作用范围, UCAV 在任务执行过程中需要实现对禁飞区和威胁的回避. 当 V_4 发现可能的高价值目标 T_{10} 后, 如图 9(b) 所示, V_4 将其分解为时序任务序列 $\{T_{10}^1, T_{10}^2, T_{10}^3\}$, 需要三架UCAV 依次对该目标进行协同定位与识别. V_3 将 $\{T_{10}^1, T_{10}^2, T_{10}^3\}$ 对外公布后, 各UCAV 提出对各个任务的竞标方案.

在各UCAV 提出的竞标方案中, V_3 将 $\{T_{10}^1\}$ 插入其任务计划第二个位置, V_4, V_5 将 $\{T_{10}^3, T_{10}^2\}$ 分别插入其任务计划第一个位置的竞标方案相互匹配后, 能够以最低的代价完成任务, 所以 V_3, V_4, V_5 竞标成功, 分别获得 $T_{10}^1, T_{10}^3, T_{10}^2$. 出现突发威胁后, 如图 9(c) 所示, V_5 同时执行任务 T_8 和 T_{10}^2 的代价增大, V_5 将这两个任务对外进行拍卖, 并附上与 V_3, V_4 协调后的对 T_{10}^2 的时间要求. 经过一个拍卖回合 V_2 竞标成功买入 T_{10}^2 , 并将 T_{10}^2 插入到任务计划的第二个位置以满足与 V_3, V_4 的时间协调.

为了验证基于改进 PGP 的任务协调机制的有效性, 进行如下仿真实验: 4 架UCAV $V_1 \sim V_4$ 构成的编队执行对地攻击任务, 当前任务分配结果如图 10(a) 所示, 其中 T_1 是主攻目标, T_2, T_3 为次要目标, 每架UCAV 具备攻击两个次要目标的能力, 但主攻目标需要两架UCAV 实施联合攻击. 如图 10(b) 所示, 当 V_2, V_4 通过竞标分别获得新目标 T_4, T_5 后, 根据自身代价最小化原则对任务的排序是 $\{T_2, T_4\}, \{T_3, T_5\}$. V_1, V_3 为了完成主攻任务, 需分别回避 T_4, T_5 的防御范围做大范围迂回, 如果 V_2, V_4 能提前将这两个威胁摧毁, 则可以穿越其防御范围直接攻击, V_1, V_3 减少的代价将分别为 C_1^-, C_3^- . V_1, V_3 检测到上述促进约束后, 采用第 4

节所述的改进 PGP 协商机制对任务执行过程进行协调, 计算进入 T_4, T_5 防御范围的时间 t_4, t_5 , 请求 V_2, V_4 在此之前完成攻击. V_2, V_4 收到 V_1, V_3 的请求后, 对能否满足请求以及相应的代价进行判断. 为了满足 V_1, V_3 的请求, V_2, V_4 分别需要将任务执行顺序调整为 $\{T_4, T_2\}, \{T_5, T_3\}$, 由此增加的代价分别为 C_2^+, C_4^+ . 因为 $C_1^- < C_2^+$, V_1 与 V_2 的协商中止; 因为 $C_3^- > C_4^+$, V_4 接受 V_3 的请求并承诺按要求完成对 T_5 的攻击, 收到承诺后 V_3 将任务计划调整为直接穿越 T_5 攻击 T_1 的方式, 如图 10(c) 所示.

7 结论

为了更有效地支持多UCAV 协同作战, 本文提出了层次化的多UCAV 分布式控制模型, 采用合同网与 PGP 在不同层次上分别实现任务分配与任务协调. 扩展了合同网协议, 使UCAV 能够在招标和竞标的同时处理任务之间的时间约束. 改进了 PGP 机制, 使执行相关任务的UCAV 能够更有效地通过任务协调实现行动配合. 通过基于 Petri 网的建模与分析方法以及仿真实验, 验证了方法的有效性.

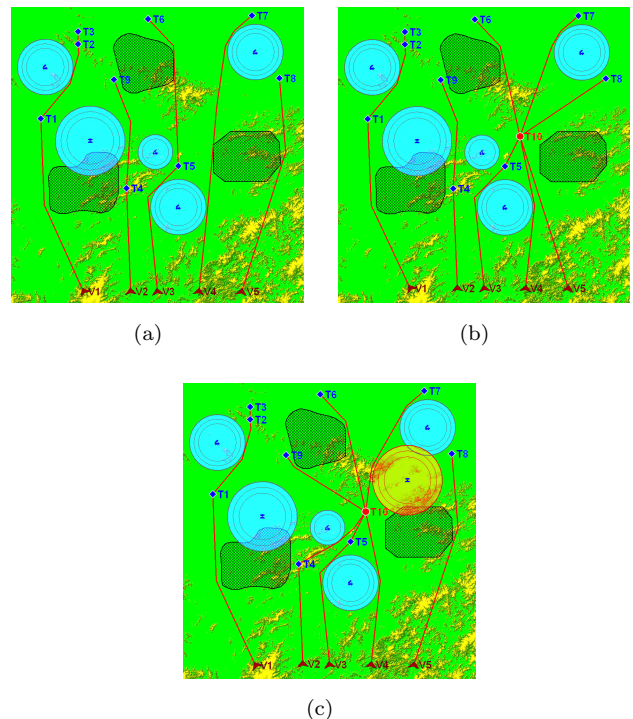


图 9 任务分配实验结果 ((a) 初始任务分配结果; (b) 出现时序任务后的分配结果; (c) 出现突发威胁后的分配结果)
Fig. 9 Experiment results of task allocation ((a) Initial task allocation result; (b) Allocation result after sequence task appears; (c) Allocation result after pop-up threat appears)

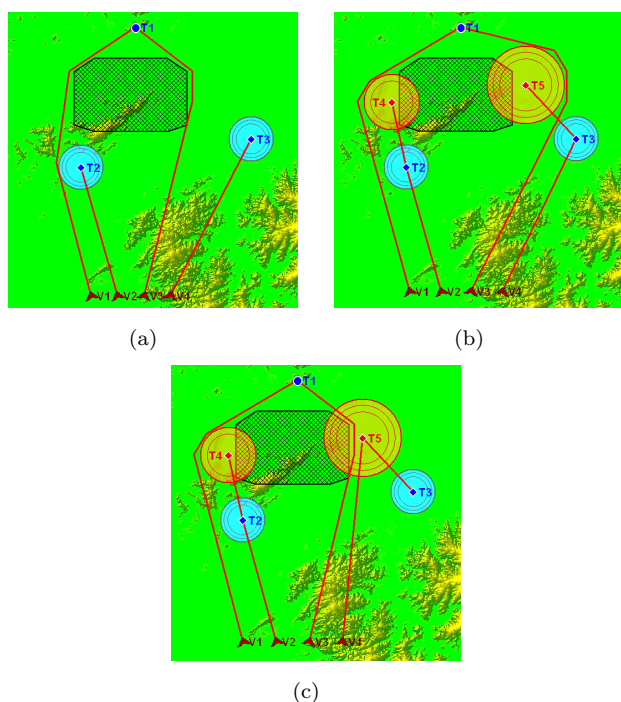


图 10 任务协调实验结果 ((a) 初始任务分配;(b) 出现突发威胁后的分配结果;(c) 任务分配后的任务协调结果)

Fig. 10 Experiment results of task coordination((a)Initial task allocation result;(b)Allocation result after pop-up threats appear;(c)Task coordination results after task allocation)

References

- 1 Beard R W, McLain T W, Goodrich M A, Anderson E P. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(6): 911~922
- 2 Pongpunwattana A. Real-time Planning for Teams of Autonomous Vehicles in Dynamic Uncertain Environments [Ph.D. dissertation], University of Washington, 2004
- 3 Long Tao, Zhu Hua-Yong, Shen Lin-Cheng. Negotiation based distributed task allocation for cooperative multiple unmanned combat aerial vehicles. *Journal of Astronautics*, 2006, **27**(3): 457~462
(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. *宇航学报*, 2006, **27**(3): 457~462)
- 4 Smith R G. The contract net protocol: high level communication and control in distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, **29**(12): 1104~1113
- 5 Decker K S. Environment Centered Analysis and Design of Coordination Mechanisms [Ph.D. dissertation], University of Massachusetts, 1995
- 6 Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 1989, **77**(4): 541~580
- 7 Holvoet T. Agents and Petri nets. *Petri Net Newsletter*, 1995, (49): 3~8
- 8 Lehmann K, Moldt D. Modelling and analysis of agent protocols with Petri nets. *Multiagent System Technologies (Lecture Notes in Computer Science)*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 85~98

- 9 Tang Da, Yang Yuan-Sheng. Research on workflow participant mechanism and dynamic characteristic based on hierarchically refined Petri nets. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, **41**(9): 1545~1553
(唐达, 杨元生. 基于层次细化 Petri 网的工作流参与者机制与动态特性研究. *计算机研究与发展*, 2004, **41**(9): 1545~1553)
- 10 Hsieh F S. Analysis of contract net in multi-agent systems. *Automatica*, 2006, **42**(2): 733~740
- 11 Liu Wei-Dong, Song Jia-Xing, Lin Chuang. Modeling and analysis of grid computing application based price timed Petri net. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(8): 1416~1420
(刘卫东, 宋佳兴, 林闯. 基于价格时间 Petri 网的网格计算应用模型及分析. *电子学报*, 2005, **33**(8): 1416~1420)
- 12 Lee D Y. FMS scheduling using Petri nets and heuristic search. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, **10**(2): 123~132



龙涛 国防科技大学机电工程与自动化学院博士研究生, 研究方向为无人平台任务控制, 智能控制. 本文通信作者. E-mail: longtaonudt@163.com

(LONG Tao Ph.D. candidate at College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers mission control of unmanned vehicles and intelligent control. Corresponding author of this paper.)



沈林成 国防科技大学机电工程与自动化学院教授, 主要研究方向为无人平台任务控制, 智能控制.

(SHEN Lin-Cheng Professor at College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers mission control of unmanned vehicles and intelligent control.)



朱华勇 国防科技大学机电工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为智能控制, 无人平台任务控制.

(ZHU Hua-Yong Associate professor at College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers intelligent control and mission control of unmanned vehicles.)



牛轶峰 国防科技大学机电工程与自动化学院博士研究生, 主要研究方向为自主控制, 图像融合.

(NIU Yi-Feng Ph.D. candidate at College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology. His research interest covers autonomous control and image fusion.)