

具有时间约束的多无人机协同航迹控制研究

张晓敏¹, 马培蓓², 纪军², 朱良明²

(1. 中国飞行试验研究院, 西安 710089; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 以多架无人机为研究对象, 控制多无人机对目标实施协同攻击, 并保证多无人机以指定时间到达目标或同时到达目标, 最大限度地提高作战效能, 是一个极具理论价值和军事应用的问题。确定了多无人机多级分布式协调策略, 明确了协同变量与协同函数的概念和相应的数学表达式, 以及领机与僚机间的通讯关系, 最后利用基于协同变量和协同函数的多级分布式控制策略, 有效解决了具有时间约束的多无人机协同航迹控制问题, 设计仿真算法, 并通过具体的仿真分析, 验证了算法的有效性。

关键词: 多无人机; 协同航迹; 时间约束; 多级分布; 协同变量; 协同函数

中图分类号: V279; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)09-0042-04

Cooperative Planning Control of Multi-UAV with Time Constraint

ZHANG Xiao-min¹, MA Pei-bei², JI Jun², ZHU Liang-ming²

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;

2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: It is of high theoretical value and practical significance to study multi-UAV cooperative path control strategy, making it support multi-UAV attack on multi-target coordinately, and control the UAVs to arrive the target location at the same or given time in order to maximize the operational effectiveness. The coordination strategy of multi-level distributed control architecture is determined. The concepts and the corresponding expressions of coordination variable and coordination function are presented, and the communication relation between lead plane and wing planes is given. Finally, the problem of multi-UAV coordinated path control with time constraint is solved by using multi-level distributed coordination strategies based on coordination variable and coordination function. Simulation results verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: multi-UAV; cooperative planning; time constraint; multi-level distribution; coordination variable; coordination function

0 引言

战场环境下多无人机协同航迹规划可实现多无人机从不同地点、不同方向对目标发动协同攻击, 到达目标的时间并不完全相同, 有时甚至差距很大, 这主要是由于无人机和目标分布比较分散, 并且在飞行过程中需要绕过不同的威胁区和禁飞区造成的, 从而极大影

响无人机的突防概率和整体作战效能^[1-2]。在执行军事任务中, 必须综合考虑无人机航程大小、无人机发射点位置与目标位置的关系、禁飞区与威胁区位置等因素, 研究具有时间约束的多无人机协同航迹控制算法, 选取一个最佳的无人机到达目标时间, 据此反算出各无人机的发射时刻和发射位置。文献[3]通过增加或减少航迹的长度来实现对飞行时间的控制; 文献[4]研究具有时间约束的协同航迹规划方法, 提出协同变量与协同函数的概念; 文献[5]将编队协同中的资源分配、轨迹优化结合起来进行计算并实现相互通讯, 采用分布式控制方法进行快速解算, 通过集中式控制方法以减小任务完成的时间; 文献[6]提出了随种群进

收稿日期: 2014-10-10

修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61305136); 航空科学基金与中国飞行试验研究院联合资助(20131384004)

作者简介: 张晓敏(1980—), 男, 陕西岐山人, 硕士, 工程师, 研究方向为飞行仿真。

化而变化的时间协同度评价策略,探讨了多平台反舰导弹协同航迹规划算法的分解使导弹实现协同攻击;文献[7]指出时间控制对无人飞行器编队,尤其对于执行协同搜索、协同攻击以及对敌方防御系统的协同干扰极为重要,并进行了相关的实验。

本文主要研究多级分布式协调策略下具有时间约束的多无人机协同航迹控制方法,实现多无人机以指定飞行时间到达目标或同时到达目标,并对目标实施协同攻击。

1 多级分布式协调策略

多无人机的协同控制取决于所处的环境,令 X_i 为第 i 架无人机所处的状态空间, $x_i \in X_i$ 为第 i 架无人机的状态,此状态空间包含了无人机、目标、禁飞区和威胁区的状态; $U_i(x_i)$ 为第 i 架无人机的状态,是 x_i 时决策变量的集合, $u_i \in U_i(x_i)$ 为第 i 架无人机的决策变量,决策变量由一组航迹点及相应的飞行速度表示;协同目标 $J_{\text{objective}}$ 是指在回避禁飞区和威胁区的基础上同时到达目标,并要求航迹代价最小。协同约束 $J_{\text{constraint}}$ 指所有无人机同时到达目标的过程中需满足的约束条件,协同约束是一个正定的映射 $J_{\text{constraint}}(x_1, u_1, x_2, u_2, \dots, x_N, u_N)$,当协同完成时,其值为零。

完成协同所需要的最小共享信息称为协同变量,通常用 θ 表示,在协同空间 IR^c 中协同变量是一个向量,如果每架无人机都知道协同变量并做出适当反应,则协同能够实现。以协同时间为研究对象,协同变量就是无人机预计到达目标的时间,它是由综合环境状态和决策变量集合中提取的最小量信息,如果用 $f_i: X_i \times U_i \rightarrow IR^c$ 表示从环境状态空间和决策变量集合到协同空间的映射,则第 i 架无人机的协同变量可表示为

$$\Theta_i(x_i) = \bigcup_{u_i \in U_i(x_i)} f_i(x_i, u_i) \quad (1)$$

只要 u_i 指定航迹点和速度就能确定唯一的协同变量值 $\theta_i(x_i) = f_i(x_i, u_i) \in \Theta_i(x_i)$,则协同时间约束即可表示为

$$J_{\text{constraint}} = f_i(x_i, u_i) - f_j(x_j, u_j) \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

若 $f_i(x_i, u_i) = f_j(x_j, u_j)$,则 $J_{\text{constraint}} = 0$,即多架无人机同时到达目标;若 $f_i(x_i, u_i) - f_j(x_j, u_j) < \varepsilon$,即 $J_{\text{constraint}} < \varepsilon$,则多无人机完成了 ε 协同。假设存在 f_i 的逆向映射 f_i^{-1} ,即 $f_i^{-1}: X_i \times \Theta_i \rightarrow U_i$,如果战场状态空间与协同变量一致,则决策变量是唯一的,在协同时间问题中可以理解为,如果协同变量确定,则每架无人机满足此协同变量的航迹点和速度就确定了。

协同函数指参数表示协同变量对性能指标的影响,协同函数描述了无人机的协同目标如何随着协同变量的变化而变化,此性能指标取决于战场状态空间

和决策变量集合。

对第 i 架无人机来说,此性能指标表示为函数的形式 $J_i: X_i \times U_i \rightarrow IR$ 。由于对每一个 $\theta \in \Theta_i(x_i)$,都有 $f_i(x_i, f_i^{-1}(x_i, \theta)) = \theta$,则此性能指标可表示为协同变量的函数

$$J_{cf,i}(x_i, \theta) = J_i(x_i, f_i^{-1}(x_i, \theta)) \quad (3)$$

式中, $J_{cf,i}$ 为第 i 架无人机的协同函数。对于协同时间问题,协同函数指在规避威胁的情况下,使无人机的燃油代价与威胁代价尽可能地小。而多无人机的协同目标为各无人机的协同函数之和,即

$$J_{\text{objective}} = \sum_{i=1}^N J_{cf,i} \quad (4)$$

协同问题可以看作是求多无人机整体目标函数的最优化问题,而总体目标函数又是单个目标函数的函数,可用 $J_T: IR^N \rightarrow IR$ 定义整体目标函数。此最优化问题中存在大量的状态变量和决策变量,随着参与作战无人机数量的增加,计算将会越来越困难。使用协同变量和协同函数可以将最优化问题分解,提取对协同来说重要的信息,可以表示为

$$\theta^* = \underset{\theta \in \prod \Theta_i(x_i)}{\text{argmin}} J_T(J_{cf,1}(x_1, \theta), \dots, J_{cf,N}(x_N, \theta)) \quad (5)$$

协同时间问题上,最优解不仅要满足时间约束,而且要使总体航迹代价最小,总体最优的协同变量 θ^* 确定后,各无人机的决策量能确定,即

$$u_i = f_i^{-1}(x_i, \theta^*) \quad (6)$$

在基于多级分布式的协调策略中(见图1),领机可看作一个集中式协调单元,可与其他僚机交互信息,而僚机只与相邻的僚机存在信息交互。

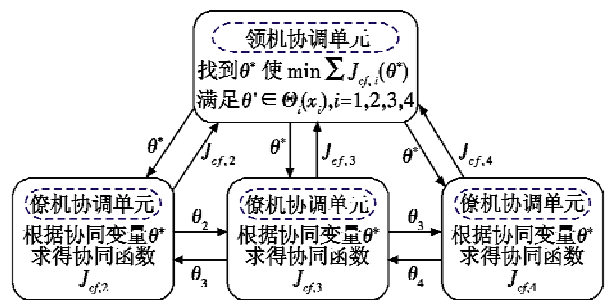


图1 多级分布式协调策略

Fig.1 Multi-level distributed coordinated strategy

首先各僚机的协调单元生成自己的协同变量值 θ_i ,然后根据相邻僚机的协同变量值 θ_j 不断修正自己的协同变量值,此算法为协调一致算法,即第 i 个僚机的决策变量为 $u_i = f_i^{-1}(x_i, \theta_i)$,因为 f_i^{-1} 是连续的,当 $\theta_i \rightarrow \theta^*$ 时,有 $f_i^{-1}(\theta_i) \rightarrow f_i^{-1}(\theta^*)$ 。因此,不管僚机之间的通讯存在噪声还是时变的,协调一致算法的目标是确保针对每个 i, j ,都有 $\theta_i \rightarrow \theta_j$ 。

然后将协调好的协同变量值送给集中式协调单元,该单元在实现总体协同目标 $J_{\text{objective}}$ 最小的情况下,

通过在合理范围内预估协同变量 θ^* , 然后把预估的协同变量 θ^* 按相关性传送到相应的僚机协同管理器, 各僚机根据协同变量值 θ^* 产生响应, 使整个系统的协同得以实现。通常最初预估的 θ^* , 其对应的 $J_{\text{objective}}$ 不一定是最小值, 因此必须多次预估, 重复优化求解过程, 最终总可以找到 $\theta^* \in \Theta$, 并使 $J_{\text{objective}}$ 最小, 整个求解过程是一个逐步校正协同变量的过程。

在多级分布式协调策略中, 领机作为集中式协调单元处于核心位置, 可获得全局信息, 而各僚机可以获得相邻僚机的信息, 既加快了多机系统的反应速度, 又提高了系统的可靠性和鲁棒性。

2 具有时间约束的多无人机协同航迹控制仿真分析

2.1 具体算法流程

1) 在每架无人机的航迹规划层计算各无人机的最优航迹, 无人机飞行速度 $v_{\text{max}} \geq v_i \geq v_{\text{min}}$, 每条航迹有对应的航迹代价 J_i 和到达目标的时间范围 $T_{\text{TOT},i}$, 将每架无人机的最优航迹传递给领机的协调单元。

2) 领机的协调单元求出各无人机到达目标时间的交集作为协同变量 T_{TOT}^* 取值区间 S , 如果 S 是空集转到步骤 3); 否则 T_{TOT}^* 在区间取最小值, 这样可以使得领机的协调单元在 $J_{\text{objective}} = \sum_{i=1}^4 J_i$ 最小的基础上求出各无人机同时到达目标的时间 T_{TOT}^* , 然后领机的协调单元将 T_{TOT}^* 传给各僚机, 在航迹规划层每架无人机根据获得的 T_{TOT}^* 选择出各自的航迹和速度。

3) 如果各无人机按各自的最优航迹计算出来的到达目标的时间范围没有交集, 则无人机的协同管理层从飞行航迹代价最小的无人机开始, 依次选择次优或更次优的航迹计算 J_i 和 $T_{\text{TOT},i}$, 重复步骤 2), 3), 直到各无人机到达目标时间范围有交集为止, 再次将此时的 T_{TOT}^* 传给各无人机, 各无人机根据重新计算的 T_{TOT}^* 选择相应的协同飞行航迹。

2.2 仿真结果分析

以 4 架无人机协同攻击同一个目标为例, 要求同时抵达目标。环境状态空间 X_i 包括无人机位置向量 P_{UAVs} 、目标的位置向量 P_{Targets} 、禁飞区的位置向量 $P_{\text{No-fly_zones}}$ 和威胁区的位置向量 P_{Threats} , 即

$$X_i = (P_{\text{UAVs}} \quad P_{\text{Targets}} \quad P_{\text{No-fly_zones}} \quad P_{\text{Threats}}) \quad (7)$$

式中:

$$P_{\text{UAVs}} = \begin{pmatrix} 60.4896 & 76.6647 & 87.8975 & 95.985 \\ 28.0921 & 26.3816 & 32.6535 & 25.8114 \end{pmatrix};$$

$$P_{\text{Targets}} = \begin{pmatrix} 98 \\ 174 \end{pmatrix}, \text{其目标战术价值为 } 80; P_{\text{No-fly_zones}} =$$

$$\begin{pmatrix} 59.1417 & 49.2569 & 95.985 & 73.0703 & 136.4228 & 126.538 \\ 143.8377 & 105.636 & 91.3816 & 79.9781 & 73.136 & 125.0219 \end{pmatrix},$$

上述所有矩阵中第一行为位置向量的横坐标, 第二行为位置向量的纵坐标; 设禁飞区的区域半径均为 10 km;

$$P_{\text{Threats}} =$$

$$\begin{pmatrix} 88.7961 & 112.6728 & 52.765 & 44.9309 & 79.9539 & 153.2258 \\ 122.1711 & 78.6550 & 68.7135 & 120.7602 & 55.2632 & 109.6491 \end{pmatrix},$$

设威胁区的区域半径分别为 30 km, 30 km, 5 km, 10 km, 10 km, 10 km, 威胁度分别为 0.8, 0.8, 0.7, 0.5, 0.8, 0.8。

假设各无人机类型相同, 最小速度 v_{min} 为 238 m/s, 最大速度 v_{max} 为 340 m/s, 其航迹长度分别为 $L(W_i)$, 则从环境状态空间和决策变量到协同空间的映射为 $f_i(x_i, u_i) = L(W_i)/v_i$, 最小和最大的 TOT (Time Over Target) 分别为

$$\begin{cases} \min T_{\text{TOT},i} = L(W_i)/v_{\text{max}} \\ \max T_{\text{TOT},i} = L(W_i)/v_{\text{min}} \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{\text{TOT},i} \in [\min T_{\text{TOT},i}, \max T_{\text{TOT},i}] \quad i=1,2,3,4 \quad (9)$$

多无人机系统中最优的到达目标时间为 T_{TOT}^* , 即

$$T_{\text{TOT}}^* = \min t \quad t \in (S = T_{\text{TOT},1} \cap T_{\text{TOT},2} \cap T_{\text{TOT},3} \cap T_{\text{TOT},4}) \quad (10)$$

式中, T_{TOT}^* 为协同变量, 可满足同时到达的要求, 即 $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_{\text{TOT}}^*$ 。

对于每个环境状态 x_i , 每条候选航迹 $u_i \in U_i(x_i)$, 不仅对应一个协同变量 T_{TOT}^* , 同时也对应代价函数 $J_i(x_i, u_i)$, 通过下面航迹代价最小的最优问题确定 u_i , 即

$$u_i = f_i^{-1}(x_i, \theta) = \underset{u_i \in U_i(x_i)}{\operatorname{argmin}} J_i(x_i, u_i) \quad (11)$$

$$J_{\text{objective}} = \sum_{i=1}^4 J_i = \sum_{i=1}^4 [k J_{\text{threat}}(T_{\text{TOT}}^*) + (1-k) J_{\text{fuel}}(T_{\text{TOT}}^*)] \quad (12)$$

式中: k 为系数; $J_{\text{threat}}(T_{\text{TOT}}^*)$ 表示各无人机同时到达目标需付出的威胁代价; $J_{\text{fuel}}(T_{\text{TOT}}^*)$ 表示各无人机需付出的燃油代价。

实验要求 4 架无人机同时发射, 并且同时到达目标。相应的数据见表 1, 确定协同变量见图 2 所示。

表 1 4 架无人机同时到达目标相关数据

Table 1 Data about four UAVs arriving at the targets at the same time

无人机编号	航迹编号	航迹长度/km	$v_{\text{min}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ $\max T_{\text{TOT},i}/\text{s}$	$v_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ $\min T_{\text{TOT},i}/\text{s}$
1	1	206	238 867	340 607
2	2	208	238 874	340 612
3	3	195	238 818	340 573
4	4	219	238 921	340 645

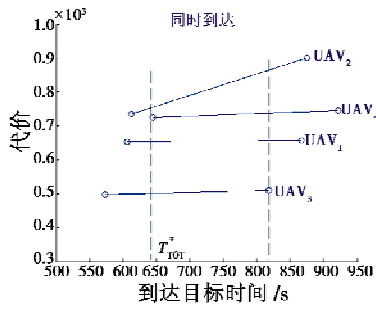


图2 确定协同变量

Fig. 2 Coordination variable determination

由图2知,在[645 s,818 s]的时间范围内,4架无人机都可以同时到达目标,但为了满足最优性,由领机的协调单元确定最优到达时间 T_{TOT}^* 即协同变量为645 s。

假设共有4架无人机(“◇”形状)参与作战,攻击敌方的1个目标(“×”形状),需要有效绕过6个不同的威胁体(红色的虚线区域)和6个禁飞区(填充黑色的实体区域)。未采用时间约束前,多无人机的航迹规划如图3a所示,4条最优航迹相应到达目标的时间分别为607 s,612 s,639 s,649 s,最长与最短飞行时间相差43 s。采用具有时间约束的基于协同变量/协同函数的多级分布式控制方法后,协同航迹如图3b所示,协同时间为645 s。为实现时间的协同,各无人机的飞行时间都有相应的调整,分别为38 s,33 s,6 s,-5 s,航迹代价也有一定程度的改变,达到了同时到达目标的目的。在实际作战过程中,可实现对目标的协同攻击,成倍地提高无人机的作战效能,因此以延长一定的飞行时间为代价也是值得的。

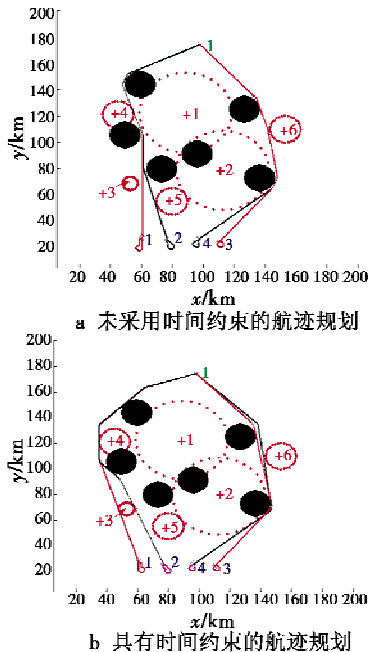


图3 时间约束前后的协同航迹比较

Fig. 3 Comparisons of cooperative paths before and after time constraints

但在许多情况下也难以得到满意的协调结果,尤其针对多无人机攻击多目标的情况,因为无人机和目标的位置太分散,致使有些无人机的攻击时间远远滞后于其他无人机,此时如果要求其他无人机增加航迹长度以延长飞行时间去等待某架无人机而严重影响到整个系统的作战效能是不合理的。此时更合理的方式有两种:一种情况是将飞行时间差距比较大的无人机分为两组,分批次对目标进行攻击;另一种情况是充分利用威胁回避是软约束的特点,使时间滞后的无人机以一定的概率穿越某些威胁,缩短其航迹长度以弥补时间差异。同样以上述仿真环境为例,重新规划多无人机航迹得到的结果如图4所示。

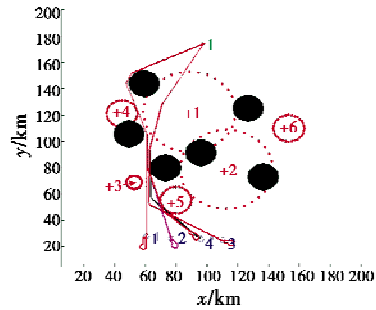


图4 部分航迹穿越威胁

Fig. 4 Partial paths through the threats

图4中,无人机3与无人机4航迹发生变更,部分穿越了威胁1,有效减少了飞行时间,实现了与无人机1和无人机2的协同,其协同飞行时间分别为606.7 s,612.0 s,611.6 s,602.8 s,以无人机4为基准,其他无人机与无人机4的时间差分别为3.9 s,9.4 s,8.8 s,此时间差对于中远程飞行的无人机来说影响不大,同样可实现对目标的协同攻击。因此在实际作战过程中,需要在距离代价与威胁代价之间进行权衡,并根据实际情况确定战术配合方案,规划出满足时间协同要求的最优航迹。

3 结束语

研究了基于协同变量和协同函数的多级分布式协同控制策略,并将其应用于多无人机协同时间方面,从而实现多无人机以指定飞行时间到达目标或同时到达目标,并对目标实施协同攻击。进一步对具有时间约束的多无人机协同航迹控制算法,通过仿真进行了验证分析,并证明了算法的有效性。下一步工作需要研究多无人机对多目标进行协同攻击情形下,具有时间约束的多无人机动态航迹控制问题。

参考文献

[1] SHIMAT, RASMUSSENS. 无人机协同决策与控制

(下转第54页)