

引用格式: 王然然, 魏文领, 杨铭超, 等. 考虑协同航路规划的多无人机任务分配[J]. 航空学报, 2020, 41(S2): 724234. WANG R R, WEI W L, YANG M C, et al. Task allocation of multiple UAVs considering cooperative route planning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S2): 724234 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2020.24234

考虑协同航路规划的多无人机任务分配

王然然^{*}, 魏文领, 杨铭超, 刘玮

航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710076

摘要: 针对多无人机任务分配与协同航路规划问题,以分布式合同网拍卖算法为基础,构建无人机集群任务拍卖架构与拍卖收益函数,结合模拟退火算法协调任务执行次序,采用 A* 算法完成两任务点间航程预估,在任务分配阶段同步完成多无人机间协同航路的初规划,确定最佳任务执行次序,实现任务分配与协同航路规划的紧耦合。仿真结果表明,在考虑禁飞区、障碍威胁情况下,该算法能够有效完成多架无人机不同类型任务的分配,且目标分配、执行次序合理,总执行代价小,各机间负载均衡;在任务分配阶段考虑协同航路规划具有明显的效果,能够有效提高任务分配的合理性。

关键词: 无人机; 任务分配; 航路规划; 合同网; 多机协同

中图分类号: V249

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2020)S2-724234-12

无人机在现代战争中发挥着越来越重要的作用,单架无人机难以胜任复杂任务,而多架无人机协同作战能够有效完成任务,保证作战效能,实现力量倍增^[1]。多机协同任务分配技术是多无人机协同作战的基础,最终目标是在复杂战场环境、作战任务下,为己方作战力量合理分配作战任务,使得整体作战效能最大。

目前国内外针对多无人机任务分配问题展开了大量研究,并取得了相应的成果,这些研究多将任务分配问题与航路规划问题分离,以松耦合的方式对二者分别求解。

在多无人机任务分配方面,国内外研究中常用的任务分配模型有车辆路径问题^[2]、多旅行商问题^[3-4]、混合整数规划模型^[5-6]、协同任务分配模型^[7]和合同网拍卖模型^[8-10]等。其中,合同网拍卖模型作为分布式任务分配方法,具有鲁棒性高、计算效率高、可扩展性强等优点,受到广泛关注且应用较普遍。Bertsekas 首先提出拍卖算法,并解决了单任务分配问题^[8];Zavlanos 等将拍卖算法

与一致性算法相结合,实现了简单问题的完全分布式任务分配,去掉了存储中心节点^[9];国防科技大学沈林成等采用丰富合同类型的改进合同网拍卖模型实现多无人机多任务拍卖,并采用条件合同机制实现多无人机间的协调^[10];西北工业大学严飞等在考虑约束的情况下,利用合同网协议实现了异构无人机实时任务分配^[11]。

无人机航路规划算法方面,国内外均进行了大量的研究,并产生诸多研究成果,基本可分为以下 4 种:① 人工势场方法^[12];② 基于数学的规划方法^[13],包括非线性规划算法与动态规划算法;③ 基于图形学的方法,包括 A* 算法^[14-15]、Voronoi 图法^[16]、概率路标图法^[17]和快速扩展随机树(RRT)^[18]等;④ 智能优化算法,包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法和蚁群算法进化算法等^[19]。其中,A* 算法作为一种启发式算法,具有结果稳定且收敛快速等优点;采用稀疏 A* 算法进行路径规划可以有效降低计算复杂度,适用于无人机初步航程预估。

收稿日期: 2020-05-18; 退修日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-05; 网络出版时间: 2020-06-15 16:27

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/2020S203.html>

^{*} 通信作者: E-mail: npuwangran@163.com

现有任务分配算法中,多将无人机任务分配与航路规划分离,完成任务分配后再对单机进行航路规划,忽略实际飞行航路对分配任务执行的影响,无法获得最佳的任务分配结果。

针对以上不足,本文采用合同网拍卖算法构建多无人机任务分配模型,在任务分配层面考虑无人机内部任务执行次序对任务分配代价的影响,通过无人机内部任务协调确定最佳任务执行次序;利用稀疏 A^* 算法完成无人机航程快速预估,并利用模拟退火算法实现快速任务协调,任务分配期间完成多无人机间协同航路的粗规划,实现任务分配与多机航路协调的紧耦合。

1 多无人机任务分配模型

根据无人机集群作战需求,定义 N 架无人机集群 $UAV = \{UAV_1, UAV_2, \dots, UAV_N\}$, 具有 M 个作战任务的任务集合 $Task = \{Task_1, Task_2, \dots, Task_M\}$ 。

定义无人机 i 的属性集合:

$$UAV_i^{ch} = \{V_i^{scout}, V_i^{attack}, V_i^{eval}, V_i^{arm}, V_i^{value}\} \quad (1)$$

式中: $V_i^{scout} \in [0, 1]$ 为无人机 i 的侦察能力; $V_i^{attack} \in [0, 1]$ 为无人机 i 的打击能力; $V_i^{eval} \in [0, 1]$ 为无人机 i 对目标的损毁能力; V_i^{arm} 为无人机 i 携带的武器数量; $V_i^{value} \in [0, 1]$ 为无人机 i 价值。

定义任务 n 的属性集合:

$$Task_n^{ch} = \{Task_n^{scout}, Task_n^{attack}, Task_n^{eval}, Task_n^{arm}, Task_n^{value}, Task_n^{threat}\} \quad (2)$$

式中: $Task_n^{scout} \in [0, 1]$ 为任务 n 侦察需求,即完成任务 n 所需无人机的侦察能力; $Task_n^{attack} \in [0, 1]$ 为任务打击需求; $Task_n^{eval} \in [0, 1]$ 为任务损毁评估需求; $Task_n^{arm}$ 为完成任务所需武器数量; $Task_n^{value} \in [0, 1]$ 为完成任务的收益价值; $Task_n^{threat} \in [0, 1]$ 为任务对无人机的威胁能力,即任务本身的防卫能力。

根据任务属性,作战任务 n 可划分为侦察、打击和评估 3 个维度的小任务:

$$Task_n = \{Task_n^{scout}, Task_n^{attack}, Task_n^{eval}\} \quad (3)$$

作战任务 n 可能由多架无人机协作完成,但每个小任务只能由一架无人机单独完成,举例来说,对于任务 $Task_1$ 可以将侦察小任务分配给无人机 1,将打击和评估小任务分配给无人机 2,两架无人机协作完成任务 $Task_1$ 。

定义集合 S_i 表示无人机 i 分配的任务集合,比如若 1 号无人机分配到 1、3 和 7 号任务,则其任务集合为 $S_1 = \{Task_1, Task_3, Task_7\}$ 。

2 考虑协同航路规划的多机任务分配

2.1 基于合同网的多无人机任务分配算法架构

分布式合同拍卖算法的核心思想在于多无人机之间通过“招标-投标-中标”这一流程完成分布式任务拍卖,使得整个系统能够以较好质量完成任务分配,同时由于采用分布式拍卖算法,无人机系统所需任务分配的计算代价较低。

合同网拍卖算法用于无人机任务分配的过程如下:

- 1) 无人机 i 发现新的作战任务 n , 并将任务信息通过通信拓扑发布到作战编组中,进行招标;
- 2) 作战编组中各无人机进行投标,根据当前编组任务分配情况与自身能力计算出接受此任务后编队最大收益,并将收益传输给招标无人机 i ;
- 3) 招标无人机 i 对比编组内各无人机反馈的编队收益,选择收益最大者作为该任务中标者,并更新任务分配表格,实现对任务 n 的分配。

图 1 中,无人机任务次序优化即内部任务协调过程,是指无人机 j 招标时,需要计算编队整体收益代价,由于无人机 j 具有其他任务,当引入新任务后,无人机 j 本身的任务列表发生了变化,无人机 j 需要对自身任务列表进行合理排序,寻找最佳执行顺利保证编组整体收益最大。

通过上述内部任务协调过程,无人机在任务招标过程中,确定了自身航路轨迹的大方向(任务目标点飞行顺序)。对于编组来说,每架无人机通过任务分配从零开始不断迭代,在任务分配过程中即完成了多无人机协同航路规划的大方向,实现了任务分配与航路规划的紧耦合。在各无人机任务目标点执行顺序确定的情况下,只需对目标点之间进行单独航路规划,即可完成多无人机协同航路规划。

2.2 拍卖收益函数构建

拍卖者发现新任务,通过“招标-投标-中标”过程完成对任务的分配,中标者是获取新任务后编组整体收益最大的无人机,根据第 1 节对无人

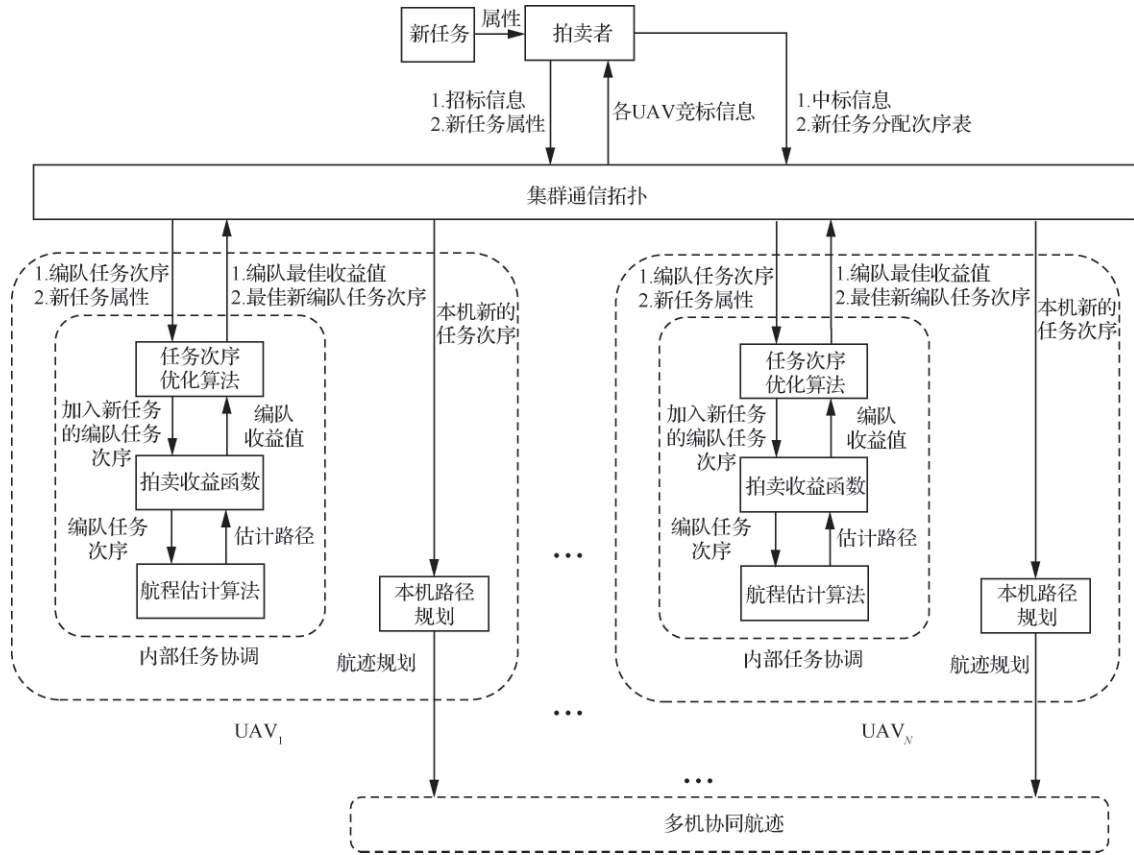


图1 基于合同网拍卖算法的任务分配与协同航路规划框架

Fig. 1 Task allocation and cooperative route planning framework based on contract network auction algorithm

机任务分配模型的分析,任务分配的编组收益主要考虑能力匹配原则、最小作战代价原则和能力均衡原则,因此将考虑从这3个方面建立拍卖收益模型。拍卖收益模型主要包含两部分:完成任务 n 的编组收益与编队代价,拍卖结果希望编组收益最大、代价最小;由此定义拍卖任务 n 的中标原则(收益函数)为

$$\max G_n(i) = k_1^g \text{Value}_n(i) - k_2^g \text{Match}_n(i) - k_3^g \text{Risk}_n(i) - k_4^g \text{Time}_n^{\text{sum}}(i) - k_5^g \text{Time}_n^{\text{max}}(i) - k_6^g \text{Balance}_n(i) \quad (4)$$

式中: $G_n(i)$ 为任务 n 分配给无人机 i 时编队整体收益函数; $\text{Value}_n(i)$ 为完成任务 n 编组收益,由任务 n 属性中收益价值决定; $\text{Match}_n(i)$ 为任务 n 侦察、打击、评估需求与无人机 i 侦察、打击、评估能力匹配差异度; $\text{Risk}_n(i)$ 为无人机 i 执行任务 n 的风险代价; $\text{Time}_n^{\text{sum}}(i)$ 为任务 n 分配给无人机 i 后,编组中无人机完成各自任务序列所花费的总时间; $\text{Time}_n^{\text{max}}(i)$ 为任务 n 分配给无人

机 i 后,编组中无人机完成各自任务序列所花费时间中的最大值; $\text{Balance}_n(i)$ 为任务 n 分配给无人机 i 后,编组中无人机完成各自任务序列所花费时间的均衡度; $k_1^g, k_2^g, \dots, k_6^g$ 为各项权重系数,正值。式(4)中各项函数的具体定义如下:

1) $\text{Value}_n(i)$ 为编组收益,定义为任务 n 属性中收益代价:

$$\text{Value}_n(i) = \text{Task}_n^{\text{value}} \quad (5)$$

2) $\text{Match}_n(i)$ 为无人机 i 执行任务 n 的匹配差异度,定义为

$$\text{Match}_n(i) = \frac{1}{\text{mat}_n(i)} [(V_i^{\text{scout}} - \text{Task}_n^{\text{scout}})^2 + (V_i^{\text{attack}} - \text{Task}_n^{\text{attack}})^2 + (V_i^{\text{eval}} - \text{Task}_n^{\text{eval}})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: $\text{mat}_n(i)$ 为无人机能力属性满足任务需求属性的数量,定义为

$$\text{mat}_n(i) = f_{\text{mat}}(V_i^{\text{scout}} - \text{Task}_n^{\text{scout}}) + f_{\text{mat}}(V_i^{\text{eval}} - \text{Task}_n^{\text{eval}}) + f_{\text{mat}}(V_i^{\text{attack}} - \text{Task}_n^{\text{attack}})$$

$$\text{Task}_n^{\text{attack}}) f_{\text{mat}}(V_i^{\text{arm}*} - \text{Task}_n^{\text{arm}}) \quad (7)$$

式中: $V_i^{\text{arm}*}$ 为当前无人机 i 剩余的武器数量;
 $f_{\text{mat}}(x)$ 为设定算子, 定义为

$$f_{\text{mat}}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

3) $\text{Risk}_n(i)$ 为任务风险, 由无人机价值与目标威胁度确定:

$$\text{Risk}_n(i) = V_i^{\text{value}} \text{Task}_n^{\text{threat}} \quad (9)$$

4) $\text{Time}_n^{\text{sum}}(i)$ 为在新的任务 n 分配到无人机 i 的情况下, 各个无人机完成其任务序列的总时间:

$$\text{Time}_n^{\text{sum}}(i) = \sum_{j=1}^N \text{Time}_j(S_j^{\text{end}}) \quad (10)$$

式中: S_j^{end} 为无人机 j 任务序列中最后一个任务序列, 任务序列编号为 end; $\text{Time}_j(S_j^{\text{end}})$ 为无人 j 完成其最后一个任务序列 S_j^{end} 的时间, 即无人机 j 完成其全部任务的时间。

5) $\text{Time}_n^{\text{max}}(i)$ 为在新任务 n 分配到无人机 i 时, 各无人机完成其任务序列花费时间的最大者:

$$\text{Time}_n^{\text{max}}(i) = \max \text{Time}_j(S_j^{\text{end}}) \quad (11)$$

6) $\text{Balance}_n(i)$ 为在新的任务 n 分配到无人机 i 时, 各个无人机完成其任务序列花费时间的均衡差异度:

$$\text{Balance}_n(i) = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N |\text{Time}_j(S_j^{\text{end}}) - \text{Time}_k(S_k^{\text{end}})| \quad (12)$$

定义无人机 j 分配的任务序列为

$$S_j = (S_j^1, S_j^2, \dots, S_j^{\text{end}}) \quad (13)$$

式中: S_j^1 表示无人机 j 任务序列中第 1 个任务; 每个任务包含侦察、打击和评估 3 个小任务, 以 S_j^{end} 为例, 其由侦察、打击和评估 3 个小任务组成, 即 $S_j^{\text{end}} = \{S_{j-\text{scout}}^{\text{end}}, S_{j-\text{attack}}^{\text{end}}, S_{j-\text{eval}}^{\text{end}}\}$ 。

由式(10)~式(12)可知, 从 0 时刻起各个无人机不断迭代, 可得到每架无人最终完成任务的时间 $\text{Time}_j(S_j^{\text{end}})$ 。

除拍卖收益函数外, 无人机在任务分配过程中, 还应遵循一定的约束规则, 即无人机自身侦察、打击和评估能力中至少有一项能满足任务侦察、打击或评估需求, 否则无人机不具备投标资格。如果中标无人机的能力无法满足全部小任务

的需求, 只能完成侦察、打击和评估任务中的 1 个或 2 个小任务, 则剩余未被拍卖的小任务将作为全新的任务继续参与下一轮拍卖, 直至 3 个小任务全部拍出。

收益函数中前 3 项与无人机内部任务执行次序无关, 仅与任务 n 的属性与投标无人机 i 的属性有关, 可以直接计算得出; 后 3 项主要描述了编队整体任务完成的时间, 不仅与任务 n 的中标无人机相关, 也与中标无人机内部任务执行次序和航线长度有关, 因此需要考虑中标者内部任务协调, 寻找最佳任务执行次序, 并进行航程估计。

3 无人机的内部任务协调与航程估计

将无人机内部协调问题转化为单旅行商 (TSP) 问题, 利用模拟退火算法搜索最佳任务执行次序, 使得无人机投标价格最高; 同时采用 A^* 算法实现两任务点间飞行航路长度的预估, 为无人机内部协调提供了基础。

3.1 基于模拟退火算法内部任务协调

对于无人机 i 投标任务 n 时, 内部任务协调的目标函数仍为拍卖收益函数:

$$G_n(i) = k_1^g \text{Value}_n(i) - k_2^g \text{Match}_n(i) - k_3^g \text{Risk}_n(i) - k_4^g \text{Time}_n^{\text{sum}}(i) - k_5^g \text{Time}_n^{\text{max}}(i) - k_6^g \text{Balance}_n(i) \quad (14)$$

该目标函数自变量为其内部任务序列 $S_i = (S_i^1, S_i^2, \dots, S_i^{\text{end}})$ 的排序, 在任务点之间航程已知的情况下, 只需对任务进行合理排序, 即可得到最佳的拍卖收益 $G_n(i)$, 即无人机 i 的投标价格。对问题分析可知, 该问题可以视为典型单旅行商问题, 对于此类问题的求解, 模拟退火算法被广泛使用, 计算流程如下。

算法 1 模拟退火算法求解任务协调问题

- | | |
|---------|--|
| Step 1: | 算法初始化, 设定初始温度 T_0 、温度衰减系数 ζ 、随机生成初始任务序列次序 S_i^0 、固定温度下循环控制常数 L 、算法最大循环次数 n_{sim} 、收敛条件 n_{end} ; |
| Step 2: | 设置当前任务次序 $S_i = S_i^0$, 当前温度为 $T = T_0$, 计算当前温度 T 下拍卖收益函数 $G_n(i)$; |
| Step 3: | 采用二分变换法, 随机交换任务序列中两个任务的次序关系, 生成新的任务次序 S_i' ; 并计算 S_i' 对应的拍卖收益函数 $G_n'(i)$; |

- Step 4:** 比较 $G_n(i)$ 与 $G'_n(i)$ 大小,若 $G_n(i) > G'_n(i)$ 则采纳新序列 S'_i 作为当前任务序列 S_i ,否则以概率 $\exp\{[G'_n(i) - G_n(i)]/T\}$ 接收 S'_i 作为当前任务序列;根据当前任务序列 S_i 更新收益函数 $G_n(i)$;
- Step 5:** 重复过程 Step 3、Step 4,若满足终止条件连续 n_{end} 拍当前任务序列 S_i 保持不变,则算法结束;否则循环次数达到 L ,进入下一步操作;
- Step 6:** 更新温度 $T = \xi T$,重复过程 Step 3~Step 5,直至满足退出条件连续 n_{end} 拍当前任务序列 S_i 保持不变,或达到最大循环次数 n_{sim} ,结束算法。

3.2 基于 A* 算法的航程估计

无人机内部任务协调的收益函数与任务点间的航程有关,在确定最佳任务执行次序的优化过程中,收益函数需要大量计算,无法使用时间复杂度较高的航路规划方法,因此建立稀疏的引导点并基于 A* 算法实现快速航路粗规划,继而完成航程估计。

计算任意两个任务点之间航程,首先需要采用 A* 算法对航路进行粗规划,在此过程中主要追求估计的快速性,其次才是精确性,因此在进行引导点设置时,采用稀疏方法以较大栅格的交叉点作为引导点。在此基础上采用 A* 算法选择合适的引导点实现两个任务点之间的航路快速粗规划,并计算相应的航程。

定义航路代价为

$$\text{Cost}_{A^*} = k_1^{A^*} \text{Dis} + k_2^{A^*} \text{Risk} \quad (15)$$

式中:Dis 为航程代价;Risk 为威胁代价; $k_1^{A^*}$ 和 $k_2^{A^*}$ 为权重系数。

由于航路由 n_p 个航点连接而成,因此式(15)可写成分段组合形式:

$$\text{Cost}_{A^*} = \sum_{n=1}^{n_p} (k_1^{A^*} \text{Dis}_n + k_2^{A^*} \text{Risk}_n) \quad (16)$$

式中:Dis_{*n*} 为航路点 *n* 与 *n* + 1 的直线距离;Risk_{*n*} 为航路点 *n* 与 *n* + 1 的航线风险,定义为

Risk_{*n*} =

$$\begin{cases} +\infty & \text{航线与禁飞区相交} \\ k_{\text{threat}} \delta_{\text{threat}} (R_{\text{threat}} - d_n^{\text{threat}}) & \text{航线与威胁圆相交} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: k_{threat} 为常系数; δ_{threat} 为当前威胁圆的威胁系数; R_{threat} 为威胁圆的半径; d_n^{threat} 为当前航线距离当前威胁中心的距离。

定义 A* 的扩展目标函数为

$$\min f(n) = g(n) + h(n) \quad (18)$$

式中: $g(n)$ 为从出发点到当前 *n* 引导点的已有航路代价; $h(n)$ 为启发函数,表示对当前引导点 *n* 到目标点 n_p 的航程代价,用二者距离表示:

$$h(n) = \sqrt{(x_{n_p} - x_n)^2 + (y_{n_p} - y_n)^2} \quad (19)$$

式中: x_n 和 y_n 、 x_{n_p} 和 y_{n_p} 分别为引导点 *n* 和目标点 n_p 的坐标。

采用 A* 算法进行路径估计的核心思想在于从出发点开始,在当前节点邻近范围内寻找最优扩展节点(引导点),使得扩展目标函数 $f(n)$ 最小,并不断更新扩展节点,直至到达目标点,利用 A* 算法实现航程预估算法完整流程如下。

算法 2 A* 算法航路预估

- Step 1:** 战场环境初始化,明确无人机出发点坐标 $(x_{\text{start}}, y_{\text{start}})$ 与任务点(目标点)坐标 (x_{n_p}, y_{n_p}) ,确定禁飞区范围、威胁范围与威胁度;
- Step 2:** 根据战场环境完成引导点设置,引导点设置密度要合理,首先保证算法运行效率,其次再考虑航路精确度;设置无人机初始位置为当前节点 *n*;
- Step 3:** 在当前节点 *n* 邻域范围选择最佳扩展节点 n' ,使扩展函数 $f(n') = g(n') + h(n')$ 最小,连接 *n* 与 n' 更新已有航路,更新当前节点为 n' ;
- Step 4:** 判断当前节点位置 (x_n, y_n) 与目标位置 (x_{n_p}, y_{n_p}) 距离是否满足结束条件,若满足结束条件则保存节点与航路信息,若不满足则重复步骤 Step 3;
- Step 5:** 根据航路信息计算航程 $\text{Dis} = \sum_{n=1}^{n_p} \text{Dis}_n$ 。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境设置

设置仿真地图为 100 km × 100 km 区域,禁飞区 1 块,防空威胁区 6 个,无人机数量 6 个,任务目标 20 个;具体属性如表 1~表 4 所示。

表 1 无人机属性信息

Table 1 Attribute information of UAVs

无人机编号	无人机价值	侦察能力	打击能力	评估能力	武器数量	航速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
UAV ₁	0.8	0.8	1.0	0.8	12	40
UAV ₂	0.7	0.8	0.6	0.8	8	40
UAV ₃	0.5	0	0.8	0	10	40
UAV ₄	0.6	0	1.0	0	12	40
UAV ₅	0.4	0.6	0	0.8	0	40
UAV ₆	0.6	1.0	0	0.8	0	40

表 2 目标任务属性信息

Table 2 Attribute information of target tasks

目标编号	坐标/km	目标价值	侦察需求	打击需求	评估需求	武器需求	威胁等级
T1	(9.2,67.6)	0.50	0.75	0	0	0	0
T2	(14.9,45.3)	0.45	0.50	0.60	0	2	0
T3	(16.5,23.7)	0.70	0	0.80	0	3	0
T4	(19.4,91.1)	0.80	0	0.60	0.75	3	0.60
T5	(25.5,93.4)	0.45	0.70	0	0	0	0.11
T6	(27.9,43.4)	0.75	0.40	0.60	0.50	2	0
T7	(43.5,53.7)	0.50	0.60	0	0	0	0.10
T8	(45.7,23.7)	0.50	0	0.75	0	2	0
T9	(53.9,99.0)	0.75	0.90	0	0	0	0
T10	(51.9,85.8)	0.65	0.70	0.80	0	2	0
T11	(62.4,74.3)	0.40	0.50	0	0	0	0.20
T12	(52.5,62.2)	1.00	0.80	0.80	0.80	5	0.80
T13	(56.2,39.4)	0.80	0.50	0.60	0.70	3	0
T14	(62.2,60.7)	0.78	0	0.95	0.80	3	0.09
T15	(67.2,9.4)	0.65	0.85	0	0	0	0
T16	(73.4,86.1)	0.75	0.60	0.58	0.60	2	0.14
T17	(72.9,55.2)	0.30	0.40	0	0	0	0
T18	(72.7,44.9)	0.50	0	0.86	0	3	0
T19	(78.2,16.1)	0.60	0.65	0	0	0	0
T20	(85.2,64.8)	0.86	0.73	0.55	0	3	0

表 3 防空威胁区信息

Table 3 Information of air defense threat zones

威胁点	坐标/ km	半径/ km	威胁 等级	所属任 务目标
R1	(65.4,26.6)	10	0.8	×
R2	(36.7,35.0)	8	0.4	×
R3	(70.8,80.5)	8	0.6	×
R4	(66.9,55.1)	8	0.4	×
R5	(52.5,62.2)	11	0.8	T12
R6	(19.4,91.0)	8	0.6	T2

注: ×表示威胁单独存在,不隶属于任何一个目标

表 4 禁飞区控制点坐标

Table 4 Coordinates of no fly zone control points

控制点	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
坐标/km	(20.1,50.1)	(39.9,50.1)	(45.0,79.9)	(15.0,79.9)

综合仿真环境如图 2 所示。

4.2 任务协调与航程预估仿真

航程预估是任务协调与任务分配的基础,以 3 号任务 T3 与 9 号任务 T9 作为两个目标任务点,对其进行航路预估得到如图 3 所示预估航路,

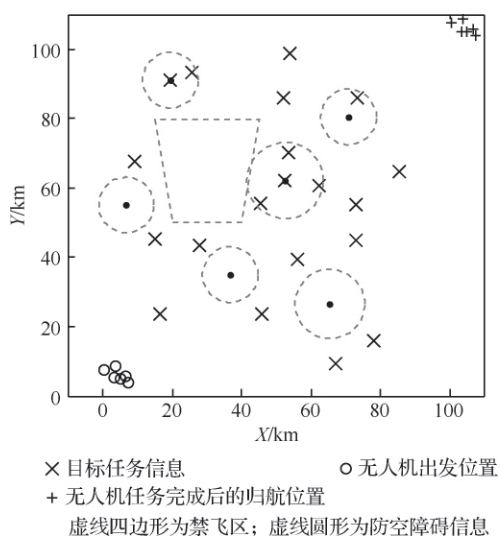


图 2 综合仿真环境地图

Fig. 2 Integrated simulation environment map

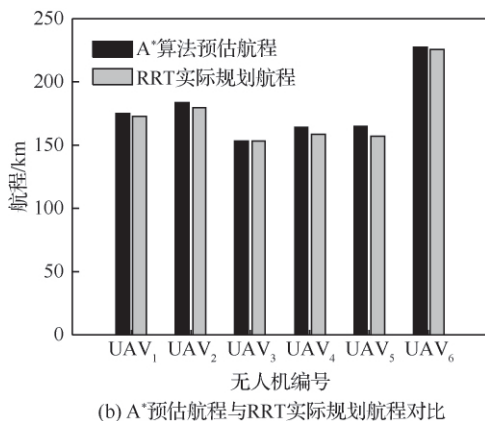
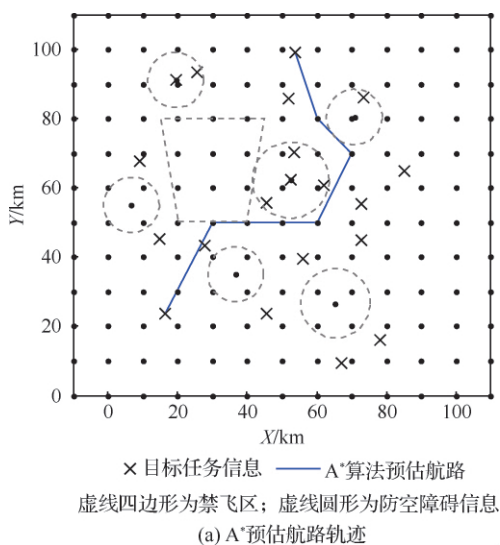


图 3 A* 算法预估航路

Fig. 3 Estimated route using A* algorithm

可见预估航路能够有效规避威胁,并得到较优的航程。为验证 A* 航路预估的有效性,令 A* 航路预估航程与实际航路规划(采用改进 RRT 算法^[20])结果进行对比,二者航程基本一致,佐证了 A* 算法进行航程预估的有效性。

内部任务协调是任务分配和协同航路规划的基础,该问题可转换为单旅行商问题,采用模拟退火算法进行求解;根据仿真案例中待协调任务数量,设置模拟退火算法终止条件为连续 9 拍收益函数保持不变或迭代次数达到 30 次。设置仿真条件,无人机分配任务 T1、T2、T3、T4 和 T5,随机确定初始任务执行的次序为 T4→T1→T2→T16→T5,通过任务协调确定其最佳次序为 T2→T1→T4→T5→T16,得到如图 4 所示协调过程,其间收益函数与航程变化如图 5 所示。

由图 5 可知,经过 11 次内部协调,无人机达到最佳任务执行次序,此时收益函数最高,预计航程最短;在循环迭代 19 次后,满足连续 9 拍收益函数保持不变的终止条件,终止搜索。如果不采用模拟退火算法进行搜索最佳次序,而采用遍历方式进行寻优,则需要 120 次的计算量,故所用任务协调算法大幅提高了内部任务协调的效率。

4.3 多机综合任务分配与路径规划仿真

按照仿真条件中设置的无人机属性和任务属性进行任务分配,得到如图 6 所示任务分配与执行结果,每架 UAV 具体任务分配与完成时间如表 5 所示。6 架无人机完成 20 个任务的分配,全部任务完成并飞行至归航点耗时 1.58 h,其中 UAV₆ 耗时最长为 1.58 h, UAV₄ 耗时最短为 1.13 h; UAV₆ 耗时长长的原因在于 T9 和 T15 侦察需求较大,所有无人机中只有 UAV₆ 能够满足其要求,而且二者距离较远,导致 UAV₆ 航程较大,耗时较长;需要注意的是 T14 由 UAV₄、UAV₅ 协作完成, T20 由 UAV₃ 和 UAV₆ 协作完成,其原因在于对该任务进行分配时,各个无人机的能力都无法单独满足。

按照相同仿真设置,对采用传统未考虑航路协同的合同网拍卖任务分配算法进行仿真,得到如图 7 所示任务分配与执行结果,每架 UAV 具体任务分配与完成时间如表 6 所示。根据表 6 和图 7 可知,在不考虑航路协同的情况下,6 架无人

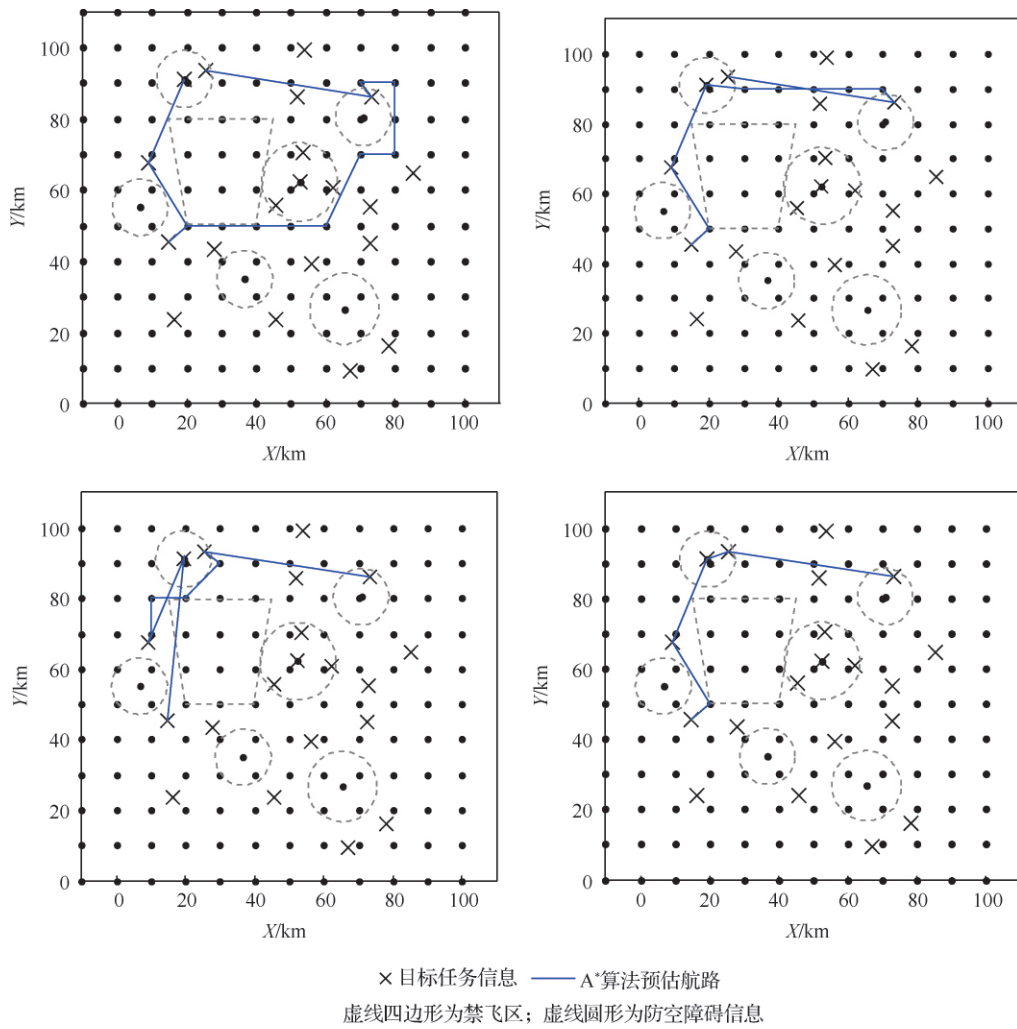


图 4 任务协调过程航路变化
Fig. 4 Route change during task coordination

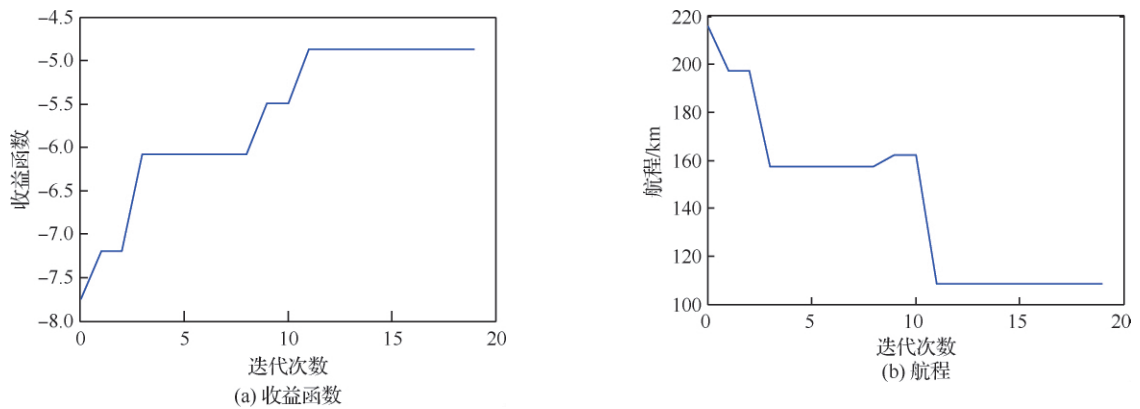


图 5 协调过程收益函数与航程变化
Fig. 5 Revenue function and range change in coordination

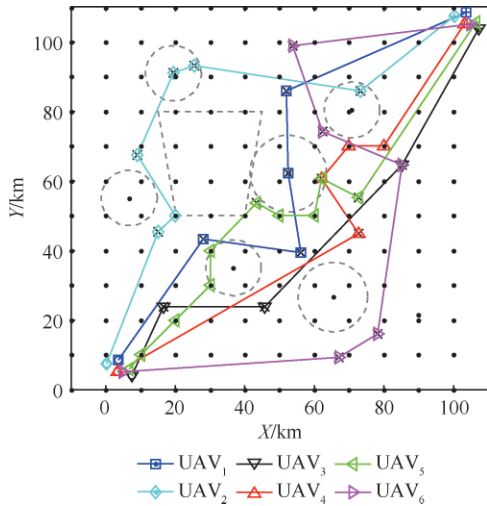


图 6 多机协同任务分配与初步航路规划图

Fig. 6 Map of multi aircraft cooperative task assignment and preliminary route planning

机完成任务最终时间为 2.39 h,其中 UAV₃ 和 UAV₆ 耗时最长为 2.39 h,UAV₄ 耗时最短为 1.24 h;T14 和 T20 仍然需要多架无人机协同完成,UAV₂ 与 UAV₄ 任务执行路线明显曲折,各个无人机间负载均衡度较差。

对两种分配方案进行对比如表 7 所示,二者在任务完成度上效果基本一致,具体表现为任务收益项、任务风险项和任务匹配程度(匹配程度项)基本一致;但考虑协同航路规划的任务分配方案在时间项中优势明显,其平均耗时为 1.26 h、最大耗时 1.58 h、均衡差异项 0.83 h,均明显低于未考虑协同航路规划任务分配方案的平均耗时 1.85 h、最大耗时 2.39 h、均衡差异项 3.09 h。以上结果表明,在任务分配阶段考虑协同航路规划具有明显效果,能够有效提高任务分配的合理性。

表 5 多机协同任务分配结果

Table 5 Multi aircraft cooperative task assignment results

参数	数值或情况
任务编号	S1 T6 T13 T12 T10 E1
UAV ₁ 任务分配情况	(•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,•,•,•)
预计完成时间/h	0 0.29 0.49 0.65 0.82 1.21
任务编号	S2 T2 T1 T4 T5 T16 E2
UAV ₂ 任务分配情况	(•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,•,•,•)
预计完成时间/h	0 0.28 0.47 0.65 0.70 1.03 1.27
任务编号	S3 T3 T8 T20 E3
UAV ₃ 任务分配情况	(•,•,•,•) (•,•,•,•) (○,•,•,•)
预计完成时间/h	0 0.15 0.35 0.86 1.17
任务编号	S4 T18 T14 E4
UAV ₄ 任务分配情况	(•,•,•,•) (•,•,•,○)
预计完成时间/h	0 0.56 0.69 1.13
任务编号	S5 T7 T14 T17 E5
UAV ₅ 任务分配情况	(•,•,•,•) (○,○,•,•) (•,•,•,•)
预计完成时间/h	0 0.44 0.69 0.77 1.19
任务编号	S6 T15 T19 T20 T11 T9 E6
UAV ₆ 任务分配情况	(•,•,•,•) (•,•,•,•) (•,○,○) (•,•,•,•) (•,•,•,•)
预计完成时间/h	0 0.43 0.52 0.86 1.04 1.22 1.58

注:任务分配情况中(•,○,•)依次表示侦察、打击和评估的分配情况,•表示分配给当前无人机,○表示未分配给当前无人机;任务编号中 S 表示出发,E 表示归航

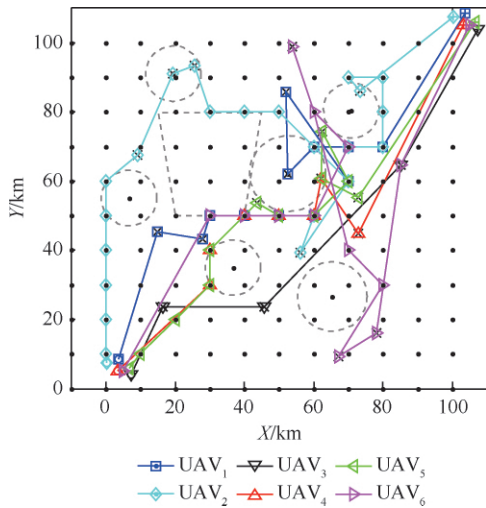


图 7 未考虑协同航路规划的任务分配图

Fig. 7 Task assignment map without considering cooperative route planning

表 6 未考虑协同航路规划的任务分配结果

Table 6 Task assignment results without considering cooperative route planning

无人机编号	任务分配情况	完成时间/h
UAV ₁	T2→T6→T10→T12	1.62
UAV ₂	T1→T4→T5→T13→T16	2.06
UAV ₃	T3→T8→T20	2.39
UAV ₄	T14→T18	1.24
UAV ₅	T7→T11→T14→T17	1.37
UAV ₆	T9→T15→T19→T20	2.39

表 7 两种任务分配方案结果对比

Table 7 Comparison of two task assignment schemes

参数	考虑协同航路规划的任务分配	未考虑协同航路规划的任务分配
任务收益项	12.69	12.69
任务风险项	1.32	1.32
匹配程度项	5.64	5.56
平均耗时/h	1.26	1.85
最大耗时/h	1.58	2.39
均衡差异项/h	0.83	3.09
整体收益	-4.970	-9.165

5 结 论

针对多无人机任务分配与协同航路规划问

题,采用合同网拍卖算法结合无人机内部任务协调,在任务分配阶段即完成多无人机间协同航路的初规划,更加接近最优结果。在任务分配层面建立分布式任务拍卖架构与拍卖收益函数;在内部任务协调方面采用 A* 算法进行航程预估,采用模拟退火算法优化任务次序,得到任务执行次序。仿真结果表明,针对 6 架无人机 20 个不同类型目标的任务分配与协同航路规划问题,该算法能够有效满足任务分配需求,且代价小、负载均衡;6 架无人机平均耗时 1.26 h,除 T9 和 T15 侦察需求大导致 UAV₆ 耗时达到 1.58 h 较长外,其余 5 架无人机飞机耗时平均值为 1.16 h、均方差为 0.07 h,总时间较短、均衡性较好。

参 考 文 献

- [1] 宗群,王丹丹,邵士凯,等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14 (in Chinese).
- [2] ARSIE A, SAVLA K, FRAZZOLI E. Efficient routing algorithms for multiple vehicles with no explicit communications[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(10): 2302-2317.
- [3] WANG C, MU D, ZHAO F, et al. A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 83(C): 111-122.
- [4] 梁星星,马扬,冯晓赫,等. 面向多旅行商问题的多目标模拟退火算法研究[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 80-86.
LIANG X X, MA Y, FENG Y H, et al. Research on multi-objective simulated annealing algorithm for multi-traveling salesman problem[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 80-86 (in Chinese).
- [5] DARRAH M A, NILAND W, STOLARIK B M. Multiple UAV dynamic task allocation using mixed integer linear programming in a SEAD mission[C]// AIAA Infotech & Aerospace Conference. Reston: AIAA, 2005: 2005-7164.
- [6] 温攀,王社伟,徐明仁. 基于 Memetic 算法的多无人机任务分配研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(5): 82-85, 103.
WEN P, WANG S W, XU M R. Research in task assignment of multi-UAV based on Memetic algorithm[J].

- Computer Simulation, 2013, 30(5): 82-85, 103 (in Chinese).
- [7] 田震, 王晓芳. 基于多基因遗传算法的异构多无人机协同任务分配[J]. 飞行力学, 2019, 37(1): 39-44.
TIAN Z, WU X F. Cooperative multiple task assignment for heterogeneous multi-UAVs with multi-chromosome genetic algorithm[J]. Flight Dynamics, 2019, 37(1): 39-44 (in Chinese).
- [8] BERTSEKAS D P. The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem[J]. Annals of Operations Research, 1988, 14(1): 105-123.
- [9] ZAVLANOS M M, SPESIVTSEV L, PAPPAS G J. A distributed auction algorithm for the assignment problem [C]// Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision & Control. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1212-1217.
- [10] 沈林成, 牛铁峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
SEHN L C, NIU Y F, ZHU H Y. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013 (in Chinese).
- [11] 严飞, 祝小平, 周洲, 等. 考虑同时攻击约束的多异构无人机实时任务分配[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 53-67.
YAN F, ZHU X P, ZHOU Z, et al. Real-time task allocation for a heterogeneous multi-UAV simultaneous attack [J]. Scientia Sinica: Informationis, 2019, 49(5): 53-67 (in Chinese).
- [12] CETIN O, YILMAZ G. Real-time autonomous UAV formation flight with collision and obstacle avoidance in unknown environment[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 84(1-4): 415-433.
- [13] 叶媛媛, 闵春平, 朱华勇, 等. 基于整数规划的多UCAV任务分配问题研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(5): 548-552.
YE Y Y, MIN C P, ZHU H Y, et al. Multiple UCAV mission assignment based on integer programming[J]. Information and Control, 2005, 34(5): 548-552 (in Chinese).
- [14] CAO W, SHI H, ZHU S, et al. Application of an improved A* algorithm in route planning[C]// Global Congress on Intelligent Systems. New York: IEEE Computer Society, 2009: 253-257.
- [15] HOWLETT J K, MCLAIN T W, GOODRICH M A. Learning real-time A* path planner for unmanned air vehicle target sensing[J]. Journal of Aerospace Computing Information and Communication, 2012, 3(3): 108-122.
- [16] PEHLIVANOGLU Y V. A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 16(1): 47-55.
- [17] 李春. 无人机集群自主协同搜索方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
LI C. Research on autonomous cooperative search using UAV swarms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 (in Chinese).
- [18] YANG K, KEAT G S, SUKKARIEH S. A Gaussian process-based RRT planner for the exploration of an unknown and cluttered environment with a UAV[J]. Advanced Robotics, 2013, 27(6): 431-443.
- [19] 杨希祥, 李晓斌, 肖飞, 等. 智能优化算法及其在飞行器优化设计领域的应用综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 7-17.
YANG X X, LI X B, XIAO F, et al. Overview of intelligent optimization algorithm and its application in flight vehicles optimization design[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 7-17 (in Chinese).
- [20] 彭辉, 王林, 沈林成. 区域目标搜索中基于改进RRT的UAV实时航迹规划[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 86-91.
PENG H, WANG L, SHEN L C. The modified RRT-based real-time route planning for UAV area target searching[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5): 86-91 (in Chinese).

(责任编辑: 李丹, 王小辰)

Task allocation of multiple UAVs considering cooperative route planning

WANG Ranran^{*}, WEI Wenling, YANG Mingchao, LIU Wei

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710076, China

Abstract: To solve the problem of task allocation and cooperative route planning for multiple unmanned aerial vehicles (UAVs), this paper takes the distributed contract network auction algorithm as the basis, designs auction architecture and auction revenue function of UAVs cluster, combines the simulated annealing algorithm to coordinate the task execution order, predicts the range between two task points using the A* algorithm, completes the initial planning of cooperative route among multiple unmanned aerial vehicles synchronously in the task allocation phase, determines the optimal task execution order, and achieves the tight coupling between the task allocation and cooperative route planning. The simulation results show that, considering the threat of no-fly zones and obstacles, this algorithm can effectively complete the assignment of different targets with reasonable target assignments and execution orders, low total execution cost, and balanced loads among the aircraft. In the stage of task assignment, it has obvious effect to consider cooperative route planning and can effectively improve the rationality of task allocation.

Keywords: UAVs; task allocation; route planning; contract nets; multi-aircraft cooperation

Received: 2020-05-18; Revised: 2020-06-01; Accepted: 2020-06-05; Published online: 2020-06-15 16:27

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/2020S203.html>

^{*} Corresponding author. E-mail: npuwangran@163.com