

文章编号: 1001-2486(2005)04-0116-05

基于满意决策的多 UAV 协同目标分配方法*

叶媛媛¹, 闵春平², 沈林成¹, 常文森¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘要: 目标分配是 UAV 自主控制的重要问题。提出了基于满意决策的多 UAV 协同的目标分配技术, 为解决多 UAV 协同的目标分配问题和多机场起飞的 UAV 编队配置问题提供了一种新颖而有效的方法。重点对其中的满意集计算、联合满意度、拒绝度和选择度的建立和计算等关键问题进行了讨论。以压制敌防空火力任务为背景对该方法进行了仿真, 并将本文提出的方法和其他方法做了比较, 仿真结果表明基于满意决策的多 UAV 协同的目标分配方法在效率上有明显优势。

关键词: UAV; 协同; 目标分配; 满意决策论; 满意集

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Satisficing-decision-based Targets Assigning for Cooperative UAVs

YE Yuan-yuan¹, MIN Chun-ping², SHEN Lin-cheng¹, CHANG Wen-sen¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Second Artillery Equipment Academe, Beijing 100085, China)

Abstract: Target assigning is an important problem for autonomous control and management of cooperative UAVs. To resolve targets assigning and formation configuration for cooperative autonomous UAVs, a satisficing-decision-based targets assigning method is proposed. Satisficing-set computing, joint satisficing function, joint selectability function, joint rejectability function, which are key elements of the method, are mainly discussed. Then the satisficing-decision-based targets assigning algorithm is simulated against the background of suppressing the enemy's antiaircraft. The experimental results show that the method can efficiently and quickly resolve the target assigning for cooperative autonomous. The method gains much decision time with little degradation of target assigning solution performance.

Key words: unmanned air vehicle; cooperative; target assigning; satisficing decision theory; satisficing set

无人机(Unmanned Air Vehicle, UAV)执行任务,如搜索、攻击、敌方防空火力压制(Suppression of Enemy Air Defense, SEAD)等,一般以机群编队的方式进行:紧密编队飞行到目标区域,而后以协同方式执行各自预先计划的任务目标;或者以多个小编队协同方式飞往目标区域并执行任务。无论以上述何种方式,都不可避免地面临多机协同的多目标分配和编队配置问题。

目标分配问题是现代战争中一个十分重要的问题,其解空间随武器总数和目标总数的增加而呈指数级增加,使其成为一个多参数、多约束 NP 问题。为解决这一问题,人们提出许多方法。隐枚举法通过检查变量组合的一小部分来求解问题的最优解,算法较为简单,但求解时间随目标数量增多迅速增长。分支定界法与割平面法以线性规划为基础,更适于解一般小规模整数规划问题,当问题规模较大且非线性时,一般无法适用。遗传算法可以逐步逼近最优解,但遗传算法通常采用固定长度的字符串对问题进行编码,限制了它的应用。基于 Hopfield 和 Tank 神经网络模型的方法其惩罚值难以确定,且有时得不到稳定的解。启发式算法可以根据具体的整数规划问题快速求出次优解,但是实际中往往难以确定启发知识^[1,2]。其他的目标分配方法包括基于图论的目标分配方法和基于合同网的 MAS 协调决策方法等。上述方法都从不同侧面解决了目标分配问题,大都集中于寻找最优的目标分配方案上,一般不能满

* 收稿日期:2005-03-20

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:叶媛媛(1976—),女,博士生。

足多 UAV 协同的实时性要求。

实际上,考虑到实际问题的不确定性和资源的局限性,往往无法达到真正意义上的最优。对于多 UAV 协同自主控制来说,单个 UAV 或者小的 UAV 群体获得最优目标并不总是更有利于 UAV 整个群体全局上的协同。为了获得多 UAV 机群的最优目标分配方案,通常需要某些 UAV 作出对于自身并不一定是最优的折衷选择。基于上述思路,本文提出基于满意决策(Satisficing Decision,SD)的多 UAV 目标分配方法,应用满意决策理论(Satisficing Decision Theory,SDT)^[3,7],解决多 UAV 协调的多目标分配问题。

SD 是一种集合论的思想,建立在博弈理论的基础之上,思想起源可以追溯到 Simon 提出的“最小标准概念”。后经 Isaac Levi、Stirling 以及 Frost 等人发展并充实以认识效用理论,通过选择函数 $P_s(u)$ 和拒绝函数 $P_r(u)$ (这一对度量函数,称为综合满意度函数,具有数学意义上的概率结构形式),以量化的形式度量决策智能体的决策全集中的每一个决策接近成功达成目标的程度和执行该决策的代价。SDT 本身的发展时间较短,直到 1993 年,SDT 才应用于工程问题中,如满意控制问题,但是却取得了很好的效果。目前,它应用于 MAS 决策的研究文献较少,但是它对于 MAS 决策问题来说具有天然的适合性^[3]。国外对此已经开始深入研究,并应用于多机器人协同控制中^[4,7]。

1 基本概念

定理 1 满意集(Satisficing Set,SS)称 $\Sigma_q = \{u \in U: p_s(u) \geq qp_r(u)\}$ 为 q 水平下的满意集。

其中 U 为 Agent 的决策空间,参数 q 是调节因子, $p_s: U \rightarrow R$ 和 $p_r: U \rightarrow R$ 分别为定义在决策空间 U 上的选择和拒绝函数。 Σ_q 中的选项可能超过一个,当 q 增加时, Σ_q 内的选项变少,Agent 表现出了决策的谨慎性。上述是针对个体 Agent 的满意集。

定理 2 多 Agent 满意集(MAS-SS)称 $\Sigma_q = \{u \in U: p_s(u) \geq qp_r(u)\}$ 为多 Agent 在 q 水平下的满意集,其中 p_s, p_r 为矢量。 Σ_q 中的联合选择就是那些利益大于代价的选择(不管从个体还是 Agent 团体的选择和拒绝角度来看)。

基于 SD 的多 UAV 协同目标分配的基本思想如图 1 所示。每一个 UAV 根据自己完成任务的成功概率和预估代价,确定能够接受的目标集合,即满意集 SS。在满意集中,UAV 选择合适的决策,形成多 UAV 协同的目标分配决策,以期以尽可能小的代价、尽可能大的成功概率完成 UAV 群的全局目标任务,从而实现多 UAV 对目标的协调协同攻击。满意集的确定为 UAV 任务目标分配提供协同决策空间。在此基础上,UAV 通过协同的多目标分配实现多 UAV 之间高层次、大范围的快速任务协同。

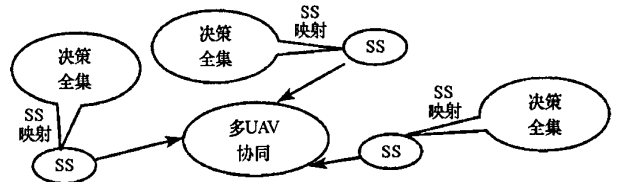


图 1 基于 SD 的多 UAV 协同目标分配

Fig.1 SD-based target assigning for cooperative UAVs

2 个体满意集和联合满意函数

基于 SD 的多 UAV 协同的目标分配技术其关键在于个体满意集的计算和建立联合拒绝度函数和联合选择函数,即联合满意函数。

2.1 个体满意集

以图 2 所示 SEAD 任务为例讨论满意集的计算。UAV 和目标旁边的数字表示其编号。在 SEAD 任务中,从 UAV 个体的角度出发主要考虑 UAV 攻击目标的生存性和燃油代价,生存性取决于 UAV 与威胁的距离及其飞行路径上的威胁,燃油代价取决于与攻击目标的距离及其飞行航路、速

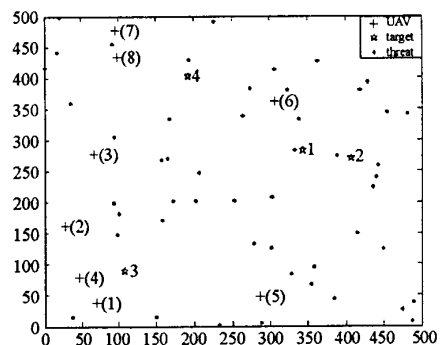


图 2 SEAD 任务想定

Fig.2 SEAD scenario

度^[5,6]。

记 UAV i 攻击目标 j 成功的概率为 $P_{s,i,j}$, 共有 N 个 UAV 和 M 个 Target:

$$P_{s,i,j} = f(d_{i,j}), P_{s,i,j} \in [0, 1], i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M \quad (1)$$

其中 $d_{i,j}$ 为 UAV i 与目标 j 的距离。UAV i 攻击目标 j 所付出的代价记为 $P_{r,i,j}$:

$$P_{r,i,j} = kH(\text{numPathThreat}_{i,j}) + (1-k)G(\text{numCircleThreat}_j), \\ P_{r,i,j} \in [0, 1], k \in (0, 1), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M \quad (2)$$

其中 $\text{numPathThreat}_{i,j}$ 为与 UAV i 攻击目标 j 的路径相关的威胁数目, numCircleThreat_j 为与目标 j 位置相关的威胁数目, $H(\cdot): N \rightarrow [0, 1]$ 以及 $G(\cdot): N \rightarrow [0, 1]$ 分别刻画了 numCircleThreat_j 、 $\text{numPathThreat}_{i,j}$ 与 UAV i 攻击目标 j 的代价的关系, k 用来调节决策人员对两种威胁因素的偏好。则 UAV i 的满意集 Σ_i 确定如下:

$$\Sigma_i = \{j | i \rightarrow j, \text{且 } P_{s,i,j} - \beta_i P_{r,i,j} \geq \sigma_i, \beta_i \geq 0\}$$

2.2 联合选择函数和联合拒绝函数

从个体利益角度出发, 各个 UAV 之间选择和拒绝某个目标是完全独立无关的。从 UAV 机群的利益角度出发, UAV 之间的决策是相关的, 任何 UAV 的决策都影响机群的协同目标分配, 进而影响其他 UAV 的决策。

针对多 UAV 协同的目标分配问题, 目标分配最优指标考虑四个因素: (1) 任务目标分配对高价值目标应有所偏重; (2) 任务目标分配应当覆盖尽可能多地目标; (3) 任务目标分配尽可能多地充分利用现有资源; (4) 整体的安全性最高且代价尽量小, 任务成功概率尽量大。考虑上述因素, 不失一般性, 定义如下形式的联合拒绝度函数和联合选择度函数:

$$P_s(u) = F(\text{Value}, \Xi(P_s), \Gamma(\text{Target}), \Lambda(\text{UAV})) \quad (3)$$

$$P_r(u) = G(\text{Value}, \Theta(P_r), \Gamma(\text{Target}), \Lambda(\text{UAV})) \quad (4)$$

其中 $\text{Value} = (\text{value}_1, \text{value}_2, \dots, \text{value}_N)$ 为各个 Target 的价值, $\Xi(P_s) = (P_{s1}(u_1), P_{s2}(u_2), \dots, P_{sM}(u_M))$ 为各 UAV 决策的个体选择度函数, $\Theta(P_r) = (P_{r1}(u_1), P_{r2}(u_2), \dots, P_{rM}(u_M))$ 为各 UAV 决策的拒绝度函数, $\Gamma(\text{Target}) = \{(Target_j | \exists \text{UAV}_i, s.t. \text{UAV}_i \rightarrow Target_j)\} = \{\Gamma(\text{Target}_j)\}$, 为分配给 UAV 的目标的集合, 此项描述了 UAV 对目标的覆盖程度。 $\Lambda(\text{UAV}) = \{(UAV^j) | \exists Target_j, \forall \text{UAV}_i \in (UAV^j), s.t. \text{UAV}_i \rightarrow Target_j\} = \{\Lambda(UAV^j) | i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots\}$ 为分配攻击各个目标的 UAV 集合, 度量了 UAV 的利用率, 保证尽可能多的 UAV 资源被利用, 并限制攻击同一目标的 UAV 数目。

3 算法实现与仿真分析

3.1 实验与仿真

以如图 2 所示的 SEAD 任务为背景, 本文设计了多 UAV 协同的目标分配算法并进行了仿真。假设所有的威胁为防空雷达, 并将雷达看作点状, 雷达对 UAV 的威胁与二者之间的距离的四次方成反比^[5,6]。算法如下:

(1) 根据战场环境威胁分布, 目标分布和 UAV 资源和起飞机场分布, 计算 UAV 攻击各个目标的安全性和燃油代价, 以及攻击收益(根据目标价值);

(2) 设计单个 UAV 对目标的选择函数 $P_{s,i,j}$ 和拒绝函数 $P_{r,i,j}$ 以及联合选择函数 $P_s(u)$ 和联合拒绝函数 $P_r(u)$;

(3) 通过单个 UAV 的对目标的选择函数 $P_{s,i,j}$ 和拒绝函数 $P_{r,i,j}$, 计算 UAV 的满意集, 即 UAV 个体可以接受的攻击目标集合;

(4) 根据联合选择函数 $P_s(u)$ 和联合拒绝函数 $P_r(u)$ 实现协同的 UAV 目标分配;

(5) 输出多 UAV 协同的目标分配结果。

取联合选择函数 $P_s(u)$ 和拒绝函数 $P_r(u)$ 具体形式为

$$P_s(u) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^{m_j} P_{s,i,j} \right) \cdot \frac{value_j}{MaxValue} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\theta(\lambda - m_j)}} \quad (5)$$

$$P_r(u) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^{m_j} P_{r,i,j} \right) \cdot \frac{value_j}{MaxValue} \cdot \frac{1}{1 + e^{-\theta(\lambda - m_j)}} \quad (6)$$

其中, λ 为攻击同一目标的 UAV 最大允许数目, $\theta \in (0, +\infty)$ 为惩罚调节因子, m_j 为攻击目标 j 的 UAV 数目。当 $m_j > \lambda$ 时, $\frac{1}{1 + e^{-\theta(\lambda - m_j)}}$ 迅速减小, 对 UAV 过于集中攻击同一目标的行为进行惩罚, 从而阻止所有 UAV 过于集中攻击同一目标。 $\frac{value_j}{MaxValue}$ 用于对联合选择和联合拒绝函数进行归一化。

令 $f = P_s(u) - \alpha P_r(u)$ 为目标分配函数, 取 $\theta = 2, \lambda = 3, \alpha = 0.3, N = 4, M = 8$, 即 8 架 UAV 攻击 4 个地面目标, $\beta_i = \beta = 0.3, \sigma_i = \sigma = 0.1, i = 1, 2, \dots, 8, k = 0.5$, 实验结果如图 3 和图 4。

图 3 所示为计算得到的 UAV 个体的满意目标集, 从图中可以看出 UAV 仅仅接受距离相对较近且航路相对安全的攻击目标。当 β 增加时, UAV 趋向于接受航路更为安全的攻击目标, 对距离(燃油节省)的考虑相对较弱。如图 3(b) 中 $\beta = 0.8$, 由于目标 1 和 2 的周围威胁较大, 且任何 UAV 攻击该目标的飞行航路所受威胁也较大, 因而所有的 UAV 都不能接受攻击目标 1 和 2。

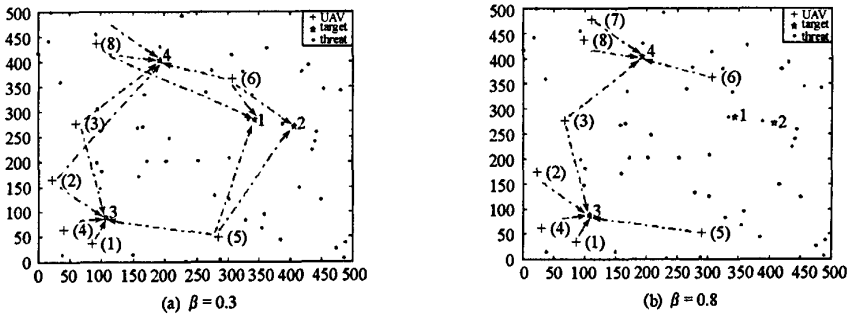


图 3 UAV 的满意集

Fig. 3 Satisficing set of UAVs

图 4 为基于 SD 的多 UAV 协同的目标分配结果。图(a)没有考虑目标之间价值差别, 图(b)为考虑目标价值差别时的分配结果(目标的编号表示其价值, 编号越大, 价值越高)。对比图(a)和图(b), 考虑了目标的价值之后, 攻击低价值目标 1 的 UAV 数目减小, 攻击较高价值目标 3 的兵力增加, 并且引起其他相关 UAV 调整攻击目标, 从而保证整体的作战效益尽可能大, 代价尽可能小。

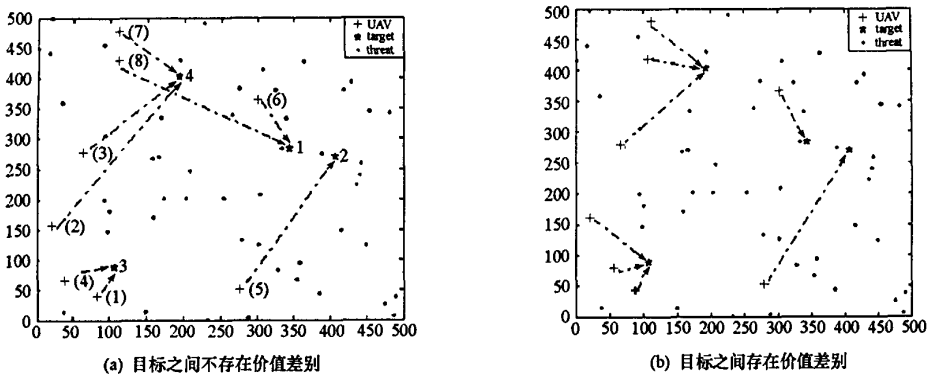


图 4 目标分配结果

Fig. 4 Target assigning results

3.2 分析与比较

基于 SD 的目标分配方案, 在个体利益与整体利益之间取得折衷, 明显降低了目标分配的计算空间

规模。假设有 M 个 UAV, N 个 Target, 则穷举法计算量至少为 N^M , 而采用满意集后的计算量为 $\prod_{i=1}^M m_i$, m_i 为 UAV $_i$ 的满意集大小。由于 $m_i \leq N$, 因此 $\prod_{i=1}^M m_i \leq N^M$, 且通常 m_i 比 N 小得多, 从而 $\prod_{i=1}^M m_i$ 远远小于 N^M 。并且随着 N 和 M 的增加, 即随着 UAV 数目增加和攻击目标数目的增加, 采用 SD 的目标分配方法在空间和时间上的改进愈加明显。如对于上述想定, $N = 4, M = 8$, 基于 SD 的目标分配方法所测试的目标分配空间仅为 72, 而没有采用基于 SD 的穷举方法则具有协同目标分配空间 $4^8 = 65536$ 。

本文在各种 N 和 M 配置以及威胁配置条件下, 对基于 SD 的目标分配方法和穷举方法做了比较, 如图 5 所示。从图 5 的 (a) 和 (b) 中可以看出, 采用 SD 的目标分配方法在目标分配空间和计算时间上都明显改进, 尤其随着目标分配规模变大, 这种改进愈加明显; 从图 5(c) 中看出, 基于 SD 的目标分配方法由于通过满意集对决策空间进行了剪枝, 在解的性能上稍劣于穷举方法, 但是这种降低完全可以接受。综合考虑求解的空间和时间效率以及解性能, 基于 SD 是一种有效的解决多 UAV 目标分配的方法, 且具有实时性高的特点。

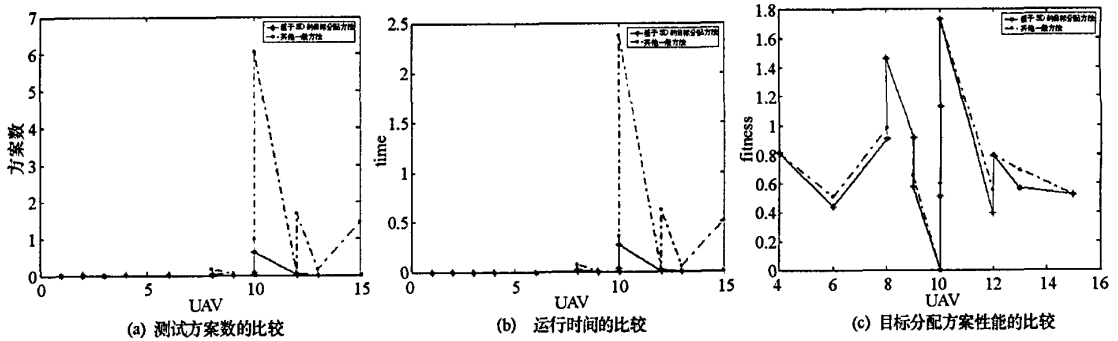


图 5 SDT 方法与穷举法的比较

Fig.5 Comparing of results

4 结束语

目标分配是多 UAV 协同自主控制的一个重要问题, 是 UAV 任务规划研究的重要内容。本文以 SEAD 为背景, 研究从不同机场起飞的 UAV 编队配置以及相应的目标分配技术。基于 SD 的目标分配方法可以独立应用于完全自主的 UAV 目标分配, 也可以作为辅助决策提供给决策者和指挥人员。实际上, 基于 SD 的目标分配方法不仅仅为多 UAV 协同机制提供了一种可行的、有效的协同协调技术, 同时对多机器人协调协同机制研究具有一定的借鉴和指导意义。

参考文献:

- [1] 曹奇英, 何张兵. WTA 的遗传算法研究[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1).
- [2] 董彦非, 冯惊雷, 张恒喜. 多机空战仿真协同战术决策方法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6).
- [3] Bacharach M. The Epistemic Structure of a Theory of a Game[J]. Theory and Decision, 1994, 37: 7 - 48.
- [4] McLain T, Chandler P, et al. Cooperative control UAV rendezvous[C]. Proc. ACC, June 2001.
- [5] 张考, 张云飞, 马东立, 等. 飞行器对雷达隐身性能计算与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [6] 朱宝璠, 朱荣昌, 雄笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [7] Goodrich M A. A Theory of Satisficing Control[D]. Brigham Young University, 1996.
- [8] McLain T, Chandler P, et al. Cooperative Control of UAV Rendezvous[J]. Proc. ACC, 2309 - 2314, Arlington, VA, June 2001.
- [9] Richards A, Bellingham J, et al. Coordination and Control of Multiple UAVs[A]. Proc. AIAA GNC, 2002 - 4588, Monterey, CA, August 2002.

