基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配算法

廖 沫 陈宗基

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：多无人机(UAV，Uninhabited Aerial Vehicle)协同目标分配问题是决定由哪些 UAV 攻击哪些目标，达到提高作战效能，减少攻击代价的目的.考虑 UAV 的差异、目标的差异及战场态势对目标分配的影响，建立了多机协同目标分配问题的数学模型.提出了基于多智能体(Agent)分布协同拍卖的动态目标分配算法，仿真结果和统计数据分析证明，算法能够给出具有很好的优化效果的分配方案，是一种动态的算法，能够在规定的时间或资源约束下得到满足一定优化需求的目标分配方案.

关 键 词：无人驾驶飞机；目标分配；拍卖；智能体

中图分类号：TP 301

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0180-04

Dynamic target assignment method based on multi-agent decentralized cooperative auction

Liao Mo Chen Zongji

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The multi-UAV(uninhabited aerial vehicle) cooperative target assignment problem is to decide which UAV attack which target so as to improve efficiency and reduce cost. The mathematic model for multi-UAV cooperative target assignment problem was built. Assigning targets in multi-UAVs, the model considered about effect of the battle field situation and differences in different UAVs and targets. A dynamic target assignment method based on multi-agent decentralized cooperative auction was presented. The simulation result and the statistical data demonstrate that the method can present assign schemes with good optimal objective function and the method is a kind of dynamic method which gets schemes with expected optimal effect under certain time or resource constraints.

Key words: uninhabited aerial vehicle; target assignment; auction; Agent

任务分配问题是 N 个不同的智能体(Agent)要执行 M 项不同任务，如何合理地将任务分派给不同 Agent，才能提高整体执行效果同时减小执行代价.任务分配问题属于非确定性多项式时间(NP，Nondeterministic Polynomial)问题，其求解方法有穷举或改进穷举方法[1]，模拟退火法，禁忌搜索和遗传算法[2-3]等.大的计算代价是 NP 问题的难点，对多数问题实时性难以保证，很难做到动态分配.

多无人机(UAV，Uninhabited Aerial Vehicle)协同目标分配是将一组不同位置、不同价值、不同威胁程度的目标合理地分配给类型、价值和战斗力都各不相同的 UAV，以达到整体作战效能最大、代价最小的目的.战场态势瞬息万变，局势改变将导致原有分配方案效率降低甚至不可行，进行在线、实时的目标分配非常必要，多机协同目标分配对实时性要求相当苛刻.“实时”并非越快就越好，而是指在规定的时间内给出问题的解.将每个 UAV 看成一个 Agent，攻击目标看成 UAV 要执行的任务，本文提出满足实时性要求

收稿日期：2006-03-06

基金项目：国家自然科学基金资助项目(90205011)

作者简介：廖 沫(1978—)，女，广西柳江人，博士生，liaomo@buaa.edu.cn.

的基于多Agent分布协同拍卖的动态目标分配算法,算法对多机协同目标分配问题的求解并非求问题的"最优"解,而是在规定的时间约束下给出"较好"的接近最优的分配方案.

1　多机协同目标分配的数学模型

本文研究对敌防空火力压制(SEAD,Suppression of Enemy Air Defense)任务的多机协同目标分配问题,考虑 UAV 初始位置、速度和战斗力等差异,目标的价值、坚固程度等差异以及战场态势对目标分配方案的影响,建立多机协同目标分配问题的数学模型.

假设有 N 个 UAV$\{U_1,U_2,\cdots,U_N\}$,M 个目标$\{T_1,T_2,\cdots,T_M\}$,定义目标分配矩阵 $\boldsymbol{X}^{N\times M}$:

$$x_{ij}=\begin{cases}1 & U_i \text{ 攻击目标 } T_j\\ 0 & U_i \text{ 不攻击目标 } T_j\end{cases} \tag{1}$$

约束:

$$\sum_{j=1}^{M}x_{ij}\leqslant M_{\max}\qquad i=1,2,\cdots,N \tag{2}$$

其中 $M_{\max}$ 表示 UAV 能够攻击的最大目标数.

借鉴武器目标分配的参数指标[4],假设 U_i 的价值为 v_i,v_i 与 UAV 的战斗力、机载设备配置有关.目标 T_j 的价值为 ρ_j,表示目标的战略重要程度;U_i 攻击 T_j 的效率 $p_{i,j}$,表示 U_i 能够摧毁 T_j 的概率;U_i 攻击 T_j 的风险为 $r_{i,j}$,表示 U_i 攻击 T_j 被毁的概率.$P_{\mathrm{t},i,j}$为 U_i 到 T_j 的平均路径威胁代价;$P_{\mathrm{l},i,j}$为 U_i 到 T_j 的路径长度代价.v_i 和 ρ_j 据专家经验针对作战要求给出,具有相对意义;$p_{i,j}$和 $r_{i,j}$由评估单元给出;$P_{\mathrm{t},i,j}$和 $P_{\mathrm{l},i,j}$由路径规划器给出.

目标分配问题的目标函数包括以下因素:

1) 摧毁目标效益:$U(\boldsymbol{X})=\sum_{j=1}^{M}(\rho_j\cdot\pi_j)$,其中 $\pi_j=1-\prod_{i=1}^{N}(1-x_{ij}\cdot p_{i,j})$ 为 T_j 被摧毁的概率函数;

2) 分配策略的攻击代价:$Y(\boldsymbol{X})=\sum_{i=1}^{N}(\zeta_i\cdot v_i)$,其中 $\zeta_i=\sum_{j=1}^{M}(D_i(T_j)\cdot x_{ij})$ 称为U_i 的损耗概率,$D_i(T_j)$ 为 U_i 攻击 T_j 的耗损函数,$D_i(T_j)=f(P_{\mathrm{l},i,j},P_{\mathrm{t},i,j},r_{i,j})$;

3) 目标函数:

$$J(\boldsymbol{X})=A\cdot U(\boldsymbol{X})+B\cdot Y(\boldsymbol{X}) \tag{3}$$

其中,A 和 B 为权系数.

目标分配问题的最优解为 $\boldsymbol{X}^*=J^{-1}(J_{\max})$.

2　分布协同拍卖算法

拍卖是多 Agent 系统进行任务和资源分配常用的技术,分布协同拍卖不同于一般拍卖[5],其原理是:随机生成竞拍顺序,各 Agent 按顺序竞拍到自己要执行的任务,一轮完成后得到任务分配方案.若时间和资源允许,则生成新的竞拍顺序进行新一轮竞拍,得出的分配方案优于旧方案则取代之.重复多轮竞拍,直到时间或资源超出限制,得出当前最好的分配方案.本文针对目标函数为非线性的情况,允许一个 UAV 攻击多个目标,一个目标可以被多个 UAV 攻击的多机协同目标分配问题,提出基于多 Agent 分布协同拍卖的目标分配算法.

2.1　拍卖机制设计

将每个 UAV 看成一个 Agent,设计拍卖机制.由于允许 UAV 攻击多个目标,因此在竞拍前各 UAV 根据待攻击的目标构造所有可能的目标攻击方案,并计算这些方案的效益、代价和选择函数等.拍卖过程为:先确定各 UAV 的竞拍顺序,轮到某个 UAV 竞拍时,UAV 根据贪婪法则,从构造好的方案列表中选择"最好"攻击方案.所有 UAV 竞拍完成后,多 UAV 系统得到一个目标分配方案.

2.2　攻击方案的竞拍原则

攻击方案定义为目标的有序集,表示 UAV 按顺序攻击目标,令攻击方案为 $A_l=\{T_{j1},T_{j2},\cdots,T_{jL}\}$($A_l$ 是有序集),定义以下参数:

1) U_i 选择攻击方案 A_l 的效益

$$V_i(A_l)=\sum_{k=1}^{\mathrm{card}(A_l)}p_{i,jk}\cdot\rho_{jk}$$

其中 $\mathrm{card}(A_l)$表示 A_l 的基数.

2) U_i 选择攻击方案 A_l 的代价

$$C_i(A_l)=D_i(A_l)\cdot v_i$$

其中,$D_i(A_l)=\eta_i\cdot C_{\mathrm{t},i}(A_i)+(1-\eta_i)C_{\mathrm{l},i}(A_l)$,$\eta_i\in[0,1]$,为 U_i 选择 A_l 的损耗函数.$C_{\mathrm{t},i}(A_l)=\gamma_i\left[1-\prod_{k=1}^{\mathrm{card}(A_l)}(1-r_{i,jk})\right]+(1-\gamma_i)P_{\mathrm{t},i}(A_l)$,$\gamma_i\in[0,1]$,为 U_i 选择 A_l 的威胁代价.$P_{\mathrm{t},i}(A_l)$为 U_i 选择 A_l 的路径威胁代价,由路径规划器给出.$C_{\mathrm{l},i}(A_l)=P_{\mathrm{l},i}(A_l)/P_{\mathrm{l},i,L\max}$为 U_i 选择 A_l 的路径代价,$P_{\mathrm{l},i,L\max}$为 U_i 的容许路径,$P_{\mathrm{l},i}(A_l)$为 U_i 选择 A_l 的路径长度,由路径规划器给出.

定义 U_i 选择 A_l 的选择函数 $S_{i,l}=A\cdot V_i(A_l)+B\cdot C_i(A_l)$,则 UAV 竞拍到选择函数

最大的攻击方案

$$A_{\text{bid}} = f^{-1}(\max(S_i)) \tag{4}$$

上式的竞拍原则使UAV在选择攻击方案时不仅考虑到个体因素,还考虑了对整体分配方案的影响,有利于得到整体优化的分配方案.

2.3 分配方案的目标函数

每一轮拍卖结束,各UAV都竞拍到自己的攻击方案 A_{bid},若 U_i 的攻击方案为 $A_{\text{bid}}(i)$,根据式(1)的定义,由所有竞拍到的攻击方案 $A_{\text{bid}}(i)$ 组合出多机协同目标分配问题的目标分配矩阵 $\boldsymbol{X}^{N\times M}$,代入式(3),可以计算分配方案的全局目标函数.

2.4 算法流程

目标分配算法在启动之前需要进行初始化,各UAV读入待攻击的目标及相关参数;各UAV针对所有目标构造所有可能的单机攻击方案,并计算这些方案的价值、代价和竞拍函数等参数.初始化计算结束后,算法随机生成UAV的竞拍顺序,启动拍卖过程,轮到竞拍的UAV根据贪婪法则(式(4))竞拍到攻击方案,然后各UAV更新其目标价值参数.所有的UAV完成竞拍后,一轮拍卖结束,得到目标分配方案.当时间或资源允许时,算法生成新的竞拍顺序,展开新一轮拍卖,拍卖结果若优于以前的方案则取代之.当时间或资源超出限制时,算法停止,给出当前最好的分配方案.算法的具体流程如图1所示.

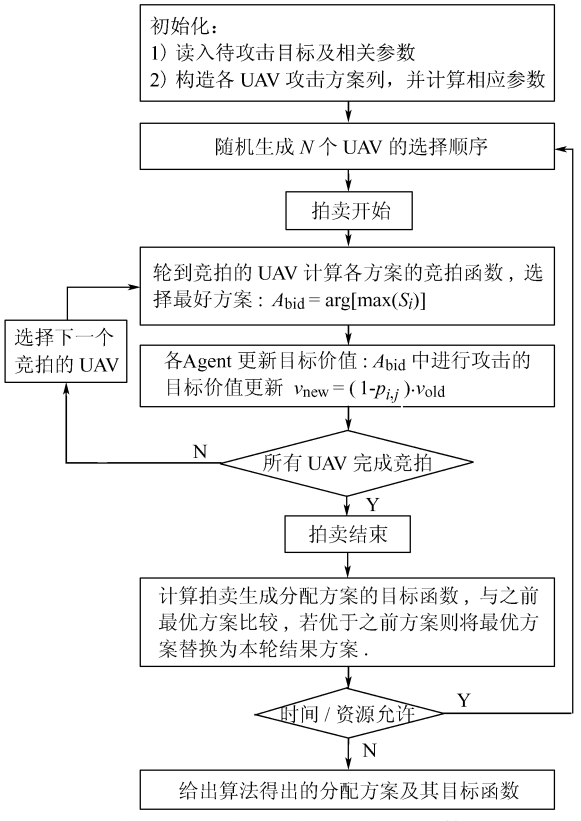

图1 多UAV分布协同拍卖目标分配算法流程

多机协同目标分配问题允许一个UAV攻击多个目标,本文对此的处理方法是由各UAV根据所要攻击的目标列表构造自己可能选择的所有的攻击方案.例如,待攻击目标为 $\{T_1, T_2, \cdots, T_N\}$,若 U_i 最多允许攻击2个目标,则 U_i 可构造攻击方案序列 $\{\{T_1\},\{T_2\},\cdots,\{T_N\},\{T_1,T_2\},\cdots,\{T_N,T_{N-1}\}\}$,同时计算各方案的相关参数,根据单机的各种约束,方案构造时可直接剔除一些不可行的攻击方案.

多机协同目标分配问题不同于一般任务分配,任务分配问题规定一个任务只能由一个Agent执行,而目标分配允许多个UAV攻击同一个目标,同时目标分配的目标函数不是线性函数.对此,本文在拍卖过程中,每一个UAV竞拍到自己的攻击方案后,已指派UAV的目标的价值将降低,各Agent对所有目标的当前价值进行更新,重新计算竞拍函数,根据更新后竞拍函数竞拍攻击方案,这样避免了多个UAV过于集中于攻击相同目标,有利于获取更高的全局目标函数.假设拍卖过程中第 i 个UAV竞拍到的方案为 $\{T_{j1}, T_{j2}\}$,各UAV需对 T_{j1}, T_{j2} 的价值按 $v_{\text{new}}=(1-p_{i,j})\cdot v_{\text{old}}$ 进行更新,而轮到自己进行竞拍时将按新的目标价值计算竞拍函数,从而竞拍到更合理的攻击方案.

3 仿真实例分析

对7×6(7架UAV攻击6个目标)和4×4(4架UAV攻击4个目标,最大攻击目标数2)的情况对分配算法进行仿真和验证.时间约束规定为算法最大拍卖轮次 $T_{\max}=20$ 次.图2和图3为两种情况目标分配结果示意图,横、纵坐标为战区的东西向和南北向距离,线表示UAV飞行的路径(图3中不同UAV路径用不同的线型表示)威胁周围的圆表示威胁区域.

表1为两种情况算法的运算结果,其中优化百分比为算法解的目标函数和理想目标函数的比值,在拍卖轮次限制为20次的条件下,7×6($M_{\max}=1$)情况优化百分比为99.37%,4×6($M_{\max}=2$)情况优化百分比为99.11%,算法在规定的约束下得到很好的优化效果.

算法包括初始化参数计算和目标分配两个过程,因此,算法的运算时间相应地包括初始化时间和目标分配时间两部分.初始化计算涉及到的路径规划算法比较复杂[6],所以计算时间相对较长.

本文研究用一台主频 2.4 GHz 的计算机对初始化参数串行计算,7×6(M_{max}=1)的情况目标分配时间为 0.018 s,初始化需 1.129 s;4×6(M_{max}=2)的情况目标分配时间为 0.023 s,初始化需 1.129 s.可见算法的分配速度非常快,能够满足战场实时性要求;而初始化时间由于涉及路径规划相对较大,实际应用时可采用多计算机并行计算,单机的初始化参数分别由单机管理决策计算机计算.

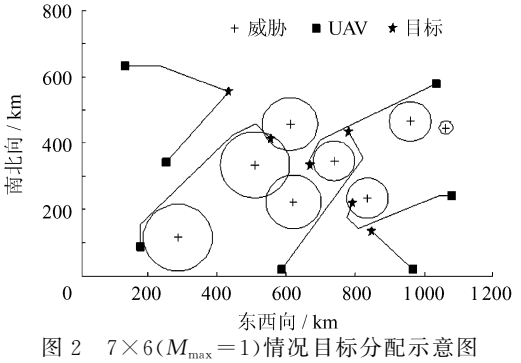

图 2　7×6(M_{max}=1)情况目标分配示意图

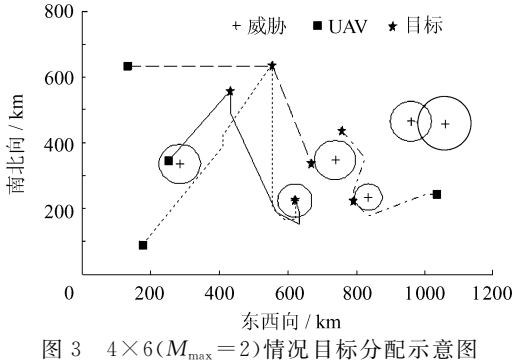

图 3　4×6(M_{max}=2)情况目标分配示意图

表 1　算法结果数据表

性能参数	分配形式	
	7×6(M_{max}=1)	4×6(M_{max}=2)
拍卖轮数	20	20
目标函数	23.736 8	23.415 3
理想目标函数	23.887 6	23.626 1
优化百分比/%	99.37	99.11

4　算法的统计性能分析

本文提出的分布协同拍卖方法是一种行之有效的动态目标分配方法,可满足预先设定的时间/资源约束.以下通过限制拍卖轮数来限制算法的运行时间,分析时间限制对算法优化效果的影响.

假设所有的竞拍顺序中有占总数 p_r 的顺序生成的分配方案的优化百分比大于 r,即一轮拍卖得到优化百分比大于 r 的概率为 p_r.若最大拍卖轮数限制为 n,令 p_a 为算法解的优化百分比大于 r 的概率.由于每轮拍卖得到优化百分比小于 r 的概率为 $(1-p_r)$,所以解的优化百分比大于 r 的概率 $p_a=1-(1-p_r)^n$,则 $p_r=1-(1-p_a)^{1/n}$.可以得出结论:若 $p_r>1-(1-p_a)^{1/n}$,则最大拍卖轮数为 n 时算法解优化百分比大于 r 的概率大于 p_a.因此,若知道 p_r 和拍卖轮数 n,则能够了解算法优化性能的概率特性.

对不同初始条件,不同 r 对应的 p_r 均不同.取 7×6 单目标分配的 10 组不同初始数据分析 p_r 的特性,总共可以生成 7! 种竞拍顺序,表 2 为不同初始条件下取不同的 r 时,p_r 的取值情况,可见绝大部分竞拍顺序得到的优化百分比大于 80%,优化百分比大于 90%的顺序基本也占一半以上,优化百分比大于 95%的竞拍顺序占的比例相对小些,但可以通过提高拍卖轮数 n 来获取高的优化百分比解.例如,对于计算性能最差的第 6 组数据,r=0.95,即优化百分比大于 95%时,p_r=0.11,根据公式 $p_a=1-(1-p_r)^n$,若取 n=20,可得 p_a=90.28%,即可以下结论,对第 6 组数据,时间限制取为限制拍卖轮数为 20 次,目标分配算法有 90.28%的可能性得到优化百分比大于 95%的优化解.通过适当放宽运算的时间限制,本文的目标分配算法可以得到"较好"的、令人"满意"的目标分配方案.

表 2　不同数据的 p_r 取值情况

组号	p_r		
	r=0.8	r=0.9	r=0.95
1	1.0	1.0	0.809
2	1.0	0.988	0.726
3	0.938	0.702	0.334
4	1.0	0.833	0.427
5	1.0	0.679	0.679
6	0.896	0.437	0.110
7	1.0	0.998	0.681
8	1.0	0.971	0.356
9	0.998	0.620	0.220
10	0.995	0.689	0.393

5　结 束 语

本文提出了多 UAV 协同目标分配的数学模型,考虑 UAV 的价值、战斗力、初始位置,目标的价值、威胁度和战场态势对目标分配的影响.提出基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配算法,它能在给定的时间/资源约束条件下给出分配方案.对算法的执行效果和统计特性都进行了分析,证明对于绝大多数的数据,本文算法能在小的拍卖次数限制(即小时间限制)下得到满足用户要求的很接近理想最优值的优化解.

(下转第 196 页)