

文化算法在有人/无人机协同作战目标分配中的应用

王 勋, 姚佩阳, 孙 昱, 李 锴, 荣 庆

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对有人/无人机协同作战目标分配问题,基于文化算法提出一种遗传算法和离散粒子群算法相结合的目标分配方法。根据有人/无人机协同目标分配问题的特性,结合文化算法的基本框架,建立了遗传算法和离散粒子群算法的交互机制,充分利用遗传算法和离散粒子群算法对优化问题的搜索能力,改善了 2 种算法易陷入局部最优的缺点,对约束条件下的有人/无人机协同作战目标分配问题进行了有效求解。实验结果表明,基于遗传和离散粒子群相结合的文化算法优于遗传算法和粒子群算法,收敛速度更快,能够快速找到目标分配问题的最优解。

关键词 有人/无人机协同;目标分配;文化算法;遗传算法;离散粒子群算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.005

中图分类号 V249;TP18 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0021-05

Research on Problems of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Targets Assignment

WANG Xun, YAO Peiyang, SUN Yu, LI Kai, RONG Qing

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A target assignment method, interaction mechanism of the genetic algorithm (GA) combined with the discrete particle swarm optimization (DPSO) is put forward based on cultural algorithm (CA). According to the characteristics of MAV/UAV target assignment problem, the interaction mechanism between GA and DPSO is established based on the basic framework of CA. The proposed algorithm improves the search ability and overcomes easily to run into partial optimization. The algorithm can solve the MAV/UAV cooperation mission assignment problem effectively. The simulation results show that the proposed algorithm is better than GA and DPSO. The algorithm has a good convergence rate and can find the best assignment scheme fleetly.

Key words: manned/unmanned aerial vehicle cooperation; target assignment; cultural algorithm; genetic algorithm; discrete particle swarm optimization

随着现代战争向网络化、无人化、智能化方向发展^[1-3],作为执行恶劣、纵深、危险作战环境下侦查打击任务的重要工具^[4],无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)执行任务的方式也由远程操纵下单无人机向多无人机、有人/无人机智能化协同作战的

方向发展,而有人/无人机协同作战将是未来无人机执行作战任务的重要形式。无人机作为任务的执行者,其作战任务的分配是协同作战过程中的一个十分关键的问题^[5-6]。

近年来多无人机任务分配方面的研究日臻完

收稿日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金(61273048)

作者简介:王 勋(1990—),男,山东临朐人,博士生,主要从事有人/无人机协同作战问题研究.E-mail:wxkgdxy@163.com.

引用格式:王勋,姚佩阳,孙昱,等.文化算法在有人/无人机协同作战目标分配中的应用[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):21-25. WANG Xun, YAO Peiyang, SUN Yu, et al. Research on Problems of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Targets Assignment [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 21-25.

善^[7-8]。文献[9]提出了一种基于离散粒子群算法的多无人机协同目标分配方法;文献[10]针对普通算法无法处理时限问题的缺陷,通过对合同网协议进行改进,实现对有时间限制任务的快速分配。这些文献仅给出了一般性的任务分配方法,缺乏对有人/无人机协同中其特殊的体系结构进行分析,所提的算法无法与之相适应,进而无法实现对任务的快速有效分配。

1 有人/无人机编队协同作战体系结构

有人/无人机编队协同作战体系实际可以看作多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)^[11],有人机和各无人机均作为MAS中的Agent^[2],其基本的体系结构有分布式、集中式以及混合式。分布式结构具有鲁棒性强、延拓性好的优点,但由于各Agent之间的平等性要求,Agent之间需要大容量、低延迟的通信能力支撑。集中式结构具有简单、快捷的优点,但其对于控制Agent的能力要求较高,不能适应高度对抗的作战环境。

为了适应瞬息万变的战场环境,有人/无人机编队协同作战体系结构一般采用兼有集中式和分布式优点的混合式体系结构^[8],由1架有人机与m架无人机组成编队,编队内无人机构成分布式体系结构,无人机编队与有人机构成集中式体系结构。混合式的作战体系结构既可以充分发挥有人机中人的最高决策能力,又可以发挥无人机编队应对突变信息的实时调整能力。

在混合式体系结构中,编队内有人机、无人机通过数据链共享任务目标信息以及编队自身能力信息,各无人机以自身能力为依据,结合来自有人机的实时较优方案,采用一定的算法实时产生目标分配结果,并通过数据链再将结果实时传输给有人机,有人机将无人机提供的方案信息实时更新到自身的方案集中,并替换原始方案中较差的个体,这样建立了有人机与无人机方案制定上的协商机制,有人机最终得出最佳方案。混合式能够适用于高对抗环境下的任务分配,在通信条件较好时,能够对战场环境的改变迅速做出反应,有人机与无人机协同对目标进行重新分配,尽可能地提高任务完成的效果。

2 目标分配问题描述与建模

2.1 问题描述

假设我方1架有人机与M架无人战斗机($U_i (i = 1, 2, \dots, M)$)组成一个作战编队,对敌方的N个

目标($T_j (j = 1, 2, \dots, N)$)进行打击。有人机根据无人机属性信息以及目标对我方无人机的威胁信息,对M架无人机进行快速合理的打击目标分配,使得我方编队对敌方目标打击效果最好,且我方编队综合损失最小。

2.2 模型建立

2.2.1 目标分配矩阵

目标分配矩阵定义: $R_{M \times N} = (r_{ij})_{M \times N}$,

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{将目标 } T_j \text{ 分配给 } U_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ 。

2.2.2 模型约束条件

无人机在执行任务的过程中,为了尽可能提高其作战效能,需对分配的结果进行均匀性的约束。

式(1)中的第1个约束条件意义为攻击第j个目标的无人机最少为 M_{\min} 架,最多为 M_{\max} 架;第2个约束条件意义为第i架无人机最少执行个 N_{\min} 任务,最多执行个 N_{\max} 任务。

2.2.3 模型目标函数

目标函数主要考虑2个主要因素:执行任务的收益和产生的损耗。

1)任务收益函数:

$$G(R) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \quad (2)$$

式中: λ_j 为无人机摧毁目标 T_j 的概率; μ_j 为无人机攻击目标 T_j 的优先权值。

$$\lambda_j = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{ij})^{r_{ij}} \quad (3)$$

式中: p_{ij} 为 U_i 攻击 T_j 时对目标的毁伤概率。

在式(2)中,为了充分体现任务的紧迫程度,将任务优先权值作为目标分配的部分依据,目标的优先权值由有人机评估确定,其大小与目标价值、目标类型以及威胁程度等战场目标信息有关。

$$\mu_j = u_j g_j \quad (4)$$

本文对此做简化处理,仅仅考虑目标的价值 u_j 和目标打击的偏序关系 g_j 。由目标类型以及威胁程度确定目标打击优先序,若 T_j 为第k个被打击的目标,则:

$$g_j = 1/k \quad (5)$$

2)任务完成损耗函数:

$$H(R) = \sum_{i=1}^M \sigma_i v_i \quad (6)$$

式中: σ_i 为无人机中 U_i 的损耗概率; v_i 为无人机中 U_i 的价值,与无人机本身的装备有关系。

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^N (\tau_l l_{ij} + \tau_q q_{ij} + \tau_z z_{ij}) r_{ij} \quad (7)$$

式中: l_{ij} 为 U_i 执行任务 T_j 的路径消耗; q_{ij} 为 U_i 执行 T_j 的风险代价, 即无人机被损毁的概率; z_{ij} 为 U_i 攻击 T_j 时的资源消耗, 如导弹消耗、能源消耗等。

由目标分配的收益函数 $G(R)$ 和损耗函数 $H(R)$ 共同构成目标函数, 利用两者的比值构成目标函数:

$$S(\mathbf{R}) = \frac{G(\mathbf{R})}{H(\mathbf{R})} = \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \right) / \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i v_i \right) \quad (8)$$

则最佳分配结果对应的解应满足:

$$\mathbf{R}^* = S^{-1}(S_{\max}) \quad (9)$$

2.3 目标分配问题的数学描述

有人/无人机协同作战目标分配问题可抽象为以下数学描述:

$$\max S(\mathbf{R}) = \frac{G(\mathbf{R})}{H(\mathbf{R})} = \left(\sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \right) / \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i v_i \right) \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} M_{\min} \leq \sum_{i=1}^M r_{ij} \leq M_{\max} \\ N_{\min} \leq \sum_{j=1}^N r_{ij} \leq N_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

3 应用文化算法的目标分配

3.1 文化算法

有人/无人机协同作战任务分配问题是一个多参数、多约束的组合优化问题, 属于 NP-hard 问题。求解这类问题的算法包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等, 但是均存在着容易陷入局部最优、收敛速度慢的问题。因此, 本文采用遗传和离散粒子群相结合的文化算法进行求解, 通过 2 种基本的寻优算法交织运算, 提高单一算法跳出局部最优的概率、提升收敛速度。

文化算法是一种“双演化双促进”进化结构^[4,12]。算法主要包含 2 个空间: 信念空间和群体空间。群体空间是算法的主要部分, 通过演化和评估不断进行自身解的更新; 信念空间则是算法的辅助部分, 它将自身的个体与接收的个体相结合, 通过自身的演化和评价, 不断更新更优个体, 并通过影响操作改变种群空间的较差个体, 提高其演化效率。

本文采用离散粒子群算法与遗传算法相结合的文化算法对问题进行求解。其中离散粒子群算法作为群体空间中个体的演化策略; 遗传作为信念空间中个体的演化策略。

3.1.1 离散粒子群算法

粒子群算法是将问题的解视为解空间的粒子, 每个粒子都拥有速度和位置属性, 这决定了粒子的运动轨迹, 粒子根据自身以及其它粒子的运动经验改变速度和位置, 使其朝着解空间中最优粒子的位置运动。粒子的下一时刻的位置由粒子的速度、个

体极值以及当前全局最优解决定。

根据有人/无人机协同作战目标分配问题的特点, 离散粒子群算法的位置和速度更新分别见式(12)和式(13), 即:

$$v_i(t+1) =$$

$$\omega \odot v_i(t) \oplus c_1 \odot (p_i(t) \ominus x_i(t)) \oplus c_2 \odot (p_g \ominus x_i(t)) \quad (12)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) \oplus v_i(t+1) \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$, m 为粒子的个数; t 为迭代数, t_{\max} 为最大迭代次数; c_1 为认知参数, c_2 为社会参数; ω 为惯性权重; p_i 为粒子个体经历过的最好位置, p_g 为整个粒子群所有粒子经历过的最好位置; \odot 、 \oplus 、 \ominus 为逻辑运算符, 具体物理意义在此不再赘述, 详见文献[13]。

3.1.2 遗传算法

遗传算法利用了生物学中物种进化过程中基因重组、基因突变、自然选择等基本理论。把问题的解用染色体表示, 以二进制编码串的形式通过复制、交叉和突变等操作, 产生新一代染色体; 然后进行适应度值的比较, 选择适应度较好的个体作为母体进一步进化, 这样经过若干代进化, 染色体最终收敛到最适应环境的个体, 这个染色体就是问题的最优解。

3.2 算法步骤

3.2.1 群体空间

Step1 初始化粒子群速度和位置以及各项参数, 计算每个粒子的初始适应度值;

Step2 根据式(12)和式(13)更新每个粒子的速度和位置, 找出个体和群体的最优值;

Step3 判断是否满足设定的终止条件(本文判断条件为设定的最大迭代次数 N_{\max}), 如果是, 则转至 **Step7**;

Step4 判断是否向无人机提供方案(本文判断条件为是否达到固定间隔迭代次数 n), 如果是, 则向无人机提供当前自身部分最优方案;

Step5 判断是否采纳来自无人机的建议方案(本文判断条件为是否达到间隔迭代次数 k), 如果否, 则转至 **Step2**;

$$k = \lceil N_1 + \frac{(N_{\max} - k)N_2}{N_{\max}} \rceil \quad (14)$$

式中: N_1 、 N_2 为固定值; k 向上取整。

Step6 将来自无人机的最优方案替换有人机中的较差方案, 转至 **Step2**;

Step7 有人机输出目标分配的最优方案。

3.2.2 信念空间

Step1 初始化种群以及各项参数, 计算每个个体的初始适应度值;

Step2 更新种群, 然后进行交叉、变异、选择等操作;

Step3 计算新种群适应度值并找出个体和群体的最优值;

Step4 判断是否满足设定的终止条件(本文判断条件为有人机是否已经终止),如果是,则转至**Step8**;

Step5 判断是否向有人机提供方案(本文判断条件为设置的固定间隔迭代次数 m),如果是,则向有人机提供当前自身部分最优方案;

Step6 判断是否有来自有人机的建议方案,如果是,则转至 **Step2**;

Step7 将来自有人机的最优方案替换为无人机中的较差方案,转至 **Step2**;

Step8 结束运行。

4 案例仿真

假设 1 架有人机与 6 架无人机 (U_1, U_2, \dots, U_6) 组成作战编队,协同执行作战任务,其中 4 架无

人机性能相同,2 架异构无人机,敌方地面目标为 11 个(T_1, T_2, \dots, T_{11}),分布在坐标为 100×100 的矩形区域内。有人机根据态势信息,综合评估我无人机对地目标毁伤概率以及敌目标对我无人机威胁程度,并通过通信系统与无人机进行分享,相关位置参数及信息见表 1~4,根据以上信息对无人机编队进行目标分配,采用合理的目标优化算法,得到尽可能好的目标分配结果,使得我无人机对目标进行打击的作战收益最大。

表 1 无人机价值及进入目标区域的初始位置

Tab.1 UAV Value and the initial position

无人机	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
价值	0.24	0.24	0.24	0.24	0.89	0.84
初始位置	(21,0)	(34,0)	(0,60)	(0,36)	(0,70)	(45,0)

表 2 目标价值及位置

Tab.2 Target value and location

目标	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}
目标价值	0.48	0.77	0.33	0.74	0.54	0.65	0.43	0.35	0.63	0.66	0.57
目标位置	(10,33)	(66,54)	(55,65)	(99,46)	(82,81)	(23,96)	(50,9)	(83,28)	(15,97)	(91,87)	(10,81)

表 3 无人机对目标的毁伤概率信息

Tab.3 Probability of UAV damage targets

无人机	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}
$U_1 \sim U_4$	0.72	0.69	0.94	0.72	0.36	0.28	0.27	0.74	0.24	0.78	0.45
U_5	0.8	0.42	0.43	0.9	0.13	0.95	0.18	0.19	0.12	0.61	0.35
U_6	0.43	0.58	0.69	0.03	0.34	0.72	0.15	0.24	0.29	0.3	0.75

表 4 无人机受到目标的威胁程度信息

Tab.4 The Threat level from targets

无人机	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}
$U_1 \sim U_4$	0.51	0.15	0.82	0.78	0.12	0.11	0.39	0.92	0.82	0.45	0.29
U_5	0.02	0.62	0.41	0.45	0.91	0.11	0.38	0.33	0.78	0.49	0.62
U_6	0.48	0.23	0.97	0.01	0.32	0.58	0.08	0.97	0.58	0.33	0.87

针对上述问题描述,本文分别采用了离散粒子群算法(DPSO)、遗传算法(GA)、文化算法(CA)进行仿真求解,3 种算法的仿真结果和具体数据见图 1、表 5。

文化算法得到的最终目标分配结果为:

$$R_{M \times N} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

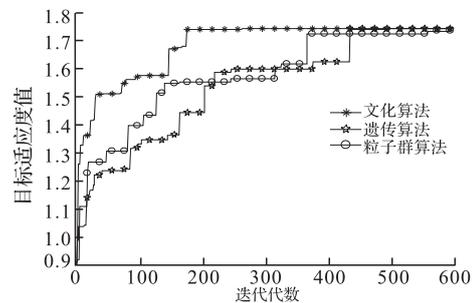


图 1 算法最优解性能比较

Fig.1 Performance comparison of three algorithms

从图 1 可以看出 3 种算法的收敛速度和最优解的优劣,文化算法比遗传算法和离散粒子群算法具有更好的收敛性。

表 5 算法性能比较数据

Tab.5 Comparative performance data for the algorithm

比较指标	CA	DPSO	GA
迭代 500 代后的最优解	1.763	1.755	1.762
最优解首次出现代数	180	370	440

从表 5 可见,文化算法能够更好更快地找到该目标分配问题的最优解,相较于离散粒子群算法和遗传算法,文化算法收敛代数分别提升了 51.3%和 59.1%。收敛速度有了较大程度的改善,对解决目标分配问题更具适应性。

图 1 中遗传算法和离散粒子群算法在 200~400 代时,最优解的适应度值基本没有变化,这反映了遗传算法和离散粒子群算法较容易陷入局部最优的缺陷,需要较长的迭代次数才能够跳出局部最优;而文化算法具有较快的寻优速度,这是与该算法在迭代过程中利用的 2 种子算法不断交互更新粒子有关,由于 2 种子算法的寻优机理不同,其陷入相同的局部最优的机率较小,这就保证了文化算法能够更容易跳出局部最优,找到全局最优解。

5 结语

本文针对有人/无人机协同作战中目标分配问题进行研究。首先给出了有人/无人机协同作战体系结构,然后在混合式体系结构的基础上对有人机控制下的无人机目标攻击问题展开研究,建立了目标分配模型,最后利用遗传算法和离散粒子群算法构建了文化算法,并用该算法对问题进行了求解。结果表明,文化算法具有较好的收敛性以及较强的全局搜索能力,能够更快地找到问题最优解。

参考文献(References):

- [1] DUAN H, LUO Q, SHI Y, et al. Hybrid Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Multi-UAV Formation Reconfiguration[J]. Computational Intelligence Magazine, IEEE, 2013, 8(3): 16-27.
- [2] LI W, SPONG M W. Unified Cooperative Control of Multiple Agents on a Sphere for Different Spherical Patterns[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(5):1283-1289.
- [3] XU Z, ZHANG X. Hesitant Fuzzy Multi-Attribute Decision Making Based on TOPSIS with In-Complete Weight Information[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 52(6):53-64.
- [4] 胡广浩,毛志忠,何大阔.基于遗传和粒子群结合的文化算法[J].东北大学学报:自然科学版,2009,30(11):1542-1545.
HU Guanghao, MAO Zhizhong, HE Dakuo. A New Cultural Algorithm Based on Hybrid of GA and PSO Algorithm [J].

- Journal of Northeastern University : Natural Science Edition, 2009, 30(11):1542-1545.(in Chinese)
- [5] CHEN S J, HWANG C L, BECKMANN M J, et al. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications[J]. Lecture Notes in Economics & Mathematical Systems, 1992, 375(4):1-531.
- [6] BELLINGHAM J, TILLERSON M, RICHARDS A, et al. Multi-Task Allocation and Path Planning for Cooperating UAVs[M]. Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms Springer US, 2003:23-41.
- [7] VALENTI M, SCHOUWENAARS T, KUWATA Y, et al. Implementation of a Manned Vehicle-UAV Mission System [C]//AIAA Guidance Navigation & Control Conference & Exhibit, Providence Rhode Island United States, 2004.
- [8] FAN C, WAN Y. An Adaptive Simple Particle Swarm Optimization Algorithm[C]//Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese. IEEE, 2008:3067-3072.
- [9] 叶文,朱爱红,潘长鹏,等.多UCAV协同目标分配算法研究[J].系统工程与电子技术,2010,32(1):104-108.
YE Wen, ZHU Aihong, PAN Changpeng. Cooperation Mission Assignment Algorithm for Multi-UCAV[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1):104-108.(in Chinese)
- [10] 庞巍,王康平,周春光,等.模糊离散粒子群优化算法求解旅行商问题[J].小型微型计算机系统,2005,26(8):1331-1334.
PANG Wei, WANG Kangping, ZHOU Chunguang. Fuzzy Discrete Particle Swarm Optimization for Solving Travel Salesman Problem [J]. Mini-micro Systems, 2005, 26(8): 1331-1334.(in Chinese)
- [11] 陈洁钰,姚佩阳,唐剑,等.多无人机分布式协同动态目标分配方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):11-16.
CHEN Jieyu, YAO Peiyang, TANG Jian, et al. Multi-UAV Decentralized Cooperative Dynamic Target Assignment Method [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(6):11-16.(in Chinese)
- [12] 吴亚丽,徐丽青.一种基于粒子群算法的改进多目标文化算法[J].控制与决策,2012,27(8):1127-1132.
WU Yali, XU Liqing. An Improved Multi-Objective Cultural Algorithm Based on Particle Swarm Optimization [J]. Control and Decision, 2012, 27(8):1127-1132.(in Chinese)
- [13] 黄岚,王康平,周春光,等.粒子群优化算法求解旅行商问题[J].吉林大学学报:理学版,2003,41(4):477-480.
HUANG Lan, WANG Kangping, ZHOU Chunguang, et al. Particle Swarm Optimization for Traveling Salesman Problems[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2003, 41(4):477-480.(in Chinese)

(编辑:徐敏)