

引用格式:王宇琦,张安,毕文豪.有人/无人机编队打击时敏目标任务分配[J].电光与控制,2018,25(8):7-10. WANG Y Q, ZHANG A, BI W H. Mission planning of manned/unmanned aerial vehicle formation for Time Critical Target attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):7-10.

有人/无人机编队打击时敏目标任务分配

王宇琦, 张安, 毕文豪
(西北工业大学,西安 710086)

摘要: 针对有人/无人机编队协同打击地面时敏目标任务分配问题,利用有人/无人机编队系统总体框架和时敏特性函数,构建有人/无人机编队协同打击地面时敏目标任务分配模型。采用改进的遗传算法,通过引入矩阵型编码提升任务效率,通过引入针对死锁问题的解码方法来解决任务分配的时序问题,最后运用该算法进行了仿真计算。结果表明该算法具有良好的任务分配效率。

关键词: 有人/无人机编队; 时敏目标; 协同任务分配; 遗传算法

中图分类号: V271.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.002

Mission Planning of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Formation for Time Critical Target Attacking

WANG Yu-qi, ZHANG An, BI Wen-hao
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710086, China)

Abstract: The task assignment of the manned/unmanned aerial vehicle formation in ground Time Critical Target (TCT) attacking was studied. Based on the general framework of the manned/unmanned aerial vehicle formation system and the concept of time-sensitive characteristic function, the task assignment model of the manned/unmanned aerial vehicle formation for cooperative ground TCT attacking was built. By adopting the improved Genetic Algorithm (GA), the matrix coding was introduced to enhance the task assignment efficiency. The timing sequence problem of task assignment was solved by introducing the decoding method for the deadlock problem. A simulation of the proposed algorithm was carried out, and the result proved that this algorithm has high task assignment efficiency.

Key words: manned/unmanned aerial vehicle formation; Time-Critical Target (TCT); cooperative task assignment; GA

0 引言

有人/无人机编队协同打击地面时敏目标(TCT)是指将有人机作为编队中的指挥机,将无人机(UAV)作为攻击机,两者通过数据链支持协同完成作战任务。有人/无人机编队协同任务分配的目的在于满足各项战术和技术指标的前提下,将不同的任务合理地分配给UAV,使得整个编队的作战效能最好^[1-2]。近年来,国内外针对协同作战的任务分配进行了很多研究,特别是以遗传算法为代表的智能算法得到广泛应用^[3]。例如,文献[3]对多UAV打击TCT的任务进行了研究

并利用变长度染色体整数编码遗传算法进行了仿真实验。但相关文献中的部分分配算法模型存在着模型约束条件简单以及只限于单类型任务等问题。因此,本文针对有人/无人机打击地面TCT协同任务分配问题的特点,采用一种矩阵型编码遗传算法,在考虑了TCT的时间约束和时序约束影响的同时,能够解决多类型任务的分配。

1 有人/无人机编队系统总体框架

在有人机和多架无人机协同打击地面TCT任务中^[4-5],当有人机通过机载传感器获取了需要打击的TCT信息或接到了上级作战指令后,有人机飞行员基于专家经验将编队作战任务进行分解,根据编队内各UAV执行任务的能力进行任务分配,形成任务分配方案。随后有人机向各UAV发布作战指令,各UAV接收

收稿日期:2017-08-07 修回日期:2017-10-23

基金项目:国家自然科学基金(61573283)

作者简介:王宇琦(1993—),男,陕西西安人,硕士生,研究方向为无人机分布式编队控制、任务分配。

作战指令后立即执行任务。在任务执行过程中,UAV通过各自的机载传感器感知战场态势^[6],向有人机回传任务、态势信息等,接收有人机的指令,同时与其他UAV相互通信和协同,共同完成编队任务^[7]。图1所示为有人/无人机编队协同对地 TCT 打击任务分配框架。

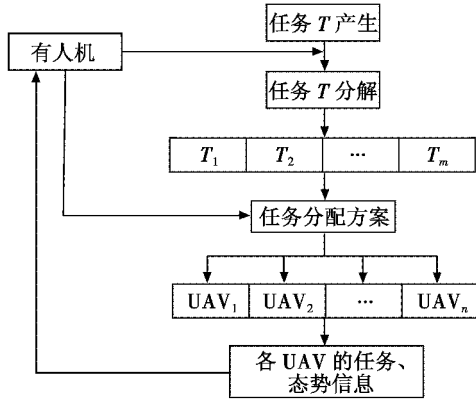


图1 有人/无人机编队协同对地 TCT 打击任务分配框架

Fig.1 Task assignment framework of manned/unmanned aerial vehicle formation in cooperative attacking of ground TCT

2 有人/无人机协同任务分配建模

设1架有人机和 n 架UAV(V_1, V_2, \dots, V_n)组成协同对地TCT攻击编队, t 时刻共发现 m 个TCT,针对每个TCT需要执行3种任务,分别为侦察(Classify)、打击(Attack)、评估(Verify),从而生成 $T = \{T_1^C, T_1^A, T_1^V, \dots, T_m^C, T_m^A, T_m^V\}$ 个任务需要分配。用 T_i^k 表示第 i 个目标的 k 任务,其中, $i = 1, 2, \dots, m, k = C, A, V$ 。设总共有 N_T 个任务,易知 $N_T = 3m$ 。若用 M 表示整个作战所有任务集合,则

$$M = \{T_1^C, T_1^A, T_1^V, \dots, T_m^C, T_m^A, T_m^V\} = \{T_1, T_2, \dots, T_{3m}\} \quad (1)$$

UAV任务分配的结果即为每架UAV分配一个有先后顺序的任务执行序列,第 j 架UAV的任务序列可表示为

$$S_j = \{T_1^{j_1}, T_2^{j_2}, \dots, T_{l_j}^{j_{l_j}}\} \quad (2)$$

式中, l_j 为第 j 架UAV中所含的子任务总数。

2.1 任务分配收益函数

本文中,TCT的初始价值由有人机按照作战意图和战场态势进行事先设定,在任务执行过程中TCT的价值随着时间变化而呈现出相应的变化。

$V_i(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k))$ 表示 $t_j^{\text{arrive}}(T_i^k)$ 时刻任务 T_i^k 的固有价值。 $V_i(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k))$ 算式为

$$V_i(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k)) = f_{ij}(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k)) \cdot V_i(t_0) \quad (3)$$

式中: $V_i(t_0)$ 表示任务 T_i^k 的初始价值,在本文中指有人

机给出任务的初始价值; $f_{ij}(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k))$ 为时敏特性函数,主要表示在时间 t 执行TCT任务时的收益影响程度,本文中采用直线型的时敏特性函数。

任务收益模型分为侦察任务、打击任务和评估任务3部分,因此任务分配收益模型为

$$R_{T_i}(t) = \sum_{j=1}^{N_T} (x_{ij}^k \cdot P_i^k(V_j) \cdot V_i(t_j^{\text{arrive}}(T_i^k))) \quad (4)$$

式中: $x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & T_i \text{ 的 } k \text{ 任务由 } V_j \text{ 执行} \\ 0 & T_i \text{ 的 } k \text{ 任务不由 } V_j \text{ 执行} \end{cases}$; $P_i^C(V_j)$ 为无人机 V_j 对该目标的探测概率; $P_i^A(V_j)$ 为无人机 V_j 对该目标的毁伤概率; $P_i^V(V_j)$ 为无人机 V_j 对该目标的评估概率; $t_j^{\text{arrive}}(T_i^k)$ 表示无人机 V_j 到达目标的时间。

2.2 任务分配约束条件

1) 时间约束。

任务时间约束是指对第 i 个TCT的打击任务必须在其限定的时间窗口内完成。本文中,假设已得知TCT的任务时间窗口^[8]。

2) 时序约束。

本文中,侦察任务C完成后可执行打击任务A,打击任务执行完后可执行评估任务V。可表示为

$$t_i^C + \Delta t_i^C \leq t_i^A \quad (5)$$

$$t_i^A + \Delta t_i^A \leq t_i^V \quad (6)$$

式中: t_i^k 为任务 T_i^k 执行开始时间; Δt_i^k 为任务的执行时间^[9]。

3) UAV任务约束。

①1个子任务只能分配给1架UAV,每个子任务都要被执行。因此约束条件可表示为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \forall k = C, A, V. \quad (7)$$

②假设在整个作战过程中每架UAV的任务序列中最多针对两个目标执行任务,此即UAV的任务能力。

4) 航路约束。

设在作战区域中有 N_p 个圆形威胁区,用 P 表示威胁区集合,则 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{N_p}\}$ 。各UAV的航路需避开这些威胁区,即

$$P_{\text{an}}(V_j) \cap P = \emptyset \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

假设 V_j 要完成 T_i 上的侦察任务,图2中,线段1、4分别是过UAV做威胁圆的切线,线段3是过目标点做威胁圆的切线,圆弧段2是威胁圆上的一段。由于 $\beta < \alpha$,则其航路预估长度为

$$l = l_1 + l_2 + l_3 \quad (9)$$

式中, l_1, l_2, l_3 分别为线段1、圆弧段2、线段3的长度。通过航路预估方法得到每架UAV到达每个目标执行任务的开始时间,即 $t_j^{\text{arrive}}(T_i^k)$ 。

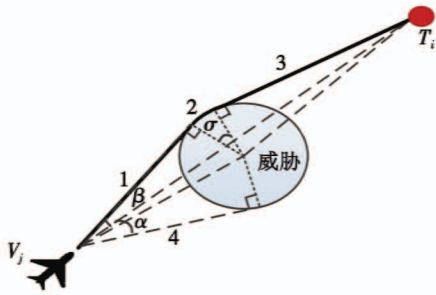


图 2 航路预估方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of route estimation method

3 基于矩阵型遗传算法的任务分配方法

3.1 时序约束任务的处理

时序约束在打击 TCT 多任务规划中非常重要,而在处理有时序约束的多任务分配过程中,不可避免会碰到死锁问题。死锁有多种形式,主要可分为自锁死和互锁死。本文中,在得到一个染色体编码后,通过调整染色体中同一架 UAV 的基因顺序使它们按照 C, A, V 的顺序排列来解决死锁问题。如图 3 所示, V_2 自锁死,因为它在目标 2 上的 C 任务应早于 A 任务被执行,调整两个基因的顺序使得染色体不再死锁。

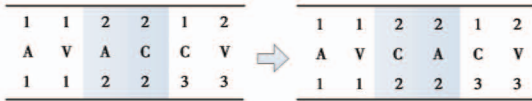


图 3 死锁染色体及其解锁

Fig. 3 Deadlock chromosome and its unlocking

3.2 基于矩阵型 GA 的任务分配

基于矩阵型 GA 任务分配的过程如下。

1) 构造一个 $3 \times N_T$ 维的矩阵型染色体, N_T 为任务数量, $N_T = 3m$, m 为 TCT 数量。由 N_T 个这样的基因构成一个矩阵染色体, 编码如图 4 所示, 这样的染色体对应一个完整的任务分配方案。 n 个 UAV 被分配去执行任务, 它们的序号在矩阵染色体中从小到大排列, 即 $V_1 < V_2 < \dots < V_n$, 具有相同 UAV 的列, 其前后顺序代表着不同的任务由该 UAV 执行的先后顺序^[10-11]。

T_1^1	\dots	T_1^1	T_1^2	\dots	T_1^2	\dots	T_1^n	\dots	T_1^n
k_1^1	\dots	k_1^1	k_1^2	\dots	k_1^2	\dots	k_1^n	\dots	k_1^n
V_1	\dots	V_1	V_2	\dots	V_2	\dots	V_n	\dots	V_n

图 4 染色体编码方式

Fig. 4 Chromosome encoding method

2) 根据有人/无人机打击 TCT 的任务分配数学模型, 适应度函数如式(4)所示, 计算种群中每个染色体所对应的适应度值。

3) 使用轮盘赌方法对种群进行选择操作, 并使用精英保留策略, 保留当代种群中适应度最高的多个染

色体。

4) 采用单点交叉及单点变异对种群中的染色体进行交叉及变异操作。

5) 判断是否满足算法结束条件, 若满足则退出循环, 否则转向 2)。

4 仿真验证

假定作战区域为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$, 1 架有人机与 6 架 UAV 组成作战编队, 在作战区域内分布着 2 个疑似 TCT, 位置分别为 $(300 \text{ km}, 80 \text{ km})$, $(75 \text{ km}, 90 \text{ km})$, 目标价值分别为 40, 30, 3 个威胁点分别为 $(20 \text{ km}, 45 \text{ km})$, $(50 \text{ km}, 55 \text{ km})$ 和 $(85 \text{ km}, 60 \text{ km})$ 。6 架 UAV 初始航向为正北, 飞行高度为 6 km, 速度恒定为 50 m/s, 初始位置见表 1。两个 TCT 的时间窗分别为 $[0 \text{ min}, 25 \text{ min}]$, $[0 \text{ min}, 30 \text{ min}]$, 设时间窗内 TCT 是静止的。UAV 执行攻击目标 1, 2 的任务概率信息见表 2。

表 1 UAV 初始位置

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
x	5	22	40	60	72	90
y	10	15	12	8	12	6

表 2 UAV 执行攻击目标 1, 2 的任务概率信息

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
T_1^C	0.68	0.68	0.94	0.74	0.68	0.33
T_1^A	0.21	0.82	0.61	0.32	0.48	0.25
T_1^V	0.72	0.33	0.68	0.25	0.68	0.51
T_2^C	0.72	0.72	0.69	0.78	0.64	0.43
T_2^A	0.42	0.63	0.51	0.43	0.84	0.43
T_2^V	0.72	0.23	0.43	0.32	0.64	0.73

遗传算法的基本参数设定: 遗传代数为 200, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1。经过基于矩阵型遗传算法的任务分配后得到的结果如图 5 所示。

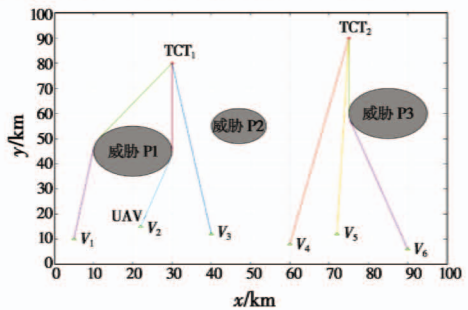


图 5 任务分配结果示意图

Fig. 5 Task assignment results

根据图 5 可以发现, 本文所提算法满足 UAV 打击 TCT 的任务规划要求。通过本文所提算法的计算, 得出与 TCT₁ 的交战时间为 1400 s, 即 23.3 min, 与 TCT₂ 的交战时间为 1687 s, 即 28.1 min。23.3 min < 25 min,

28.1 min < 30 min, 即任务分配结果满足战场上 TCT 的时间窗口要求。

本文从不同迭代次数中各染色体对应的整个任务交战收益来分析遗传算法的收敛性能。根据作战想定仿真, 可得到染色体在迭代过程中的最佳适应度值随着迭代次数的变化曲线, 如图 6 所示。可以看出, 随着迭代次数的增加, 仿真中任务收益明显增大。当迭代次数在 60 左右时, 整体任务收益最大, 得到最优分配方案。

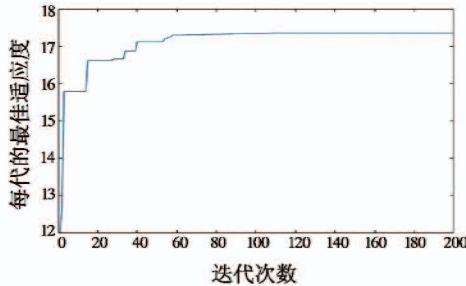


图 6 基于矩阵型遗传算法收敛性

Fig. 6 The convergence based on the matrix genetic algorithm

5 结论

协同任务分配是有人/无人机编队协同作战的关键技术之一, 任务分配的合理性很大程度上决定协同作战的成败。本文通过分析有人/无人机编队的作战过程, 建立了编队系统的总体框架; 然后引入时敏特性函数, 以任务分配收益最大为评估指标建立了有人/无人机编队打击地面时敏目标的任务分配模型; 最后提出了一种基于矩阵型编码方式的遗传算法对任务分配模型进行仿真验证。仿真结果表明, 本文所提算法合理有效, 能够很好地满足要求。

参考文献

[1] 钟赞, 姚佩阳, 孙昱, 等. 有人/无人机任务联盟分阶段

形成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 2031-2038.

[2] 冯旺. 打击 TCT 体系作战效能仿真方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

[3] 孟波波, 高晓光, 王云辉. 无人作战飞机打击时敏目标的任务规划研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 5-7.

[4] 刘跃峰, 张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 584-588.

[5] 刘宏强, 魏贤智, 付昭旺, 等. 有人机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 16-19.

[6] 顾帮余, 颜如祥, 徐军. 时间敏感目标及打击决策[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(3): 26-29.

[7] 纪敏, 李冬予. 基于功能节点的有人/无人机协同攻击模式研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(5): 8-12.

[8] WHITTEN A K, CHOI H L, JOHNSON L B, et al. Decentralized task allocation with coupled constraints in complex missions[C]//American Control Conference, 2011: 1642-1649.

[9] EVERS L, BARROS A I, MONSUUR H, et al. Online stochastic UAV mission planning with time windows and time-sensitive targets[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238(1): 348-362.

[10] 吴俊成, 周锐, 冉华明, 等. 遗传算法和拍卖算法在任务分配中的性能比较[J]. 电光与控制, 2016, 23(2): 11-15.

[11] EDISON E, SHIMA T. Integrated task assignment and path optimization for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(1): 340-356.



请扫描二维码关注我刊