

基于改进遗传算法的多无人机航路规划方法^{*}

刘超

(中国飞行试验研究院飞行仿真航空科技重点实验室, 西安 710089)

摘要 在分析多无人侦察机任务需求、限制以及特性等要素基础上,建立了多无人机航路规划优化模型。以航程作为性能指标,将多无人侦察机多目标航路规划转化为多旅行商问题。通过对多旅行商问题特点分析,采用遗传算法基本思想,对编码和适应度函数以及操作算子进行合理设计,并改进了交叉和变异操作算子以取得更好优化结果。仿真结果表明所提算法的合理性和有效性。

关键词 多无人侦察机 航路规划 MTSP 问题 改进遗传算法

中图分类号:V218;TJ810

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2019.01.004

引用格式:刘超.基于改进遗传算法的多无人机航路规划方法[J].火力与指挥控制,2019,44(1):18-22.

Method of Path Planning for Multi - UAV Based on Improved Genetic Algorithm

LIU Chao

(Key Laboratory of Flight Simulation, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract A multi-UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) path planning model optimization is established by analyzing the task requirement, restrictions and character. In consideration of journey as the system consumption to evaluate performance, reconnaissance path planning of multi-UAV can be regarded as MTSP (Multiple Traveling Salesmen Problem). Reasonable coding, improved crossover and variation genetic operators were selected combining the feature of MTSP and the basic idea of Genetic Algorithm. The result of simulation demonstrates that the aforementioned method is reasonable and effective.

Key words multi-UAVs reconnaissance path planning MTSP improved genetic algorithm

Citation format LIU C. Method of path planning for multi - UAV based on improved genetic algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(1): 18-22.

0 引言

单无人机在侦查目标数量较多情况下不能很好地完成侦察任务^[1],因此,实战中常需采用多无人机协同行动对某个区域进行完整侦察^[2]。

多无人侦察机协同的航路规划问题与单架无人机规划相比所要面临的问题有很多不同之处,资源优化分配及协调是其中两个需要解决的关键问

题。侦察无人机可以看作是一种“资源”,需要让多架无人机进行空间和时间上的合理分配来实现资源配置的最优化^[3]。

为更好解决多无人机航路规划问题,本文建立了多机协同侦察任务/航路规划数学模型,并将其转化为MTSP问题来求解侦察任务分配及排序问题,并提出改进的遗传算法以获得更好的规划结果。

收稿日期:2017-09-08

修回日期:2018-02-07

^{*} 基金项目:航空科学基金资助项目(20151396013)

作者简介:刘超(1982-),男,江苏邳州人,高级工程师,硕士。研究方向为:飞行力学、飞行仿真。

1 问题分析

1.1 多无人机侦察任务需求

应用场景为单基地情况下的多无人机协同侦察任务/航路规划,该问题的详细描述为:在满足相关约束条件的前提下,采用多架无人机对于不同位置的多个目标进行侦察,相关约束有:

- 1) 从基地出发并完成各自分配的侦察任务后,无人机都应返回基地;
- 2) 须满足关于传感器类型和成像质量的要求^[4];
- 3) 每个侦察目标不能重复进行侦察;
- 4) 满足无人机自身约束,诸如性能约束和时间约束条件等。

以上 4 项约束条件为前提,最后的优化结果要实现:

- a. 侦察目标数量最大化;
- b. 执行任务的总代价最小。

1.2 侦察航路规划问题分析

为了使模型能够反映问题的特点,应对各具体要素进行分析。

1) 侦察图像的质量评价

为了有效地获取情报,需要对目标的侦察图像质量进行衡量。在主观图像质量评价方面,目前国际上采用的是利用 GIQE 方程来对图像的 National Image Interpretation Rating Scales(NIIRS)进行预测。在侦察任务中,每一个目标都有一个最低限度的 NIIRS 值,要求无人机拍摄的图像质量必须大于这个值才能符合侦察任务的最低要求,完成侦察任务。则总的拍摄图像质量 $M(p)$ 可以表示为:

$$M(p) = \sum_{i=1}^n \text{NIIRS}'_i, \text{实际侦察中 } M(p) \text{ 越大越好。}$$

2) 在满足任务要求同时,尽可能减少执行任务无人机的数量

对于任务规划人员而言,总是期望高效地完成侦察任务,以此来达到资源和效益的最大化。目前已有的很多模型并没有考虑到这一问题。

3) 多目标优化问题分析

一般情况下,在进行协同侦察任务规划时,期望的结果是“最优”的结果,即尽可能多的侦察目标、无人机飞行航迹总和尽可能短,安全程度尽可能大等等。

1.3 目标的分配和排序

多无人侦察机进行任务分配则可以看成是对多名旅行商进行规划,等效于在满足约束条件的情

况下,让多个旅行商遍历所有的目的地。因此,可将多无人侦察机航路规划问题转化成 MTSP 问题求解。

2 多无人机航路规划 MTSP 模型

作为较典型的组合优化问题^[5-6],MTSP 是 TSP 问题的扩展。在该问题下,多侦察目标的任务分配和排序可以这样描述:

给定数量为 n 的目标集合,有 m 架无人侦察机从目标 n_1 出发分别访问余下的 $n-1$ 个目标。每一个目标只能有且仅有一架无人机执行侦察任务,并且所有无人机的总航程越小越好。

定义变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{无人机 } k \text{ 从目标 } i \text{ 到目标 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{无人机 } k \text{ 访问目标 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

目标函数为:

$$Z = \min(\sum_{k=1}^m z_k) \quad (1)$$

其中:

$$z_k = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式(2)中 c_{ij} 为无人机从目标 i 到达目标 j 的直线距离。约束条件为:

$$\sum_{k=1}^m y_{ki} = \begin{cases} m & i=0 \\ 1 & i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式(1)表达使 m 架无人机的总航行距离最短;式(2)表达每一架无人机的航行距离大小;式(3)表达所有无人机从指定地点起飞,每个目标仅需访问一次。

3 遗传算法求解多无人机 MTSP

3.1 编码方式

采用符号编码方式,利用 1、2 以及 n 分别代表目标 1、目标 2 以及目标 n ,利用 0 来表示起点和终点。

对所有目标进行标记,其列表集合为 W ;给每个目标分配一个 $1 \cdots n$ 之间的序号,该序号存在于集合 W 中。如两架无人侦察机,有 9 个目标点,其编码为:

0	1	2	3	4	5	0	6	7	8	9	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 1 符号编码及解码

解码为第 1 架无人机飞行路线为从起点经过目标 1、2、3、4、5 后返回起点,第 2 架无人机飞行路

线为从起点经过目标 6、7、8、9 后返回起点。

3.2 适应度函数

用 L 表示生成的各条航迹长度之和,用 M 表示航迹中最长的航迹与最短的航迹长度之差。种群进化既要使得飞行的总长度较小,又要使得各条航迹的长度相似,即 L 和 M 都要越小越好。所以适应度函数为:

$$F = a \cdot L + b \cdot M \quad (4)$$

式(4)中 L 为全部航迹长度之和, M 为最长的航迹与最短的航迹长度之差的绝对值, a 为 L 的权值, b 为 M 的权值。 F 的值越小,个体适应度就越好。

3.3 选择操作

在对每个个体依照其适应度的大小进行评价的基础上采用轮盘赌的方式进行选择操作,其目的在于提高遗传算法的收敛性和计算效率,表达式为:

$$\text{相对适应度} = \text{个体适应度} / \text{总体适应度} \quad (5)$$

3.4 交叉操作

采用置换交叉方式^[7],在两个父体上随机选取个数相同基因序列进行交换,其余位置与交换位置比较,如果有基因相同,则按照距离的大小依次替换为不同的基因,确保目标不被重复访问或遗漏。如图 2 所示,两个父代个体基因因为:

S1	0	1	5	8	2	6	0	3	9	4	7	0
S2	0	3	6	2	5	0	9	7	1	8	4	0

图 2 交叉操作前基因位示意

随机选取交换位置为从位置 5 到位置 8,经过交换后,两个个体分别为:

S1 _n	0	1	5	8	5	0	9	7	9	4	7	0
S2 _n	0	3	6	2	2	6	0	3	1	8	4	0

图 3 交叉操作后基因位示意

其余位置上的基因依次与交换后的基因比较, $S1_n$ 中基因 5、7、9 均重复,根据基因 5 的前一位基因 1,计算基因 2、6、3 中与基因 1 距离最小的基因代替原有基因,如基因段 16 的长度比基因段 12 和 13 都小,则用 6 代替原来的 5,以此类推,完成所有基因的替换。则交叉操作后的子代基因可能为:

S1 _n	0	1	6	8	5	0	9	7	2	4	3	0
S2 _n	0	9	5	7	2	6	0	3	1	8	4	0

图 4 距离最小的基因位代替示意

如果在交叉操作中,出现两个个体的位置段内,一个含有起点 0 而另一个不含有,则不含 0 的

基因段少交换一位,含有 0 的基因段 0 的位置不变,比如原有基因为:

S1	0	1	5	8	2	6	0	3	9	4	7	0
S2	0	3	6	2	5	0	9	7	1	8	4	0

图 5 交叉操作前 0 基因位置示意图

交换位置为 3 到 6。由于 $S1$ 中基因段不含 0,则少交换一位,只交换 5、8、2 三个位置的基因, $S2$ 中 0 的位置不变,则交叉操作后的子代基因可能为:

S1 _n	0	1	6	2	5	8	0	3	9	4	7	0
S2 _n	0	3	5	8	2	0	9	7	1	6	4	0

图 6 交叉操作后 0 基因位置示意图

交叉操作是一种保持进化种群保留优良遗传基因的有效方法。

3.5 变异操作

变异操作指的是一条染色体上的两个基因以一定的概率进行交换并产生新的个体。图 7 是变异操作前染色个体基因示意图。

S1	0	2	4	1	5	8	0	3	9	6	7	0
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 7 变异操作前基因位置示意

S1 _n	0	2	4	1	6	8	0	3	9	5	7	0
-----------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 8 变异操作后基因位置示意

图 8 是位置 5 的基因位与位置 10 的基因位随机交换后的新染色个体。变异操作保持种群多样性的有效方法。

4 遗传算法的改进

采用一种改进的称为三交换^[7]启发交叉方法,其改进主要有两点:

- 1) 将传统两条染色体参与交叉操作改为 3 条;
- 2) 交叉和变异概率不再固定,以降低染色体近亲繁殖的概率,以控制进化过程^[8-9]。

4.1 三交换启发交叉方法的基本思想

通过 3 条染色体进行交叉操作来产生后代,以图 9 列出的 8 个目标为例来说明这一过程,其中 c_{ij} 由表 1 给出,设 3 条父代染色体为:

A	3	2	1	4	8	7	6	5
B	2	4	6	8	1	3	5	7
C	8	7	5	6	4	3	2	1

图 9 三染色体交叉操作示意

$$SUM_1=42, SUM_2=40, SUM_3=46$$

SUM_1, SUM_2, SUM_3 分别为这 3 种方案需要飞行的距离, 随机选出初始目标 $j=1, S_j=3$ 右转动, 使 3 成为 3 父代的第 1 位置。

A	3	2	1	4	8	7	6	5
B	3	5	7	2	4	6	8	1
C	3	2	1	8	7	6	5	4

图 10 父代的第 1 位置示意

由于 $c(3, 2) > c(3, 5)$, 所以有:

A	×	5	2	1	4	8	7	6
B	×	5	7	2	4	6	8	1
C	×	5	6	4	2	1	8	7

图 11 父代位置重排示意

由此规则计算可得 $SUM_0 = 24$

O	3	5	7	6	8	4	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 12 三染色体交叉优化示意

SUM_0 为 3 个父代所产生子代的距离或惩罚费用总和, 显然 SUM_0 远远小于 SUM_1, SUM_2 和 SUM_3 。

表 1 8 个目标间的距离

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	3	1	12	7	5	6	3
2	5	0	7	4	1	8	1	2
3	3	5	0	3	1	6	4	9
4	7	1	9	0	7	8	9	5
5	8	6	6	1	0	13	5	1
6	1	4	7	3	2	0	5	2
7	9	7	8	8	7	1	0	1
8	12	11	3	8	7	1	6	0

4.2 交叉概率变参方法

设 $K=1$, 则 P_c 的表达式为:

$$\text{当 } f' > f \text{ 时 } P_c = K \quad (6)$$

$$\text{当 } f' \leq f \text{ 时 } P_c = K \cdot (f' - f_{fit}) / (f - f_{fit}) \quad (7)$$

式中 $f' = (SUM_1 + SUM_2 + SUM_3) / 3$ 为当前交叉的 3 条父代染色体的平均值, f_{fit} 为当前代中最短的路程值, f 为当前代的平均值, SUM_1, SUM_2, SUM_3 分别为未交叉的 3 个父代的总航程或惩罚费用。

若某子代当中的所有个体的适应度值很接近, 说明结果可能陷入了局部最优, 这时须增大 P_c 来摆脱这种情况。

若当前一代的最优值和其 3 个父代的平均值之差较大时, 说明父代可通过交叉来产生更好的个体。

4.3 变异概率的变参方法

变异概率 P_m 的变参形式表达如下:

$$\text{当 } f' \geq f, P_m = K_2(f_{best} - f') / (f_{best} - f) \quad (8)$$

$$\text{当 } f' < f, P_m = K_4 \quad (9)$$

f_{best} 为当前代中最佳值, f 为当前代的平均值, f' 当要进行变异的父代。

随着 f' 的变化而设置不同的变异概率是为了防止算法陷入局部最优。当 f_{best} 与 f 很接近时, 某代中所有的值可能陷入了局部最优解, 所以通过让 P_m 较大的方法来摆脱可能产生的局部最优解。当 f_{best} 与 f' 相差很远时, 说明 f' 离最优值还相差很大, 所以要增大变异概率。

5 仿真实验

5.1 多侦察目标分配和排序仿真实验

两架无人侦察机的起点和终点均相同, 飞行高度为 12 km, 飞行速度保持不变, 速度为 250 m/s, 飞行最大距离为 70 km, 传感器的成像时间为 6 s, 最大焦距 $f = 1.75$ m。任务规划的环境区域是一个 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 的正方形区域, 地形平坦。区域中共有 20 个待侦察目标, 目标均视为点目标。目标参数如表 2 所示。

表 2 待侦察目标参数表 坐标单位 km

目标	地理坐标	质量要求	目标	地理坐标	质量要求
1	(100,100)	4.0	11	(185,290)	3.9
2	(200,50)	3.5	12	(280,280)	4.9
3	(250,450)	3.5	13	(205,385)	4.3
4	(150,400)	4.0	14	(335,230)	3.6
5	(400,400)	4.0	15	(170,115)	4.6
6	(50,290)	5.1	16	(275,90)	4.9
7	(230,330)	3.5	17	(80,380)	5.0
8	(250,200)	4.5	18	(65,435)	4.7
9	(470,90)	4.8	19	(460,190)	3.6
10	(350,140)	3.7	20	(70,195)	3.2

所有目标分配及侦察顺序结果如下页图 13 所示。

第 1 架无人机的飞行顺序为 起点 - 目标 20 - 目标 6 - 目标 17 - 目标 4 - 目标 13 - 目标 7 - 目标 11 - 目标 1 - 终点。

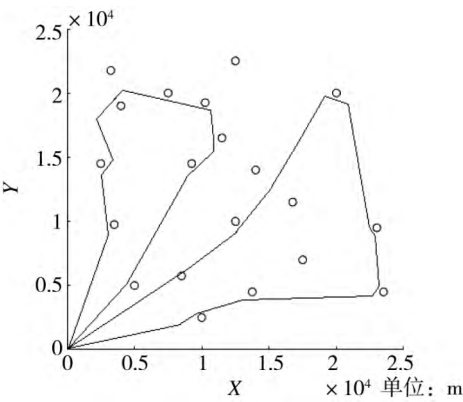


图 13 仿真结果示意图

第 2 架无人机的飞行顺序为：起点 - 目标 2 - 目标 16 - 目标 9 - 目标 19 - 目标 14 - 目标 8 - 目标 15 - 终点。

目标侦察完成情况及拍摄图像质量如表 3 所示。

表 3 目标侦察情况表

目标	是否侦察	拍摄图像质量
1	是	4.86
2	是	4.09
3	否	0
4	是	4.36
5	否	0
6	是	5.25
7	是	3.98
8	是	4.92
9	是	5.03
10	否	0
11	是	4.73
12	否	0
13	是	4.77
14	是	4.02
15	是	4.89
16	是	5.11
17	是	5.13
18	否	0
19	是	4.73
20	是	4.75

5.2 仿真分析

从表 3 可看到，侦察环境中一共存在 20 个待

侦察目标，按照预先任务分配和规划的航路，两架无人机共侦察到 15 个目标，这 15 个目标点的侦察质量均达到要求。数量侦察效率为 75 %，飞行总距离为 105 969.9 m。虽然飞行总距离偏大，但每一架无人机的飞行距离减小了，其中，第 2 架无人机的飞行距离为 55 845.3 m，远远小于低于飞行最大距离限制。

根据图和表的内容可以看出，在多任务复杂环境下，所提方法可以保证多无人机能够按照规划的航迹从起点出发，在侦察了多个目标后返回终点，取得很好的侦察效果。

6 结论

在分析了多无人机执行侦察任务时的要求、限制等要素基础上，建立了多无人机航路规划优化模型，并采用求解 MTSP 问题的方法求解该优化问题，同时通过改进遗传算法的交叉及变异操作算子更进一步完善最终航路的寻优过程，仿真结果表明，该算法在目标分布复杂多变的环境下，可以得到实际侦察需求的分配方案和航路。

参考文献：

[1] ULVKLO M ,KARLHOLM J ,AHLBERG J. A sensor management framework for autonomous UAV surveillance [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering ,2005 ,5787:48-61.

[2] YU Y , ZHANG P ,LIU H ,et al. Optimal switching target-assignment based on the integral performance in cooperative tracking [J]. Science China Information Sciences ,2013 ,56(1):1-14.

[3] 鲍学良，梁伟. 高空长航时无人机编队协同侦察任务规划[J]. 火力与指挥控制，2012，37(7):147-150.

[4] LOOMANS M J H ,KOELEMAN C J ,WITH P H N D. Low-complexity wavelet-based scalable image & video coding for home-use surveillance[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics ,2011 ,57(2):507-515.

[5] 刘明，张培勇. 求解多旅行商问题的新混合遗传算法：以应急物资配送为例 [J]. 系统管理学报，2014，23(2): 247-254.

[6] 易剑，谭树彬，李维刚，等. 连铸组中间包问题的 MTSP 模型及混合优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2012，33(9):1235-1239.

[7] 张俐. 基于小生境遗传算法的 MTSP 问题求解 [J]. 系统工程，2009 27(7):119-121.

[8] 席庆彪，杨述星，张帅，等. 基于 A* 算法的无人机地面目标跟踪[J]. 火力与指挥控制，2017，42(3):25-28.