

# Memetic 算法在无人机侦察航路规划中的应用\*

董文洪, 易波, 栗飞

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

**摘要:**为解决无人机侦察航路规划问题,采用文化基因算法(memetic algorithm, MA)进行求解。以粒子群优化算法作为主搜索策略,采用基于模拟退火的加权法对非劣解进行局部搜索。目标函数综合分析了战术效果、航程、安全性、飞行时间等指标要求,并从环境和无人机自身分析航路规划约束条件。最后对算法性能进行了测试,实验结果表明该文化基因算法比单独使用粒子群优化算法具有更高规划效率,得到的初始侦察航路较优。

**关键词:**粒子群优化;文化基因;无人机;航路规划

**中图分类号:**V249.122.3; V279 **文献标志码:**A

## The Application of Memetic Algorithm in UAV Reconnaissance Route Planning

DONG Wenhong, YI Bo, LI Fei

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to solve the reconnaissance route planning problem of unmanned aerial vehicle, the memetic algorithm was adopted, which was widely investigated recently. The particle swarm optimization was selected as the main planning method while the simulated annealing algorithm was applied in the local search. For the objective function, many factors were analyzed including the tactical purpose, flying range, security and time. Under the constraint conditions, not only the environment, but also the UAV itself was taken into consideration. The simulation results indicate that the memetic algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing is more effective than the single PSO, especially for the convergence speed.

**Keywords:** particle swarm optimization; memetic; unmanned aerial vehicle; route planning

### 0 引言

情报侦察和战场监视是无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)系统的一个主要作战任务。UAV能潜入敌目标上空进行昼夜侦察,并向作战指挥中心准确的传输实时目标图像和信息,利于作战指挥决策,为取得战斗胜利发挥决定性作用<sup>[1]</sup>。航路规划技术对UAV的自主控制、作战效能起着关键性影响。飞行器航路规划是指在特定约束条件下,寻找运动体从初始点到目标点,并且满足某种特定指标最优的飞行轨迹<sup>[2]</sup>。对UAV的航路规划已提出大量经典算法,如动态规划、最优控制、遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)等<sup>[3]</sup>。其中,PSO在收敛速度和搜索能力方面具有较大的优势,被广泛应用于航路规划<sup>[4]</sup>,并且针对航路规划中收敛速度和收敛精度的协调问题,提出

了相应改进的QPSO<sup>[5]</sup>、DPSO<sup>[6]</sup>和基于自适应学习策略的PSO算法<sup>[7]</sup>等。对于无人机侦察飞行参考航路的规划,文中提出了基于PSO的Memetic算法,并研究了算法的实现问题,进行了仿真实验验证。

### 1 基于PSO的Memetic算法

Memetic算法是由Pablo Moscato提出的一种模拟基因文化协同进化过程的算法<sup>[8]</sup>,目前已被广泛的应用于运筹优化、自动规划、机器人等领域。从优化角度看,Memetic算法在求解某些问题特别是大规模组合优化问题时,较传统的进化算法具有更高的搜索性能。文中采用粒子群优化算法作为主搜索策略,用模拟退火的方法进行局部修正。

#### 1.1 基本粒子群(PSO)

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)是由Eberhan博士和Kennedy博士于1995年提出<sup>[9]</sup>

\* 收稿日期:2011-04-17

作者简介:董文洪(1967-),男,山东淄博人,副教授,博士,研究方向:海军作战运筹研究。

的一种基于群体智能 (swarm intelligence) 的进化计算技术, 源于对鸟群觅食、鱼群和人类社会行为的研究。

在 PSO 中, 每个优化问题的可行解都是搜索空间中一只鸟, 称为“粒子”, 粒子只有速度和加速度用于本身状态的调整, 没有质量和体积。每个粒子根据它自身的“经验”和相邻粒子群的最佳“经验”在问题空间中调整“飞行”, 搜索最优解<sup>[5]</sup>。所有的粒子都有一个由被优化的函数决定的适应值 (fitness value), 每个粒子还有一个速度决定它们飞行的方向和距离。PSO 初始化为一群随机粒子, 然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代过程中, 粒子通过跟着两个极值来更新自己, 从而产生新一代的群体, 其中个体极值  $p_{best}$  表示粒子本身所经历过的最好位置, 全局极值  $g_{best}$  表示整个种群目前所经历过的最好位置。

设在一个  $N$  维的目标搜索空间中, 有  $m$  个粒子组成一个群体, 其中粒子  $i$  的位置表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}) (i = 1, 2, \dots, m)$ , 即第  $i$  个粒子在  $N$  维搜索空间的位置是  $X_i$ , 换言之, 每个粒子的位置就是一个潜在的解, 将其代入目标函数就可以得到它的适应值。粒子  $i$  相应的飞行速度表示为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ ; 粒子  $i$  的个体极值表示为  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$ ; 全局极值表示为  $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gN})$ ,  $g$  是最优粒子位置的索引。在寻优过程中, 粒子的速度和位置根据如下公式更新<sup>[2]</sup>:

$$v_{ij}(t+1) = \omega \times v_{ij}(t) + c_1 \times r_1 \times [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 \times r_2 \times [p_{gi}(t) - x_{ij}(t)] \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2)$$

式中:  $\omega$  称为惯性因子, 能随时间动态调整粒子速度, 以更少的平均迭代次数获得更满意的解;  $c_1, c_2$  称为加速因子, 一般为正常数, 使粒子具有自我总结和向群体中优秀个体学习的能力, 从而向自己的历史最优点以及群体内或领域内的历史最优点靠近;  $r_1$  和  $r_2$  为两个均匀分布在  $[0, 1]$  之间的随机数; 速度  $V_i$  的各个分量要限制在给定区间中, 即  $v_{ij} \in [v_{ijmin}, v_{ijmax}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, N$ 。

假设  $f(x)$  表示待优化的目标函数, 个体极值由下式确定:

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t) & (f[x_i(t+1)] \geq f[p_i(t)]) \\ x_i(t+1) & (f[x_i(t+1)] < f[p_i(t)]) \end{cases}$$

则全局极值为:

$$p_g(t) \in \{p_0(t), p_1(t), \dots, p_m(t) \mid f[p_g(t)] = \min\{f[p_0(t)], f[p_1(t)], \dots, f[p_m(t)]\}\}$$

### 1.2 局部搜索策略

模拟退火算法具有质量高、初值鲁棒性强、通用

易实现的优点, 因此采用基于模拟退火的加权法对非劣解进行局部优化, 以增强探索能力<sup>[10]</sup>。设置初始温度为  $T_{initial}$ 、终止温度  $T_f$ 、冷却度  $\alpha$  和最大内循环代数  $K, I = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  为非劣解集。对于每一个粒子  $X_i \in I$  执行:

Step1 随机生成权向量  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ , 且

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \text{ 则适应度函数值 } F(X_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j fit_j(X_i);$$

Step2 令  $T = T_{initial}, J = 0$ ;

Step3 构造  $X_i$  的可行邻域解  $X_{if}$ ;

Step4 如果  $\Delta F = \sum_{j=1}^m \lambda_j (fit_j(X_{if}) - fit_j(X_i)) \leq 0$ , 则  $X_i = X_{if}$  并且用  $X_{if}$  更新  $I$ ; 否则, 如果  $rand(0, 1) < \exp(-\Delta F/T)$ , 则令  $X_i = X_{if}$  并用  $X_{if}$  更新  $I$ ;

Step5 令  $J = J + 1$ , 若  $J < K$ , 则转 Step3; 否则令  $T = \alpha T$ ;

Step6 如果  $T > T_f$ , 令  $J = 0$  并转 Step3; 否则终止循环。

其中, “更新”指如果一个解没有被集合中的任何解 Pareto 超优, 则将该解存入集合并去掉集合中被该解超优的粒子。

### 1.3 Memetic 算法

对于给定优化问题, Memetic 算法的基本思路是先确定一定数量的初始个体, 这些个体的状态可以是随机的, 也可根据某个启发式机制来确定; 然后对每个个体进行局部搜索, 以提高个体适应度, 使种群达到一定的预备状态后, 就可以进行个体与个体之间的相互操作, 局部搜索、竞争、协作操作循环进行, 直至满足终止条件。Memetic 算法的伪代码如下:

```

begin
    t := zero();
    p(t) := initialPop();
    p(t) := localSearch(P(t));
    evaluateFitnessFunction(P(t));
    while (stopping criteria not met) do
        p'(t) := selectForVariation(P(t));
        p'(t) := recombine(p'(t));
        p'(t) := mutate(p'(t));
        p'(t) := localSearch(p'(t));
        evaluateFitnessFunction(p'(t));
        p(t+1) := chooseNewPop(p(t), p'(t));
        t = addFunction(t);
    end
end Begin
    
```

## 2 基于 Memetic 算法的航路规划

### 2.1 基本航路优化指标

航路规划的指标函数可能是非凸、非线性、不可微甚至不连续的,而且航路所对应的变量也可能是连续变量或离散变量,约束条件复杂,所以它是一个多目标、多层次、多约束的复杂全局优化问题。但其实质上是优化问题,其数学描述由航路优化指标和航路约束条件两部分组成,它的一般形式可以写为:

$$\min J = f(r) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} c_i(r) = 0 & (i = 1, 2, \dots, m') \\ c_i(r) \geq 0 & (i = m' + 1, m' + 2, \dots, m) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $r = r(t) (t \in R^+)$  表示航路,它是空间中一条以时间  $t$  为变量的三维连续曲线; $J$  称为航路规划的优化指标函数;约束条件包含等式约束和不等式约束。

一般的,航路规划的综合评价指标形式为:

$$J = \omega_T \cdot J_T + \omega_s \cdot J_s + \omega_d \cdot J_d + \omega_t \cdot j_t \quad (5)$$

式中: $J_T$  表示战术效果指标; $J_s$  表示航程指标; $J_d$  表示安全性指标; $J_t$  表示飞行时间指标; $\omega_T, \omega_s, \omega_d$  和  $\omega_t$  分别表示各个具体指标在综合指标中所占的权重<sup>[2]</sup>。

### 2.2 航路约束条件

无人机航路规划受到的约束条件很多,主要包括飞行环境约束和无人机自身性能约束两类。飞行环境对航路规划的空间进行限制,而无人机自身的性能则决定无人机机动动作能否顺利完成。通常考虑的约束条件有:

#### 1) 地形与威胁约束

$$(Q_T \cup Q_F) \cap Q_R = \emptyset \quad (6)$$

式中: $\emptyset$  为空集; $Q_T$  为所有可能对飞行构成遮挡的地形区域集合; $Q_F$  为所有火力威胁区和指定禁飞区的集合; $Q_R$  为飞行管道区<sup>[2]</sup>。

#### 2) 最小飞行距离和最大航程约束

$$L_i < L', \sum_i L_i \leq L_{\max} \quad (7)$$

式中: $L_i$  表示第  $i$  段航路长度, $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $L'$  表示无人机最小飞行步长; $L_{\max}$  表示最大航程值。

#### 3) 最小转弯半径约束

$$\begin{cases} |K_A K_B| \geq 2r_{\min} \cdot \sin\theta (\text{过点转弯}) \\ |K_A K_B| \geq r_{\min} \cdot \tan \frac{\theta}{2} (\text{不过点转弯}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $|K_A K_B|$  是两个航路关键点之间的距离,一般由 Bowring 公式求得; $\theta$  是转弯角度; $r_{\min}$  是最小转弯半径。

#### 4) 飞行高度约束

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \quad (9)$$

式中: $h_i$  表示第  $i$  段飞行高度, $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $h_{\min}, h_{\max}$  分别表示最小和最大飞行高度。

此外,针对具体的作战实际还有航路点数目约束、爬升性能约束以及特殊航路段约束等,甚至需考虑电子干扰和恶劣气候约束。

### 2.3 算法步骤描述

文献[10]中将无约束多目标优化转化成单目标约束优化,以解的质量度量看作约束条件,均匀性度量作为目标函数进行求解。参照其求解过程,则基于 PSO 的 Memetic 算法步骤为:

Step1 初始化种群空间,给定种群规模  $m$ ,在定义范围内随机初始粒子的速度与位置,产生初始群体  $pop(t), t = 0$ ,将初始群体的 Pareto 最优解存入外部存储器  $I$  中;

Step2 将粒子的  $p_i(t)$  设置为当前位置;

Step3 对集合  $I$  中的每一个粒子执行 1.2 章节的局部搜索算子并用新产生的粒子更新集合  $I$ ;

Step4 判断算法的停止准则是否满足,若满足转向 Step11,否则转向 Step5;

Step5 选取合适  $p_g(t)$ ,对  $pop(t)$  中的所有粒子,按照式(1)和式(2)更新粒子的速度与位置得到进化后群体  $pop(t+1)$ ;

Step6 使得  $pop(t+1)$  中所有微粒的位置都在定义范围内,令  $t = t + 1$ ;

Step7 用  $pop(t)$  更新外部存储器  $I$ ;

Step8 对  $I$  中的每一粒子执行 1.2 章节的局部搜索算子并用新粒子更新  $I$ ;

Step9 对  $pop(t)$  中所有粒子,按照粒子比较准则更新每个粒子的个体极值;

Step10 判断算法的停止准则是否满足,若满足转向 Step11,否则转向 Step5;

Step11 输出外部集合  $I$  中所有粒子作为问题的 Pareto 最优解,算法停止。

## 3 实例验证

文中以无人机侦察的初始航路规划问题进行实例验证。在如图 1 所示的任务区域内分布着 40 个目标点,要求无人机在最大航程参数的约束下,对该区域进行侦察飞行,尽可能多的侦察到目标点,最后返回起飞点(60,30)。在此初始航路规划算例中,仅从二维平面内进行分析。若单独采用 PSO 算法,参数设置为: $\omega = 0.5, c_1 = c_2 = 2, K = 100$ ,所得初始航路如图 2 所示,规划时间为 0.394253s;采用 Memetic 算法所

规划初始航路如图 3 所示,规划时间为 0.274593s。

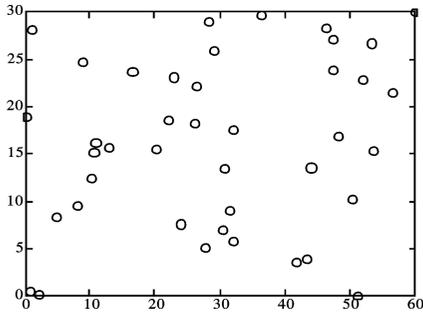


图 1 待侦察点分布情况

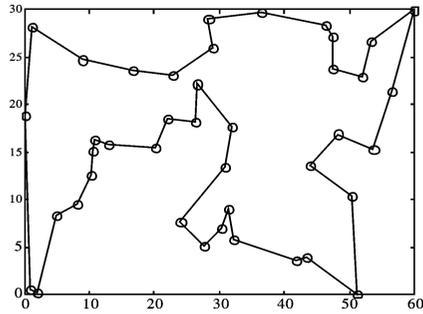


图 2 PSO 下的初始侦察航路

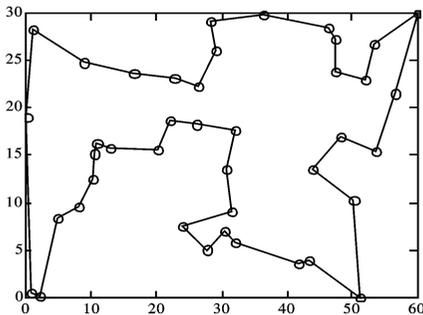


图 3 Memetic 下的初始侦察航路

### 4 结论

从实例验证可以看出与单独的粒子群优化算法相比,基于粒子群优化的 Memetic 算法能在一定程度上提高路径寻优的效率。将 Memetic 用于无人机侦

察初始航路规划,显示出了一定的优越性,针对航路规划多目标、多层次、多约束的特点,如何进一步修改局部搜索策略,配合作战指挥的实际运用上还有很大的研究空间。

#### 参考文献:

[1] 田菁. 多无人机协同侦察任务规划问题建模与优化技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.

[2] 谢晓方,孙涛,欧阳中辉. 反舰导弹航路规划技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

[3] 柳长安. 无人机航路规划方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2003.

[4] 赵先章,常红星,曾隽芳,等. 一种基于粒子群算法的移动机器人路径规划方法[J]. 计算机应用研究,2007,24(3):181-186.

[5] 单敏瑜,刘以安,倪天权. QPSO 在无人机侦察航路规划中的应用研究[J]. 计算机工程与设计,2009,30(20):4690-4773.

[6] 杨遵,雷虎民. 一种多无人机协同侦察航路规划算法仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(2):433-436.

[7] 唐上钦,黄长强,胡杰,等. 基于威胁等效和改进 PSO 算法的UCAV 实时航路规划方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(8):1706-1710.

[8] P Moscato. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms [C]// Tech. Rep. Caltech Concurrent Computation Program, 1989:1-67.

[9] Kenned Y J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]// Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, New Jersey: IEEE Service Center, 1995:1942-1948.

[10] 魏静莹. 解决单目标和多目标优化问题的进化算法 [D]. 西安:西安电子科技大学,2009.