# 基于正态云自适应遗传算法的无人机航路规划*

成晓东，周德云，何 鹏，张 堃
（西北工业大学 电子信息学院，西安 710129）

**摘 要**：为了克服标准遗传算法在无人机航路规划中存在的搜索速度慢、容易陷入局部最优等缺点，应用一种基于正态云改进的自适应遗传算法。建立无人机航路规划模型，将地理直角坐标系旋转，引入转弯角度约束，简化遗传编码的复杂度。改进算法由 X 条件云发生器产生种群的交叉概率和变异概率组成。正态云滴的稳定倾向性保护较优个体从而对全局最优值进行自适应定位，随机性保持个体多样性从而避免搜索陷入局部极值。仿真结果表明，该算法能使无人机在战场环境中快速地选择最优航路，规划的效率和成功率相对于标准遗传算法有明显提高，具有良好的应用前景。

**关键词**：无人机；正态云模型；遗传算法；航路规划；自适应
**中图分类号**：V249 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2012)12-4469-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.12.016

# Application of normal cloud based adaptive genetic algorithm in UAV path planning

CHENG Xiao-dong, ZHOU De-yun, HE Peng, ZHANG Kun
(*College of Electronics & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710129, *China*)

**Abstract**: Sequential genetic algorithm (SGA) easily gets stuck at a local optimum and has a slow convergent speed. To overcome its shortage, this paper presented NCAGA for UAV path planning. It applied a novel method of encoding based on rectangular plane coordinate system, which simplified the complexity of encoding and achieved a higher planning speed. The improved genetic algorithm combined with the normal X-condition cloud generator to adjust the probability of crossover and mutation adaptively. The stable tendency of normal cloud contributed a higher convergence speed and character of randomness conduced to a lower possibility of premature. Simulation results demonstrate that NCAGA is able to plan path quickly that made UAV avoid the dangerous areas with a higher effectiveness and success rate, so that it has a wide application prospect.

**Key words**: unmanned aerial vehicle(UAV); normal cloud model; genetic algorithm; path planning; adaptation

无人机航路规划的任务是在特定的地形和威胁约束条件下，寻找无人机从起始点到目标点，满足指定性能指标的最优飞行航迹[1,2]。其本质上是一个多约束多目标的优化问题，解决算法有很多，如神经网络、启发式搜索、概率搜索等[3]，其中以遗传算法(genetic algorithm, GA)为代表的概率搜索应用得最为广泛。标准遗传算法(sequential genetic algorithm, SGA)采用固定的交叉率和变异率，存在局部收敛与收敛速度慢的不足[4]，难以适应无人机航路规划的要求。

Srinvias 等人[5]在 1994 年提出的自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)在收敛速度上较标准遗传算法有了显著改善，但是在算法后期更容易陷入局部最优。文献[6,7]提出了改进的 AGA，采用一些非线性函数形式(如 sigmoid 函数)，使交叉变异概率自适应于适应度或进化代数。但是交叉变异概率由单一的曲线形式所确定，而忽视了进化的随机性，克服早熟的能力仍然不足。云模型(cloud model)是用语言值表示的定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型，同时具有随机性和模糊性[8,9]。正态云模型是最常用的一种云模型，它把精确确定隶属函数放宽到构造正态隶属度分布的期望，更具普适性[10]。本文将正态云与标准遗传算法相结合，引入一种正态云自适应遗传算法(normal cloud based adaptive genetic algorithm, NCAGA)，其交叉和变异概率由 X 条件云发生器生成，不仅具有自适应性，且云滴随机性的特点保持了算法后期个体的多样性，具有抗早熟能力。

## 1 无人机航路规划模型

在直角坐标系下建立无人机的航路模型。假设：a)无人机飞行近似质点运动；b)敌方雷达的可威胁区近似为一个半径为 $r$ 的圆，当无人机落入威胁圆内时被拦截概率为 1。图 1 中，$O$ 为无人机起始位置，$D$ 为目标位置。将地理直角坐标系 $OXeYe$ 绕 $O$ 点逆时针旋转 $\theta$ 角得到模型使用的坐标系 $OXY$，其 $X$ 轴通过 $OD$ 连线。在此坐标系下用等距栅格线将平面 $N$ 等分(图 1)。每一条栅格线上确定一个 $Y$ 坐标值，构成航路点序列 $(y_1, y_2, \cdots, y_{N-1})$，表示整个飞行航路。实验中，$N$ 在能够保证规划精度的前提下尽可能地小，以保证规划速度。

**收稿日期**：2012-04-23；**修回日期**：2012-05-30 **基金项目**：航空科学基金资助项目(20115553021)；西北工业大学基础研究资助项目(JC20110222)

**作者简介**：成晓东(1989-)，男，安徽合肥人，硕士，主要研究方向为目标跟踪、航路规划(stcxd@mail.nwpu.edu.cn)；周德云(1964-)，男，浙江义乌人，教授，博士，主要研究方向为航空火力控制、航电系统仿真和先进控制理论；何鹏(1985-)，男，江西抚州人，博士，主要研究方向为态势评估与智能决策；张堃(1982-)，男，陕西西安人，博士，主要研究方向为智能控制与智能决策.

目标函数 $F$ 表示为

$$F=\lambda\cdot P+(1-\lambda)\cdot T \tag{1}$$

其中：$P$ 为航程代价；$T$ 为威胁代价；$\lambda$ 为 $P$ 的权值。

$$P=\frac{1}{P_s}\sum_{i=1}^{N}\sqrt{d^2+(y_i-y_{i-1})^2} \tag{2}$$

其中：$x_0=0$，$P_s$ 为起始点与目标点的距离，$d$ 为栅格线之间的距离。当航路点在威胁圆外时，每一航段取 $K$ 个采样点，用采样点处的被拦截概率表征其邻域某一段的被拦截概率[11]。航路威胁代价表示为

$$\begin{cases} T=\dfrac{1}{P}\prod_{i=1}^{N}[1-\sum_{j=1}^{K}\dfrac{l_i}{K}\times f_n(x,y)] \\ f_n(x,y)=1-\prod_{i=1}^{M}\{1-\exp[\dfrac{(x-x_{Ri})^2+(y-y_{Ri})^2}{-r_i^2}]\} \end{cases} \tag{3}$$

其中：$l_i$ 为第 $i$ 段航路的长度；$M$ 为雷达个数；$(x_{Ri},y_{Ri})$ 为第 $i$ 个雷达的坐标；$r_i$ 为第 $i$ 个雷达的探测半径。

可行航路是若干航段衔接而成的，无人机不能实现急转弯，需要考虑转弯角度约束[12]。在 $OXY$ 坐标系下，转弯角度约束转换为对 $(y_1,y_2,\cdots,y_{N-1})$ 的约束，如图 2 所示。

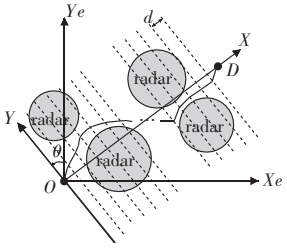



图 1 航路规划模型示意图

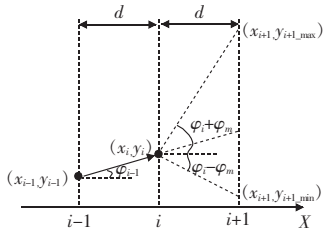



图 2 转弯角度约束

设无人机下一个待飞航路点在第 $i+1$ 条栅格线上，当前坐标 $(x_i,y_i)$，约束转角角度 $\varphi_m$，则无人机在第 $i+1$ 条栅格线上的 $Y$ 坐标满足

$$y_{i+1_min}\leqslant y_{i+1}\leqslant y_{i+1_max} \tag{4}$$

其中：

$$\begin{cases} y_{i+1_min}=d\cdot\tan[\arctan(\dfrac{y_i-y_{i-1}}{d})-\varphi_m] \\ y_{i+1_max}=d\cdot\tan[\arctan(\dfrac{y_i-y_{i-1}}{d})+\varphi_m] \end{cases} \tag{5}$$

$OXY$ 坐标系下的航路点通过式(6)转换到地理坐标系中。

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中：$(x_e,y_e)$、$(x,y)$ 分别是坐标系 $OXeYe$ 和坐标系 $OXY$ 下的航路点。

## 2 正态云自适应遗传算法

### 2.1 正态云模型及其算法

正态云模型是一个遵循正态分布规律的具有稳定倾向的随机数集，由期望 $Ex$、熵 $En$、超熵 $He$ 来表征。一维正态云算子是一个把定性概念的整体特征变换为定量表示的映射 $\pi:C\rightarrow\Pi$，满足以下条件[13]：

a) $\Theta=\{t_i\mid \text{normrnd}(En,He)$ 的一次实现，$i=1,2,\cdots,N\}$；

b) $X=\{x_i\mid x_i$ 为 $\text{normrnd}(En,t_i)$ 的一次实现，$t_i\in\Theta$，$i=1,2,\cdots,N\}$；

c) $\Pi=\{(x_i,y_i)\mid x_i\in X,t_i\in\Theta,y_i=\exp[-\frac{1}{2}(\frac{x_i-Ex}{t_i})^2]$ 的一次实现，$i=1,2,\cdots,N\}$。

normrnd($En$,$He$) 是期望为 $En$ 方差为 $He$ 的正态随机变量，$N$ 为云滴的个数。利用正态云算子，就可以把定性概念 $C$($Ex$,$En$,$He$) 变换为数值表示的云滴集合，实现概念空间到数值空间的转换。本文使用 X 条件正向云发生器，并对云滴输出作线性处理，使之满足遗传算法中交叉和变异率自适应的要求，发生器的结构如图 3 所示。

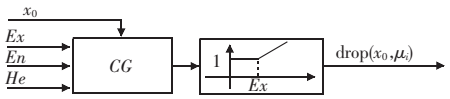



图 3 修改的 X 条件云发生器结构

X 条件云发生器的算法如下：

```
INPUT:Ex,En,He,n,x0
for i=1 to n
  En'←normrnd(En,He)
  μi←exp[-1/2*((x0-Ex)/En')^2]
  if En'≤Ex
    μi←1
  else
    drop(x0,μi)
end
OUTPUT:(x0,μ1),(x0,μ2),…,(x0,μn)
```

### 2.2 改进遗传算法在航路规划中的应用

AGA 对 SGA 的改进体现为：当个体适应度越高，其交叉和变异概率取值越小以保护优秀基因；若个体适应度越低，其交叉和变异概率取值越大以尽可能产生优秀基因[14]。NCAGA 中的交叉和变异概率由 X 条件云产生，云滴的稳定倾向性使之具有 AGA 自适应的特点，而云滴的随机性使之与 AGA 不同，在相对适应度趋近于 1 时，变异和交叉概率也可能取较大值，而非一定极小，从而提高抗早熟的能力[15]。NCAGA 在计算交叉概率 $P_c$ 时，将下列条件输入与发生器：

$$\begin{cases} Ex=f_{avr} \\ En=(f_{max}-f_{avr})/c_1 \\ He=En/c_2 \\ x_0=f_r-f_{avr} \end{cases} \tag{7}$$

其中：$f_{avr}$ 为种群平均适应度；$f_{max}$ 为最大适应度；$f_r$ 为交叉的两个个体适应度的较大值；$c_1$、$c_2$ 为控制参数。以此条件生成一个云滴 $(x_0,\mu_c)$，则这两个个体的交叉概率为 $P_c=\mu_c$。

变异概率 $P_m$ 的计算条件为

$$\begin{cases} Ex=0 \\ En=(f_{max}-f)/c_3 \\ He=En/c_4 \\ x_0=f \end{cases} \tag{8}$$

其中：$f$ 为变异个体的适应度；$f_{max}$ 为最大适应度；$c_3$、$c_4$ 为控制参数。以此条件生成一个云滴 $(x_0,\mu_m)$，则该个体的变异概率 $P_m=\mu_m$。NCAGA 中 $P_c$、$P_m$ 随相对适应度的变化如图 4 所示。

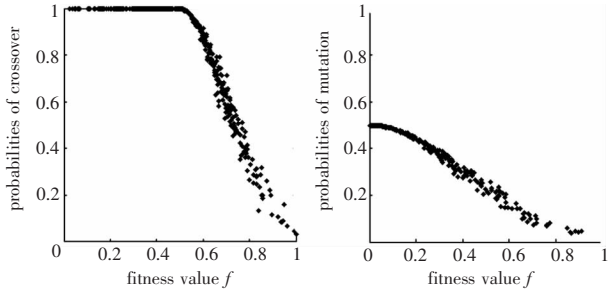



图 4 $P_c$ 和 $P_m$ 随适应度的变化

算法采用实数编码,每位代表一条栅格线上的 $Y$ 坐标值,编码长度根据精度要求选取。算法流程如图 5 所示。依次执行比例选择、交叉操作、变异操作。交叉概率和变异概率由 X 条件云发生器产生。

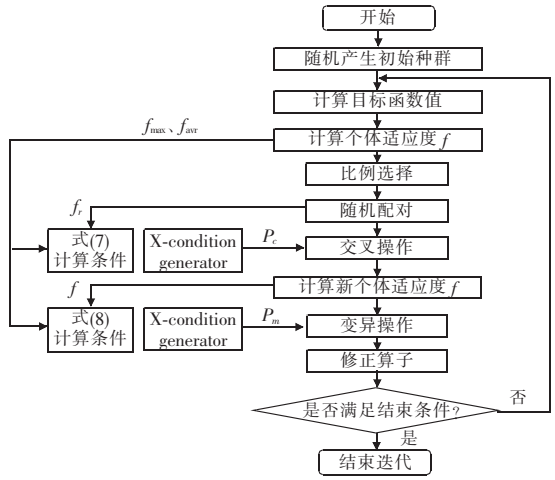


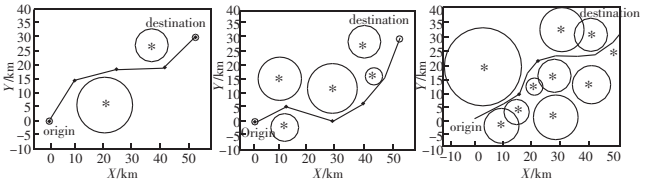

图 5　NCAGA 的流程

## 3　仿真分析

在 Pentium(1.99 GHz)的 PC 机上进行仿真实验,运行环境为 Windows XP。设无人机起始点为(0,0),目标点距离起始点 60 km,目标线与地理系 $X$ 轴夹角 30°,转弯角度约束为$\varphi_m$ = 80°。

### 3.1　算法的有效性验证

设置不同的权重 $\lambda$ 值和战场雷达数目,采用 NCAGA 进行航路规划,每一种情况独立实验 15 次,其结果如图 6 和表 1 所示。




(a) Weight:0.3 and nubmer of radars:2　(b) Weight:0.5 and nubmer of radars:5　(c) Weight:0.8 and nubmer of radars:10

图 6　不同权重和环境下的结果

表 1　使用 NCAGA 进行航路规划的结果

| No. | weight | radars | path points | average time/s | failure times |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.3 | 2 | 3 | 6.4 | 0 |
| 2 | 0.5 | 5 | 4 | 11.2 | 0 |
| 3 | 0.8 | 10 | 9 | 28.5 | 1 |

在实际中,可根据战场的雷达数量、分布和任务的安全需求选择适当的权值和航路点数目。由图 6 可知,NCAGA 能在不同权重值和战场环境下规划出最优航路,规划结果具有合理性。表 1 中的数据显示 NCAGA 的规划速度基本在 30 s 以内,且失败次数少。NCAGA 能有效地应用到无人机的路径规划问题中,具有良好的适应性。

### 3.2　NCAGA、SGA 和 AGA 的性能比较

为了比较 NCAGA、SGA 和 AGA 在解决无人机航路规划问题上的性能差别,每一种算法对相同的规划模型进行解算,种群大小为 300,迭代 500 次终止。记录 30 次独立实验的结果(平均收敛代数、平均收敛时间、失败次数、最大适应度),如表 2 所示。

表 2　三种算法的性能比较

| algorithm | average generations | average time/s | failure times | maximum fitness |
|---|---|---|---|---|
| SGA | 256.4 | 62.3 | 8 | 0.948 |
| AGA | 127.1 | 33.9 | 7 | 0.962 |
| NCAGA | 121.8 | 25.5 | 2 | 0.965 |

三种算法的最大适应度随遗传代数的变化情况如图 7 所示。

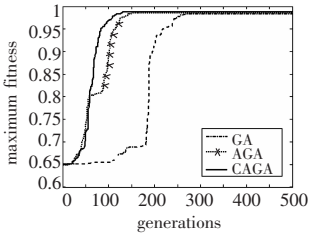



图 7　三种算法最大适应度的比较

NCAGA 继承了 AGA 的特点,具有自适应的特点,收敛速度明显高于 SGA。而正态云滴的随机性又使 NCAGA 避免陷入局部极值的能力有所提高,早熟次数明显少于 SGA 和 AGA。

## 4　结束语

本文对无人机航路规划问题进行了研究,在直角坐标系下建立了一种新的航路规划模型,遗传编码的长度和复杂度降低,保证了规划的快速性。引入一种改进的遗传算法 NCAGA,算法利用了正态云滴定向性和随机性的特点,收敛速度和抗早熟能力均优于 SGA 和 AGA。本文将 NCAGA 应用到无人机的路径规划问题中,仿真结果表明,NCAGA 的规划速度更快,成功率更高,具有良好的应用前景。

**参考文献:**

[1] FRIETSCH N, ASCHER C, TROMMER G F. Adaptive path planning for VTOL-UAVs [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2010, 24(7): 36-41.

[2] 陈海,王新民,焦裕松,等. 一种凸多边形区域的无人机覆盖航迹规划算法[J]. 航空学报, 2010, 31(9): 1802-1807.

[3] 叶文,范洪达,朱爱红. 无人飞行器任务规划[M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 6-209.

[4] GOLDBERG D E. 一种改进的双链量子遗传算法及其应用[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2090-2092.

[5] SRINVIAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.

[6] 金晶,苏勇. 一种改进的自适应遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(18): 64-69.

[7] DAI Xiao-ming. Allele gene based adaptive genetic algorithm to the code design[J]. IEEE Trans on Communications, 2011, 59(5): 1253-1258.

[8] 陈贵林. 一种定性定量信息转换的不确定模型——云模型[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2006-2009.

[9] 叶琼,李绍稳,张友华,等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 4198-4201.

[10] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.

[11] KIM Z, HEDRICK J. Autonomous UAV path planning and estimation [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16(2): 35-42.

[12] WANG Ling-xiao, ZHOU De-yun. Effective path planning method for low detectable aircraft [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(4): 784-789.

[13] 周勇,顾聪越,程春田. 基于云模型的可信性评估模型[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(2): 587-600.

[14] LEE K, EL-SHARKAWI M. Fundamentals of genetic algorithms[M]. Mississauga: Wiley-IEEE Press, 2008.

[15] 戴朝华,朱云芳,陈维荣. 云自适应遗传算法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 646-649.