

## 基于物理规划的无人机多目标航迹规划

于成龙, 刘莉, 王祝, 黄波, 龙腾

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

**摘要:** 无人机航迹规划是典型的多目标优化问题, 传统的线性加权和法需反复迭代以确定一组满足工程特性需求的目标权重系数。物理规划方法通过构造偏好函数直接反映规划人员对航迹规划各目标的特性需求, 避免了因为反复迭代确定各目标权重系数所导致计算量大的缺陷, 因此, 将物理规划方法与粒子群优化算法相结合用于无人机多目标航迹规划。仿真实验验证了该航迹规划方法能够获得各目标偏好结构下的折中解。

**关键词:** 航迹规划; 多目标; 物理规划; 偏好函数; 无人机

**中图分类号:** V249      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)05-0001-05

## Multi-Objective Route Planning Based on Physical Programming

YU Cheng-long, LIU Li, WANG Zhu, HUANG Bo, LONG Teng

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Route planning is a typical multi-objective optimization problem. Traditional linear weighted sum method needs repeated iteration to get a set of the objective weight coefficients for satisfying the requirement of engineering characters. Physical programming can reflect the requirement of the route planning objectives intuitively by constructing preference functions, avoiding computation burden caused by repeated iteration to acquire the weight coefficients of all objectives. Therefore, physical programming was used together with particle swarm optimization for multi-objective route planning of unmanned aerial vehicle (UAV). Simulation results show that the proposed method is able to acquire a compromise solution under the special preference structure of the route planning objectives.

**Key words:** route planning; multi-objective; physical programming; preference function; UAV

### 0 引言

无人机航迹规划是在综合考虑无人机飞行环境、自身性能、油耗、威胁等因素的情况下, 为无人机规划出满足约束的从起始点到目标点的最优飞行航迹, 是典型的多目标设计优化问题。线性加权和法是常用的无人机多目标航迹规划方法<sup>[1-2]</sup>, 但该方法确定一组满意的权值十分困难, 需要反复迭代, 计算量大。也有研究者将基于 Pareto 解的多目标优化方法用于无人机多目标航

迹规划<sup>[3-4]</sup>, 但同样存在计算工作量庞大的问题。

物理规划 (Physical Programming)<sup>[5]</sup> 于 1995 年由美国 Messac 教授提出, 是一种新的处理多目标优化设计问题的方法。该方法基于设计者的工程经验, 以较低的计算代价获得设计者偏好的多目标优化问题的折衷解。具有以下优点: 1) 与基于权重的方法相比避免了对权重值的反复迭代; 2) 与基于 Pareto 解的多目标优化方法相比, 可以用相对较少的计算量获得反映规划者偏好的折衷解。

本文基于物理规划方法, 考虑航程、高度、转弯角、威胁 4 个方面, 采用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 方法进行无人机多目标航迹规划, 仿真实验结果验证了该方法能够反映设计者的偏好, 可获得符合实际需要的满意结果。

收稿日期: 2013-06-18

修回日期: 2014-01-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51105040); 航空科学基金 (2011Z A72003)

作者简介: 于成龙 (1986—), 男, 北京人, 硕士生, 研究方向为飞行器总体设计。

# 1 物理规划方法

## 1.1 设计思路

物理规划方法是一种基于偏好设计思想解决多目标优化问题的方法,其基本思路是:根据实际工程经验引入反映设计者偏好程度的偏好函数,将不同物理意义的各设计目标转换为具有相同数量级的无量纲的满意度目标,通过求各偏好函数均值的常用对数,将各个设计目标的偏好函数综合起来得到综合偏好函数,作为物理规划的优化目标函数,然后采用适当的优化方法求解<sup>[6-8]</sup>。

## 1.2 偏好函数

偏好函数是设计指标的函数<sup>[6]</sup>,设计指标包括工程优化设计中的设计目标、约束条件和设计变量等。偏好函数用于将设计指标映射到正实数空间,其取值越小表示设计者对设计指标的取值越满意<sup>[5]</sup>。物理规划的偏好分为 4 种类型:设计指标越小越好、设计指标越大越好、设计指标趋于某值最好和设计指标在某值范围最好。每个偏好类型由软型和硬型两种情况组成。软型指标指在可行域内偏好函数取值随设计指标变化,对设计指标的不同取值有不同的偏好程度;硬型指标指在可行域内偏好函数均取最小值,只要设计指标可行即可。如图 1 所示,图中横坐标为设计目标  $G_{fi}$ ,纵坐标为偏好函数  $P_{fi}$ ,软型指标为 Class1-4S,硬型指标为 Class1-4H。

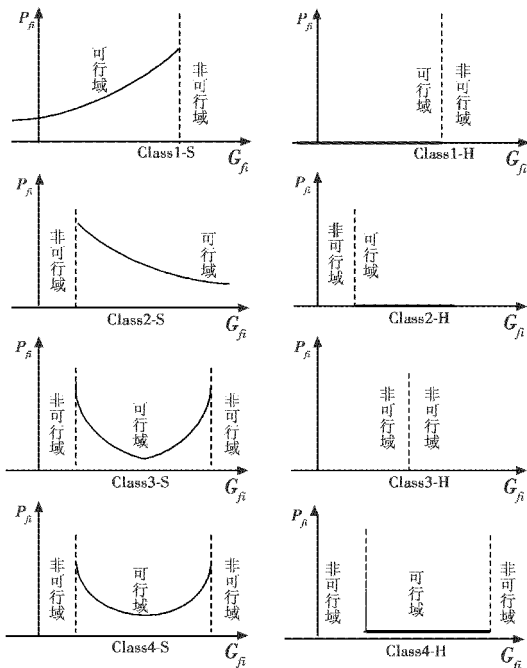


图 1 偏好类型的划分

Fig. 1 The partitioning of preference styles

鉴于偏好函数自身的特性,一般通过分段函数来

表达,如图 2 所示。

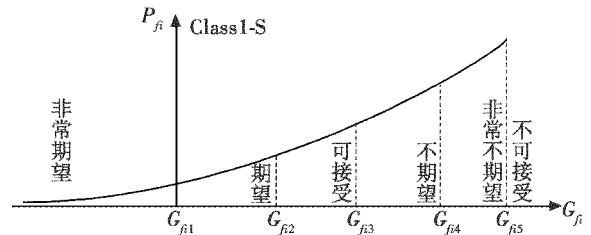


图 2 Class1-S 型偏好函数区间划分

Fig. 2 The interval partitioning of Class1-S style preference function

设  $G_{fi} \leq G_{fi1}$  为区间 1 (记为  $m = 1$ ),对区间 2,3,4,5 ( $m = 2,3,4,5$ ) 顺次标记。在区间 1 内可用式(1)所示的衰变指数函数表达;在区间 2~5,可构建式(2)所示的分段样条函数进行逼近,并由区间左右端点函数值和斜率构造。

$$P_{fi} = G_{fi1} \cdot \exp \left[ \left( \frac{k_{i1}}{P_{fi1}} \right) \left( \frac{G_{fi}}{G_{fi1}} \right) \right] \quad (1)$$

$$P_{fim} = \lambda_{im}^4 \left[ \frac{a}{12} \lambda_{im}^4 + \frac{b}{12} (\xi_{im} - 1)^4 \right] + c \lambda_{im} \xi_{im} + d \quad (2)$$

式中:

$$\xi_{im} = \frac{G_{fi} - G_{fi(m-1)}}{G_{fi(m)} - G_{fi(m-1)}}; \quad (3)$$

$$\lambda_{im} = G_{fi(m)} - G_{fi(m-1)} \circ \quad (4)$$

由区间端点的偏好函数值  $P_{fi(m-1)}$ 、 $P_{fi(m)}$  及其斜率  $k_{i(m-1)}$ 、 $k_{i(m)}$ ,可以求出  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的表达式。

## 1.3 目标优化模型

综合各个设计目标的偏好函数,得到设计问题的综合偏好函数作为物理规划优化模型的目标函数  $P_{of}$ ,优化模型为

$$\min P_{of} = \lg \left[ \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} P_{fi}(G_{fi}(x)) \right] \quad (5)$$

$$\text{s. t. } b_m(x) \leq 0, x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

式中: $x$  为优化设计问题的设计变量; $b_m(x)$  为约束条件。

## 2 粒子群优化算法

粒子群优化 (PSO) 算法由 Eberhart 和 Kennedy 提出,是一种基于群体智能的进化计算方法,它的基本思想源于对鸟群觅食和寻找鸟巢行为的研究<sup>[9]</sup>。在 PSO 算法中,每个优化问题的备选解都可以假设为  $n$  维搜索空间中的一个点,称为“粒子”,其在空间中的位置为  $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ ,所有粒子在每个位置都对应适应值,每个粒子在空间中搜索的方向和距离由速度  $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]$  决定。所有粒子根据自身搜索过的适应值最优的空间位置  $P_{Best_i} = [p_{Best_{i1}}, p_{Best_{i2}}, \dots, p_{Best_{in}}]$  和粒子群搜索过的适应值最优的空间位置  $G_{Best} =$

$[g_{Best_1}, g_{Best_2}, \dots, g_{Best_n}]$ 在设计空间中搜索最优解。PSO中每个粒子的位置和速度的更新公式分别如式(6)和式(7)所示。

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \quad (6)$$

$$v_{ij}^{(t+1)} = wv_{ij}^{(t)} + c_1r_{1j}^{(t)}(p_{Best_{ij}}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) + c_2r_{2j}^{(t)}(g_{Best_{ij}}^{(t)} - x_{ij}^{(t)}) \quad (7)$$

基于 PSO 算法航迹规划的流程如图 3 所示。

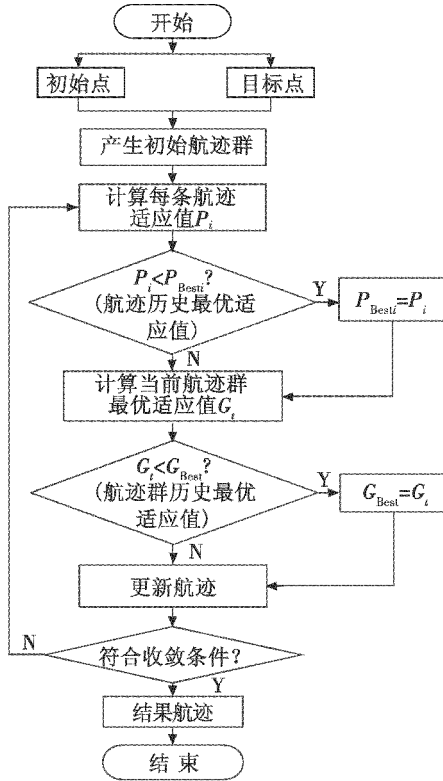


图3 基于 PSO 算法航迹规划流程图

Fig.3 The flow chart of route planning based on PSO

### 3 基于物理规划的无人机航迹规划

#### 3.1 优化目标

无人机航迹规划是典型的多目标优化问题,规划出的航迹需要在满足无人机自身性能因素(如油耗、转弯角度等)下保证无人机安全执行飞行任务。无人机在飞行过程中主要遭遇到的威胁有探测威胁和火力威胁。探测威胁主要指探测雷达,可以通过地形跟踪飞行的方式避开雷达探测,但低空飞行增加了无人机撞地危险,过多的转弯和俯冲也增加了执行难度和油耗;火力威胁主要包括防空火炮和防空导弹,为提高飞行安全性,无人机飞行过程中需要绕开火力威胁,但增加了无人机的油耗量。基于上述各方面的考虑,提出以

下优化目标函数

$$\min f(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x) + f_4(x) \quad (8)$$

式中:设计变量  $x$  为无人机航迹; $f(x)$  为综合目标。

航程目标函数的表达式为

$$\min f_1(x) = (n - 1) * \frac{L_{route}}{L} \quad (9)$$

式中: $n$  为航迹特征点数; $L_{route}$  为航迹长度; $L$  为起始点到目标点的空间距离。

相对高度目标函数  $f_2(x)$  的表达式为

$$\min f_2(x) = \sum_{i=1}^n C_i$$

$$C_i = \begin{cases} \infty, & h_i < 0 \\ k_1, & 0 < h_i < H_{min} \\ 0, & H_{min} \leq h_i \leq H_{max} \\ k_2, & h_i > H_{max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k_1$ 、 $k_2$  为正数因子; $H_{min}$  为无人机安全飞行最小相对高度; $H_{max}$  为无人机安全飞行最大相对高度; $n$  为航迹特征点数; $h_i$  为第  $i$  个特征点的高度。

水平转弯角目标函数  $f_3(x)$  的表达式为

$$\min f_3(x) = \sum_{i=1}^{n-2} C_i$$

$$C_i = \begin{cases} 0, & \varphi_i \leq \varphi_{max} \\ k_t, & \varphi_i > \varphi_{max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $k_t$  为正数因子; $\varphi_{max}$  为无人机最大水平转弯角; $n$  为航迹特征点数; $\varphi_i$  为第  $i$  个转弯角度。

受威胁目标函数  $f_4(x)$  的表达式为

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_{th}} C_{ij}$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 0, & d_{ij} \geq R_j \\ k_{th}, & d_{ij} < R_j \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k_{th}$  为正数因子; $n_{th}$  为威胁个数; $d_{ij}$  为第  $i$  个航迹特征点到第  $j$  个威胁的中心点的距离; $R_j$  为第  $j$  个威胁的半径。

#### 3.2 算法流程

以航迹规划工程经验或单目标优化结果为基础,获得航迹规划各目标函数的偏好结构,通过物理规划将航迹规划问题描述成一个能反映规划者对规划目标偏好程度的函数,即偏好函数。然后,将各个规划目标的偏好函数进行综合,得到物理规划的优化目标函数。最后采用 PSO 算法对优化目标函数进行优化,获得该多目标优化问题的折衷解,即规划者满意的航迹。算法流程如图 4 所示。

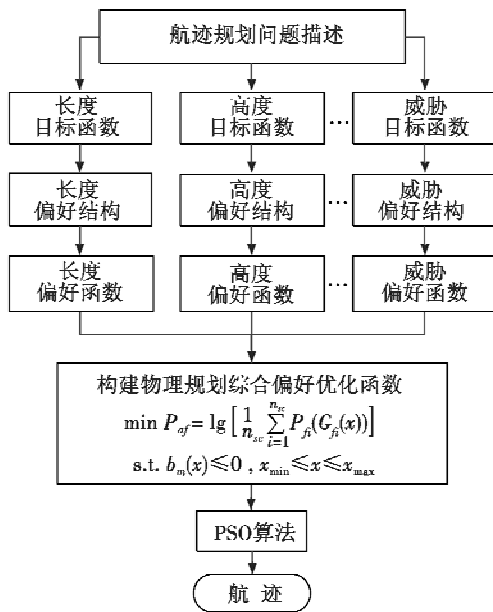


图4 基于物理规划的航迹规划流程图

Fig. 4 The flow chart of route planning based on physical programming

### 4 仿真验证

仿真环境区域范围为 40 km × 40 km, 无人机飞行速度为 300 km/h, 最大转弯角为 30°, 最小离地高度为 0.5 km, 飞行环境威胁信息如表 1 所示。地形、地貌采用文献[10]中给出的函数模拟法。

表1 飞行环境威胁信息

Table 1 The threats information in the flight environment

威胁	发射点位置/km	作用半径/km
防空火炮1	(20, 15, 0.8)	5
防空火炮2	(16, 30, 0.8)	6

起始点坐标为(0 km, 0 km, 0.3 km), 目标点坐标为(40 km, 40 km, 0.5 km)。选择 Core(TM) i5 (2.90 GHz) PC 机进行仿真实验, 运行环境为 Windows 7, 编程环境为 Matlab7.10.0。

将基于线性加权和法分别以航迹长度最短、航迹高度稳定、航迹转弯角可行、航迹受威胁次数最少为原则的粒子群航迹规划方法和本文提出的基于物理规划的航迹规划方法分别进行 10 次实验, 规划结果取平均值后对比如表 2 所示。

表2 仿真实验结果对比

Table 2 The comparison of simulation results

航迹规划方式	航迹长度/km	违反威胁约束的航迹点数	违反角度约束的航迹点数
物理规划	56.7	0.2	0
长度最优	56.6	2.9	0.2
高度最优	70.8	2.1	5.7
角度最优	59.4	1.9	0
威胁最优	64.2	0	3.6

物理规划设计目标偏好的区间边界值如表 3 所示。

表3 目标函数偏好结构

Table 3 Preference structures of objective functions

目标函数	偏好类型	偏好区间边界				
		$G_{f_{i1}}$	$G_{f_{i2}}$	$G_{f_{i3}}$	$G_{f_{i4}}$	$G_{f_{i5}}$
$f_1$	1-S	15	17	20	22	25
$f_2$	1-S	8	11	14	17	20
$f_3$	1-S	2	3.5	7	11	16
$f_4$	1-S	1	2.6	4.5	6.5	9

基于物理规划的航迹规划如图 5 所示。

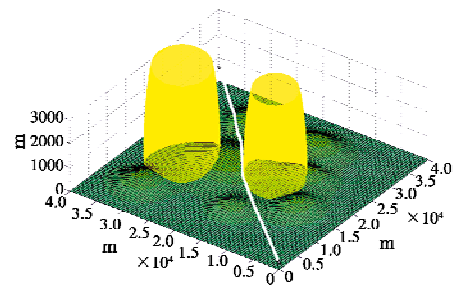
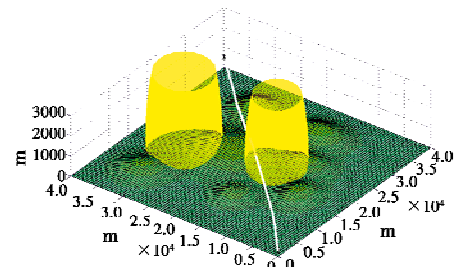


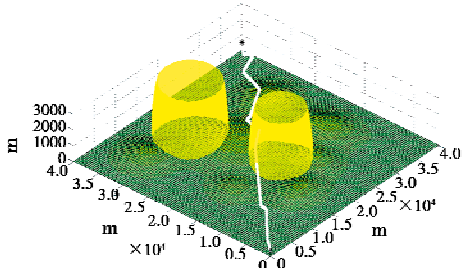
图5 基于物理规划的航迹规划结果

Fig. 5 The route planning based physical programming

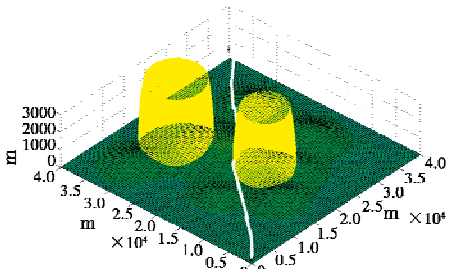
侧重于长度最短、侧重于航迹高度稳定、侧重于航迹转弯角可行、侧重于航迹受威胁次数最少原则的航迹规划示意图分别如图 6a ~ 图 6d 所示。图中: 黄色部分为飞行环境中的威胁; 白色实线为规划出的航迹。



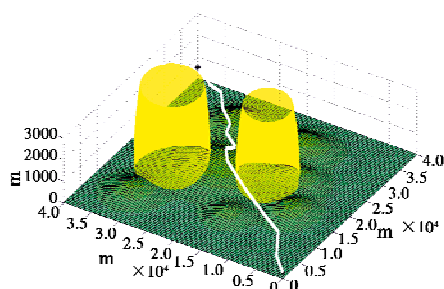
a 侧重于长度最短原则的航迹规划结果



b 侧重于航迹高度稳定原则的航迹规划结果



c 侧重于航迹转弯角可行原则的航迹规划结果



d 侧重于航迹受威胁次数最少原则的航迹规划结果

图6 基于线性加权和法的航迹规划结果

Fig.6 Planned routes based on linear weighted sum method

通过实验结果可以看出,侧重于长度最短、侧重于航迹高度稳定、侧重于航迹转弯角度可行、侧重于航迹受威胁次数最少原则规划出的航迹虽然在某一方面能使航迹达到最优,但其他方面无法满足实际需求。基于物理规划的多目标航迹规划结果在各方面虽然不是最优,但4组偏好下的各个规划目标均在可接受域或更好的范围内,是所提供偏好结构下的一个折衷解。同时,通过对4组解的比较表明,基于物理规划的航迹规划方法所得结果确实能够反映规划人员的偏好。

## 5 结论

物理规划是处理多目标优化问题的方法,该方法能够针对设计者的偏好,得到相应的设计方案,使设计过程更加灵活、自然。

本文将物理规划方法与PSO算法相结合用于无人机多目标航迹规划。介绍了物理规划方法的基本思想和数学模型,将无人机多目标航迹规划问题转换为反映规划者偏好的综合目标优化问题,最后采用PSO算法对综合目标进行优化获得满足工程特性需求的航迹。通过与基于线性加权系数法分别侧重于航程最短、相对高度稳定、转弯角度可行、受威胁次数最少为原则的粒子群航迹规划方法对比,验证了该方法能够反映规划者偏好,是一种解决多目标航迹规划问题的有效途径。

## 参考文献

- [1] FOO J L, KNUTZON J, KALIVARAPU V, et al. Path planning of unmanned aerial vehicles using B-splines and particle swarm optimization [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2009, 6(4): 271-290.
- [2] BOROWSKI H P, FREW E W. An evaluation of path planners for guidance with vision based simultaneous localization and mapping [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Minneapolis Minnesota, 2012: 1-19.
- [3] 陈刚,胡莹,徐敏,等.基于NSGA-II算法的RLV多目标再入轨迹优化设计[J].*西北工业大学学报*, 2006, 24(2): 133-137.  
CHEN G, HU Y, XU M, et al. Implementing a multi-objective optimization design of RLV reentry trajectory [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(2): 133-137.
- [4] 张雅妮,高金源.无人侦察机航迹点重规划的优化算法[J].*北京航空航天大学学报*, 2010, 36(1): 35-38.  
ZHANG Y N, GAO J Y. Algorithm for waypoints re-planning of reconnaissance unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(1): 35-38.
- [5] MESSAC A. Physical programming: Effective optimization for computational design [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(1): 149-158.
- [6] 李连升,刘继红,谢琦,等.基于物理规划的多学科多目标设计优化[J].*计算机集成制造系统*, 2010, 16(11): 2392-2398.  
LI L S, LIU J H, XIE Q, et al. Multi-disciplinary and multi-objective design optimization method based on physical programming [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(11): 2392-2398.
- [7] 雍恩米,陈磊,唐国金.基于物理规划的高超声速飞行器滑翔式再入轨迹优化[J].*航空学报*, 2008, 29(5): 1091-1097.  
YONG E M, CHEN L, TANG G J. Trajectory optimization of hypersonic gliding reentry vehicle based on the physical programming [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(5): 1091-1097.
- [8] 王允良,李为吉.物理规划方法及其在飞机方案设计中的应用[J].*航空学报*, 2005, 26(5): 562-566.  
WANG Y L, LI W J. Physical programming and its application in aircraft concept design [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2005, 26(5): 562-566.
- [9] POLI P. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization [J]. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, doi:10.1155/2008/685175.
- [10] NIKOLOS I K, VALAVANIS K P, TSOURVELOUDIS N C, et al. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2003, 33(6): 898-912.