

基于狼群算法的无人机航迹规划

刘永兰¹, 李为民¹, 吴虎胜², 宋文静¹

(1.空军工程大学, 陕西 西安 710051; 2.武警工程大学, 陕西 西安 710086)

摘要: 随着无人机可执行任务的多样化, 航迹规划成为其顺利完成任务的基本前提。针对该问题, 提出了基于狼群算法的无人机航迹规划方法。运用等效地形模拟方法, 将作战区域中的敌方威胁、地形障碍等效为山峰, 构建了无人机航迹规划的场景。以此为基础, 采用抽象出游走、召唤和围攻 3 种智能行为的狼群算法, 对起始点和终点已知的无人机航迹进行规划, 规划出的航迹安全地避开了威胁, 长度较短, 且平均耗时较小。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 无人机; 航迹规划; 等效地形模拟; 狼群算法

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 08-1838-06

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.08.027

Track Planning for Unmanned Aerial Vehicles Based on Wolf Pack Algorithm

Liu Yonglan¹, Li Weimin¹, Wu Husheng², Song Wenjing¹

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Armed Police Force Engineering University, Xi'an 710086, China)

Abstracts: Along with the diversification of missions that unmanned aerial vehicles (UAV) can carry out, track planning becomes basic precondition of UAV fulfilling missions successfully. Aiming to these, a method of track planning based on Wolf Pack Algorithm (WPA) was proposed. The method of equivalent terrain simulation was used to make enemy's threatens and terrain obstacles equal to peaks, thus the scene of track planning of UAV was built. Based on the scene, the WPA that extracted three intelligent behaviors including scouting, summoning and beleaguering was adopted to plan the track of UAV, whose start point and end point had been known. The track that planned out avoids obstacles safely, has short length and costs little average time. Simulation results show the validity of the method.

Keywords: unmanned aerial vehicles; track planning; equivalent terrain simulation; wolf pack algorithm

引言

由于在近几场局部战争中的出色表现, 无人机的发展已经受到世界各国的重视。随着机动、隐身、攻击和智能化等各种性能的不不断提升, 其应用领域范围明显扩大, 可执行的任务呈现多样化, 有侦察预警、电子对抗、通信中继、防空压制和空中打击等^[1]。航迹规划成为保障无人机顺利执行各种

任务的基本前提。它主要是指在满足无人机的自身性能以及战场复杂环境等约束的条件下, 为无人机从起始点到达目标点规划出一条最优飞行航迹, 并保证以尽可能小的代价获取作战任务的圆满完成。

狼群算法(Wolf Pack Algorithm, WPA)是一种以群体智能为基础的优化算法, 它最早见于 1970 年美国著名狼研究专家 Mech 出版的一本专著中, 该专著详细描述了狼群生态和狼群群体行为等内容^[2]。后来许多学者以此为研究基础, 对狼群的协作捕猎、追捕猎物等行为展开了大量研究。在 2010 年, 华北电力大学的柳长安、鄢小虎等学者借鉴了狼群分配原则, 设计一种基于狼群捕食的优化算



收稿日期: 2015-05-04 修回日期: 2015-07-06;
作者简介: 刘永兰(1988-), 女, 河南确山, 博士生, 研究方向为反导任务规划; 李为民(1964-), 男, 甘肃民勤, 博士, 教授, 研究方向为防空反导作战运筹分析; 吴虎胜(1986-), 男, 湖北荆门, 博士, 讲师, 研究方向为信息系统工程与智能决策, 进化计算。

法,并将其应用于移动机器人的路径规划中,WPA的雏形由此诞生^[3]。但 WPA 的系统提出则是由 2013 年就读于空军工程大学的吴虎胜学者^[4]。该算法通过对狼群的捕食行为及其猎物分配方式进行模拟,抽象出 3 种智能行为,依次为游走、召唤和围攻,及“胜者为王”的头狼产生规则和“强者生存”的狼群更新机制,以实现在复杂搜索空间的寻优。该算法具有较好的全局收敛性和计算鲁棒性,在函数优化领域表现出广阔的应用前景。

1 航迹规划问题分析及建模

1.1 航迹规划问题的描述

无人机航迹规划问题的一般描述为:在给定的存在火力威胁和地形障碍等约束的作战环境中,为无人机从起始点到目标点求解一条可行航迹,该航迹不仅要避开障碍物,确保自身的安全,而且需要满足无人机自身的性能约束。此外,该航迹在某种性能指标的度量下需要达到最优,以保证所付出的代价最小。因此,从本质上讲,无人机航迹规划属于一种寻优问题^[5]。

无人机航迹规划问题的约束条件可分为两类,一种是复杂作战环境约束,主要有:敌方火力威胁、地形障碍;另一种是无人机自身性能约束,主要有:最大水平转弯角、最大爬升/俯冲角、最小航迹段长度、最长飞行距离和最低飞行高度^[6]。该问题的目标函数为无人机的航迹长度达到最短。

1.2 航迹规划问题的模型构建

无人机在复杂作战环境中执行各种任务时,可能会面临敌方火力的威胁,如地空导弹、防空火炮等。目前雷达依然是对目标进行远距离探测、跟踪的主要设备,敌方的防空火力威胁几乎必须依靠雷达才能发挥其威力,故可将敌方的各种威胁简化为雷达威胁区域^[7]。无人机在作战区域中遇到的地形障碍,同样可以视为禁飞区域。

威胁等效地形模拟方法,是将复杂环境中的威胁与障碍等效处理成山峰地形,已在多个文献中得

到应用。它通过把敌方威胁处理成特殊的地形,其位置和作用范围叠加到数字地图上,威胁的作用就等同于抬高该作用范围的地形^[6-7]。经过这样处理后,无人机飞行区域内已知的地形障碍和敌方威胁融合成了综合的地形信息,而且把敌方威胁回避等效为地形回避进行处理,使航迹规划问题得到大大简化。根据该等效方法,本文对作战环境中的敌方威胁和地形障碍进行建模,可得威胁等效地形数学模型^[8]:

$$z(x, y) = h_0 + \sum_{j=1}^N h_j^{\max} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{k_j^x \cdot (x - x_j^{\max})}{x_j^{\max}} \right]^2 - \left[\frac{k_j^y \cdot (y - y_j^{\max})}{y_j^{\max}} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中: h_0 为基准地形高度; N 表示等效威胁的个数,即山峰数量,值越大表示作战区域中威胁的数量越多。 h_j^{\max} 为第 j 个山峰的顶点高度 ($j = 1, 2, \dots, N$), x_j^{\max}, y_j^{\max} 为第 j 个山峰顶点的横坐标和纵坐标, k_j^x, k_j^y 为第 j 个山峰沿 x 轴和 y 轴方向与坡度大小有关的量。 x, y 依次是水平投影面上的点的横、纵坐标, z 则是该水平面坐标点所对应的地形高度。对这些参数进行改变,可以模拟出威胁等效的山峰地形。

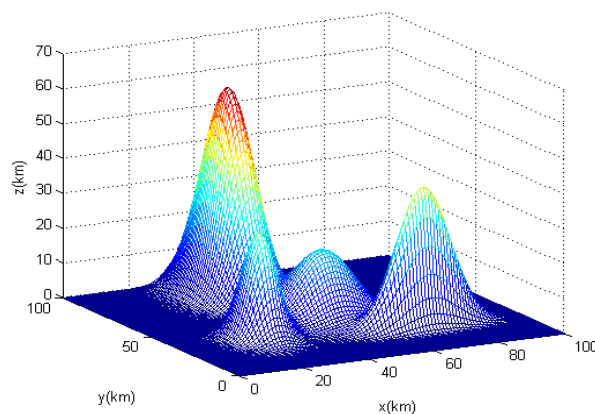


图 1 威胁等效地形的三维仿真图

运用威胁等效地形数学模型,设定参数值,可得威胁等效地形的仿真图,如图 1 所示。采用威胁等效地形模型后,设航迹的起始点为 P_s , 终点为 P_f , 将航迹的起始点和终点的连线沿 x 轴方向进

行 $n+1$ 等分, 等分点为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 相对应的航迹点 P_i 坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 应满足的要求为非障碍点, 且 P_i 与 P_{i-1} 或 P_{i+1} 的连线不经过障碍物。则无人机的目标适应度函数可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^{n+1} (\omega_1 l_i + \omega_2 f_i) \quad (2)$$

其中: F 为无人机航迹的代价函数; l_i 为第 i 段航迹的长度; f_i 为第 i 段航迹的威胁指数。 ω_1, ω_2 依次为航迹段长度、威胁指数所对应的权值, 其取值决定是飞越或绕过山峰。

如果运用无人机飞行的高度作为该航迹段的威胁指数, 结合无人机的最低飞行高度, 给出一个最佳离地高度 h_i^{deal} , 当无人机以该最佳高度飞行时, 认为其危险最小, 即该航迹段的威胁指数越小; 反之越大。为了使规划出的无人机航迹最短, 且保证其自身的安全, 可将高度作为惩罚项进行处理, 因此无人机的目标适应度函数可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^{n+1} \left(\frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} + \sqrt{(z_i - h_i^{deal})^2}}{\omega_h \cdot 2} \right) \quad (3)$$

其中: P_s 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ; P_f 的坐标为 $(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ 。为了保证规划出的航迹起始点、终点与已知要求的相同, 令 $h_{n+1}^{deal} = z_{n+1}$ 。当 $1 \leq i \leq n$ 时, $h_i^{deal} = z(x_i, y_i) + \Delta h$ 。 $z(x_i, y_i)$ 可根据公式(1)计算, Δh 为无人机的最低飞行高度。当 ω_h 取值较大时, 无人机航迹倾向于地形回避; 当 ω_h 取值较小时, 无人机航迹则倾向于地形跟随; 当 ω_h 取为 0 时, 目标适应度函数实际意义上是威胁曲面上无人机航迹的长度。

2 狼群算法的基本原理

狼是一种群居性动物, 社会分工明确, 通过承担各自的责任与团结协作, 共同促进整个狼群的生存与发展。如图 2 所示, 狼的社会分工有头狼、探狼和猛狼, 具体含义参见文献[4]。狼群算法 WPA 采用了基于人工狼主体的自下而上的设计方法和基于职责分工的协作式搜索路径结构^[4,9]。它以狼

群中个体对猎物气味的敏锐感知、环境信息的精确探索、相互间信息的及时共享和交互, 及基于职责分工的自主决策, 实现了狼群捕猎的整个过程。

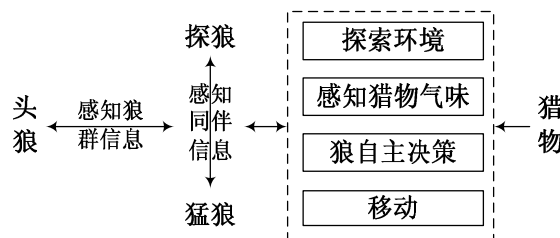


图 2 狼群的捕猎模型

针对狼群的整个捕猎活动, WPA 从中抽象出 3 种智能行为(即游走、召唤和围攻), “胜者为王”的头狼产生规则, 以及“强者生存”的狼群更新机制^[4]。关于头狼产生规则和狼群更新机制的具体方法参见文献[4], 此处不再进行详细叙述。文中重点针对狼群的 3 种智能行为展开介绍。

(1) 游走行为。在解空间中, 除头狼之外最佳的 S_{num} 匹人工狼视为探狼, 取值为 $\left[\frac{N}{a+1}, \frac{N}{a} \right]$ 之间的随机整数, N 为狼群中的人工狼总数, a 为探狼的比例因子。先计算探狼 i 当前位置的猎物气味浓度 Y_i , 若 $Y_i > Y_{lead}$ (头狼所感知的气味浓度), 则 $Y_{lead} = Y_i$, 此时探狼 i 代替头狼发起召唤行为; 若 $Y_i < Y_{lead}$, 则探狼 i 向 h (取值依赖于每匹探狼的猎物搜寻方式, 存在一定的差异) 个方向按照游走步长 $step_s$ 前进一步, 记录下前进一步后所感知的气味浓度并回退到原来的位置, 则探狼 i 在第 d 维空间中, 沿着方向 p ($p=1, 2, \dots, h$) 向前移动一步后所处的位置可表示为

$$x_{id}^p = x_{id} + \sin(2\pi \times \frac{p}{h}) \times step_s^d \quad (4)$$

此时探狼 i 感知的气味浓度为 Y_{ip} , 自主决策后沿着气味最浓且大于当前位置 Y_i 的方向向前移动一步, 同时对探狼 i 的状态 X_i 进行更新。重复上述的游走行为, 一直到狼群中某匹探狼感知到的气味浓度 $Y_i > Y_{lead}$, 或者游走次数 T 达到最大限制的次数。

(2) 召唤行为。头狼利用嚎叫方式发起召唤行为, 将周围的 M_{num} 匹猛狼迅速向其所在的位置召集, 其中 $M_{num} = N - S_{num} - 1$ 。接受到头狼召唤的猛狼都以较大步长 $step_b$ 向头狼所在的位置快速奔袭。则猛狼 j 经历第 $k+1$ 次迭代时, 在第 d 维空间中所处位置可表示为:

$$x_{jd}^{k+1} = x_{jd}^k + step_b^d \cdot \frac{g_d^k - x_{jd}^k}{|g_d^k - x_{jd}^k|} \quad (5)$$

其中: g_d^k 为第 k 代群体的头狼在第 d 维空间所处的位置。式(5)中的第一项是猛狼 j 所处的当前位置, 第 2 项是猛狼 j 向头狼所在的位置逐渐聚集。

在整个奔袭过程中, 如果猛狼 j 感知到的气味浓度 $Y_j > Y_{lead}$, 则令 $Y_{lead} = Y_j$, 此时猛狼 j 代替头狼发起召唤行为; 如果 $Y_j < Y_{lead}$, 则猛狼 j 继续快速奔袭, 一旦与头狼 S_{lead} 之间的距离 d_{js} 小于判定距离 d_{near} 时, 即转入围攻行为。则判定距离 d_{near} 可估算得到:

$$d_{near} = \frac{1}{D \cdot \varpi} \cdot \sum_{d=1}^D |M_d - m_d| \quad (6)$$

其中: D 为待寻优变量空间的维数; ϖ 为距离判定因子; M_d , m_d 为待寻优的第 d 维变量空间的最大值和最小值。 ϖ 的取值大小影响 WPA 的收敛速度, 值增加会加速收敛, 但值过大的话, 将导致猛狼难以进入围攻行为。

(3) 围攻行为。将离猎物最近的狼 (即头狼所处的位置) 可视为猎物的移动位置。对于第 k 代狼群而言, 猎物在第 d 维空间所处的位置为 G_d^k , 则可将狼群的围攻行为表示如下:

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + \lambda \cdot step_w^d \cdot |G_d^k - x_{id}^k| \quad (7)$$

其中: λ 为 $[-1, 1]$ 区间内的随机数, 呈均匀分布; $step_w^d$ 为人工狼 i (包括猛狼和探狼) 在第 d 维空间中采取围攻行为时的攻击步长。采取围攻行为之后, 如果人工狼 i 感知到的气味浓度大于其原位置所感知的浓度, 则对人工狼 i 的位置进行更新; 否则, 人工狼 i 的位置将保持不变。

在第 d 维空间中, 3 种智能行为中所牵涉的人工狼的游走步长 $step_s^d$ 、奔袭步长 $step_b^d$ 和围攻步长

$step_w^d$ 之间的关系可表示如下:

$$step_s^d = \frac{step_b^d}{2} = 2 \cdot step_w^d = \frac{|M_d - m_d|}{C} \quad (8)$$

其中: C 表示步长因子, 代表了人工狼在解空间中的搜索精细程度。

3 航迹规划算法步骤及设计

将无人机待规划航迹上的点 P_i 作为人工狼在第 i 维空间的位置信息, 通过横坐标 x_i 可以计算出其它二维坐标 y_i 和 z_i 的值。 P_i 的位置用 x_i 表示, 则基于狼群算法的无人机航迹规划的具体步骤为:

步骤 1 参数初始化。设定无人机的起始点 P_s 和终点 P_f , 随机选取 N 条从 P_s 到 P_f 的航迹作为人工狼。探狼的比例因子 a , 步长因子 C , 最大游走限制次数 T_{max} , 距离判定因子 ϖ , 群体更新比例因子 β (来源于 WPA 的“强者生存”狼群更新机制, 详见文献[4]中的描述), 和最大迭代次数 K_{max} 。

步骤 2 计算 N 匹人工狼的适应度函数, 选取具有最优值的人工狼为头狼, 除头狼之外最佳的 S_{num} 匹人工狼则作为探狼, 并按照公式(4)执行游走, 不断向前进行更新, 直到某匹探狼 i 感知到的猎物气味浓度 (适应度函数值) 大于头狼所感知到的浓度, 或者达到最大游走限制次数, 转步骤 3。

步骤 3 根据公式(5), 猛狼 j 向猎物的方向进行奔袭。如果奔袭途中, 猛狼 j 感知的气味浓度 (适应度函数值) 大于头狼所感知到的气味浓度, 即替代头狼发起召唤行为; 否则, 猛狼 j 继续进行奔袭, 一旦 $d_{js} \leq d_{near}$, 转步骤 4。

步骤 4 选取头狼的位置为猎物的位置, 对猎物进行围攻, 依据公式(7)更新参与围攻行为的人工狼的位置。若 x_{id} 超出了变化范围, 则设置其为边界值。

步骤 5 按照头狼产生规则更新头狼的位置, 再按照狼群更新机制对整个群体进行更新, 去除狼群中最差的 R 匹人工狼, 同时随机产生 R 匹人工狼。 R 的取值为 $\left[\frac{N}{2\beta}, \frac{N}{\beta} \right]$ 之间的随机整数。

步骤 6 判断 x_{id} 的位置是否满足不在障碍内, 且它与相邻两点的连线不经过障碍的条件。若满足, 则取 x_{id} 为第 i 匹人工狼的位置; 否则随机选取一个满足条件的点为第 i 匹人工狼的位置。

步骤 7 判断是否满足优化精度要求, 或者达

到最大迭代次数 K_{\max} , 如果满足这两者之一, 则输出头狼的位置, 即最优的航迹; 否则转到步骤 2。

综上, 可得基于 WPA 的无人机航迹规划流程图如图 3 所示。

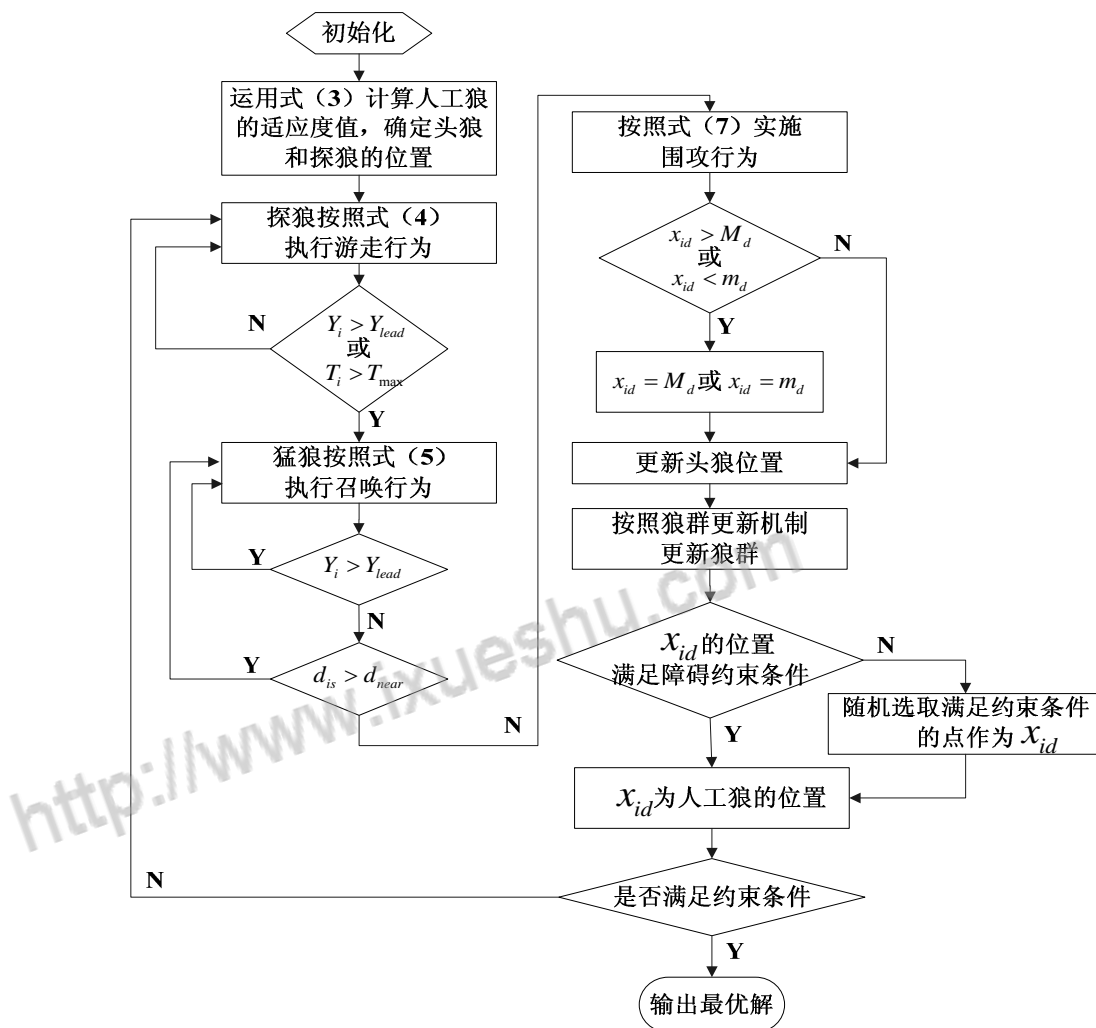


图 3 基于 WPA 的无人机航迹规划流程图

4 算法验证及仿真

仿真环境设置: 威胁等效地形如图 1 所示, 并且无人机沿等效的山峰地形包络飞行时视为威胁最小。无人机航迹的搜索空间设置为 $100\text{km} \times 100\text{km}$ 的区域, 起始点的坐标为 $(0, 30)\text{km}$, 终点的坐标为 $(90, 30)\text{km}$, 山峰地形为雷达和地形威胁的等效物。将起始点与终点的连线沿 x 轴方向进行 33 等分, 即选取了 32 个航迹节点, 可得 $D=32$ 。

本文运用狼群算法和文献[7]中的粒子群优化算法进行比较, 两种算法的最大迭代次数为 500。狼群算法的参数设置为: 人工狼的总数为 32, 探狼的比例因子 $a=4$, 步长因子 $C=100$, 最大游走限制次数 $T_{\max}=20$, 距离判定因子 $\omega=50$, 狼群的更新比例因子 $\beta=6$; 粒子群算法中的粒子个数为 32, 惯性权值为 $0.729^{[10]}$, 两个学习因子为 $c_1=c_2=2$, $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$, $V_{\max}=2$ 。为

便于对这 2 种算法进行对比, 给出它们规划出的航迹的等高线平面图, 如图 4 和图 5 所示, 这 2 种算法的性能比较见表 1。

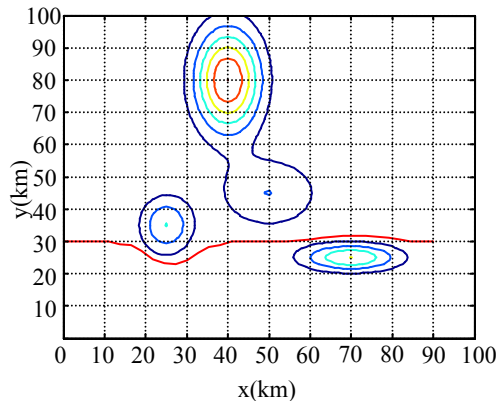


图 4 狼群算法规划的最优航迹

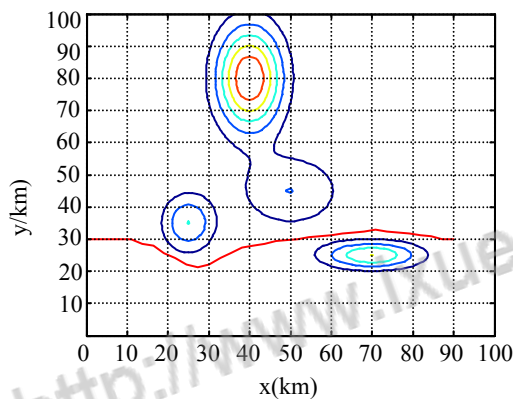


图 5 粒子群算法规划的最优航迹

表 1 狼群算法和粒子群算法的性能比较

算法	航迹长度/km	平均耗时/s
狼群算法(WPA)	100.87	0.8358
粒子群算法(PSO)	112.35	1.8247

由图 4 和图 5 可知, 运用威胁等效地形模拟方法, 能够有效地将各种复杂威胁进行转化, 便于无人机进行航迹规划。此外, 从图 4 和图 5 中可以看出, 运用 PSO 算法和 WPA 算法规划出的无人机航迹均较好地避开了等效的山峰地形威胁, 将这两个图进行对比可看出, 运用 PSO 算法规划出的航迹比运用 WPA 算法规划出的航迹弯曲弧度较明显, 且航迹较长。这从表 1 中的数据可知, 运用 PSO 算法规划出的无人机航迹长度为 112.35 km, 而运用 WPA 算法规划出的无人机航迹长度为 100.87

km。由此可知, PSO 算法的搜索陷入了局部最优的航迹; 而 WPA 算法规划的航迹长度较短, 且运行平均耗时相对较小。仿真结果表明 WPA 算法能够有效地解决无人机航迹规划问题。

5 结论

文中运用等效地形模拟方法, 将作战区域中的敌方威胁、地形障碍等效为山峰, 建立了无人机航迹规划的场景。在此基础上, 采用狼群算法对起始点和终点已知的无人机航迹进行规划。仿真结果表明: 与 PSO 优化算法相比, 运用 WPA 算法规划出的无人机航迹安全地避开了威胁, 长度较短, 且平均耗时相对较小。然而在运用 WPA 算法中, 需要调整的参数相对较多, 参数的调整会引起规划航迹的变化, 这将是下一步需要研究的重点方向。

参考文献:

- [1] 王海波, 林久辉, 李永涛. 军用无人机的应用与发展趋势[J]. 科技视界, 2014 (15): 112-113.
- [2] Mech L D. The Wolf: the ecology and behavior of an endangered species[M]. USA: New York Natural History Press, 1970.
- [3] 鄢小虎. 基于生物智能的移动机器人路径规划研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010, 06.
- [4] 吴虎胜, 张凤鸣, 吴庐山. 一种新的群体智能算法——狼群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2430-2438.
- [5] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [6] 王新增, 慈林林, 李俊山, 等. 基于改进粒子群优化算法的无人机实时航迹规划[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(4): 87-90.
- [7] 陈小双, 翟为刚, 赵万里. 基于粒子群优化算法的无人机航迹规划[J]. 现代计算机, 2011 (10): 8-11.
- [8] 巴海涛. 无人机航迹规划研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [9] Yanming Ye, Jianwei Yin, Zhilin Feng, Bin Cao. Wolf-pack Algorithm for Business Process Model Syntactic and Semantic Structure Verification in the Workflow Management Environment[C]. 2010 IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [10] 李丽, 牛奔, 等. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
