

9-2-2020

Man-machine Coordinated Intelligent Flight Path Planning Algorithm

Ren Peng

School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Xiaoguang Gao

School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Man-machine Coordinated Intelligent Flight Path Planning Algorithm

Abstract

Abstract: Man-machine coordinated flight path planning of UAV low-altitude penetration is a key technology achieving manned and unmanned aerial vehicles cooperative combat. *The algorithm of man-machine coordinated intelligent flight path planning was proposed, combining artificial auxiliary decision with novel intelligence algorithm, a chromosome integer code with changeable length based on angle was used to represent flight path. Human's wisdom and experience could make up for the lack of intelligence algorithm. In the most dangerous environment, it made the best possible use of the human brain to guide solution procedures of the flight path planning on pop-up threats.* A lot of simulation studies show that the on-line three-dimensional flight paths by this technical can meet the requirements of UAV low-altitude penetration, efficient implementation of threat avoidance, terrain avoidance and terrain following. This method has a certain practicality.

Keywords

pop-up threats, man-machine coordinated cooperation, low-altitude penetration, flight path planning

Recommended Citation

Ren Peng, Gao Xiaoguang. Man-machine Coordinated Intelligent Flight Path Planning Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 313-319.

人机协同智能航迹规划算法

任鹏, 高晓光

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 人机协同低空突防航迹规划是实现有人机和 UAV 协同作战的关键技术, 结合协同作战的特点和 UAV 低空突防航迹规划的要求, 将人工辅助决策和改进的智能算法结合起来, 并利用角度量的变长度基因编码表示飞行航迹, 提出人机协同的智能航迹规划算法。该算法能够充分发挥人脑这个超级智能系统, 利用人的智慧和经验弥补智能算法的不足, 在“高危环境下”下针对突发威胁的覆盖范围来引导航迹求解过程, 通过大量仿真计算, 结果表明: 应用该算法规划的三维航迹能够有效躲避突发威胁, 实现威胁回避、地形回避和地形跟随, 满足 UAV 低空突防要求, 具有一定的实用价值。

关键词: 突发威胁; 人机协同; 低空突防; 航迹规划

中图分类号: V249

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 02-0313-07

Man-machine Coordinated Intelligent Flight Path Planning Algorithm

Ren Peng, Gao Xiaoguang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Man-machine coordinated flight path planning of UAV low-altitude penetration is a key technology achieving manned and unmanned aerial vehicles cooperative combat. The algorithm of man-machine coordinated intelligent flight path planning was proposed, combining artificial auxiliary decision with novel intelligence algorithm, a chromosome integer code with changeable length based on angle was used to represent flight path. Human's wisdom and experience could make up for the lack of intelligence algorithm. In the most dangerous environment, it made the best possible use of the human brain to guide solution procedures of the flight path planning on pop-up threats. A lot of simulation studies show that the on-line three-dimensional flight paths by this technical can meet the requirements of UAV low-altitude penetration, efficient implementation of threat avoidance, terrain avoidance and terrain following. This method has a certain practicality.

Keywords: pop-up threats; man-machine coordinated cooperation; low-altitude penetration; flight path planning

引言

有人驾驶飞机和 UAV 在作战体系中各有优势, 相互依存, 不可决然分割, 二者协同作战将成为未来空中作战的主要模式^[1-5]。人机协同能充分

发挥有人驾驶飞机上的人的智慧和综合判断能力, 同时结合无人机的自主能力, 并根据战场态势进行快速智能决策, 实时监控、控制、指挥 UAV 在“高危环境下”执行高风险的侦察、监视和打击任务^[1,6-8]。

通常在“高危环境下”执行任务, UAV 要利用地形遮挡和防空系统盲区作掩护进行低空突防, 由于战场态势动态发展, 威胁信息不断更新, 突发威胁难以避免, 因此, 需要研究针对突发威胁的 UAV



作者简介: 任鹏(1979-), 男, 陕西乾县人, 博士生, 讲师, 研究方向为有/无人机协同任务/路径规划; 高晓光(1957-), 女, 辽宁鞍山人, 博士, 教授, 研究方向为航空武器系统效能分析与智能信息处理。
收稿日期: 2014-01-24 修回日期: 2014-07-22
基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61305133); 高等学校博士学科点专项科研基金(20116102110026)

<http://www.china-simulation.com>

低空突防航迹规划技术, 但其复杂性及难度非常高, 实时性强, 同时约束条件多、三维航迹节点数量庞大, 搜索空间巨大, 单纯依靠现有智能算法求解很难快速高效的获得贴近实际的满意解, 无法保证重规划航迹的最优性和可达性^[9-12], 而人脑是一个超级智能系统, 具有实时推理、决策、学习和记忆等功能, 能够应对各种复杂的环境。因此, 本文针对现有智能算法在实际应用中的不足, 结合协同作战的特点和 UAV 自身性能, 综合地形、敌情等信息, 充分利用人的智慧和经验, 提出了人机协同智能航迹规划算法, 其本质是一个在人监督、控制下的智能决策过程, 具有实时性、重规划和易操作等特点, 并通过大量仿真计算、分析, 得出应用该技术重规划的三维航迹能够有效躲避威胁, 实现威胁回避、地形回避和地形跟随, 满足 UAV 低空突防要求, 具有一定的实用价值。

1 人机协同智能航迹规划算法

人机协同智能航迹规划算法是将人工辅助决策和改进的智能算法结合起来, 充分利用人的智慧和经验弥补智能算法的不足, 针对突发威胁情况下的 UAV 低空突防航迹规划问题进行快速决求解, 重规划出满足 UAV 低空突防要求的三维航迹。

1.1 人工辅助决策

通常情况下, 无人机的控制由机载设备实现, 任务管理在地面控制站上进行, 这种控制和管理的分离, 存在着由于数据链路处理和传输导致的命令滞后和延迟, 无法实时规划航迹和应对突发威胁。协同作战时, UAV 获得的目标信息通过战术数据链能及时传输到有人机, 有人机具有更好的战场态势感知度, 当 UAV 按预规划航迹飞行遇到突发威胁时, 人能快速对综合态势与威胁程度进行评估、决策, 帮助 UAV 重规划航迹、规避威胁, 人工辅助决策流程如图 1 所示, 分以下 2 种情况:

1) UAV 在突发威胁覆盖范围外

预规划航迹在突发威胁覆盖范围内时, 对综合态势与威胁程度进行评估, 利用人的智慧和经验快

速设置重规划航迹的起始、终止点, 应用改进的智能算法重新规划航迹, 保证 UAV 要能及时、有效躲避威胁; 当重规划航迹点较多、计算时间较长, 改进的智能算法难以满足在线规划航迹的实时性和可达性时, 可根据飞行的实际情况和实时探测的威胁信息, 在能够有效躲避威胁的前提下, 在重规划航迹的起始、终止点之间人工设置少量导航点, 利用改进智能算法分段计算实时可行航迹; 当预规划航迹在突发威胁覆盖范围外时, 按预规划航迹继续飞行。

2) UAV 在突发威胁覆盖范围内

迅速启动应急程序, 在电脑程序设定好的多条各个方位的快速逃逸路线中, 评估综合态势和威胁程度, 利用人的智慧和经验快速选择、判断, 选出一条最为合适的逃逸路线, 再以该逃逸路线逃出威胁覆盖范围的航迹点作为下一阶段逃逸航迹的起点, 人工设定逃逸航迹的终点, 应用改进的智能算法重新规划逃逸航迹, 从而使 UAV 能够迅速规避威胁, 并将其引导至合理、安全的飞行航迹上来。

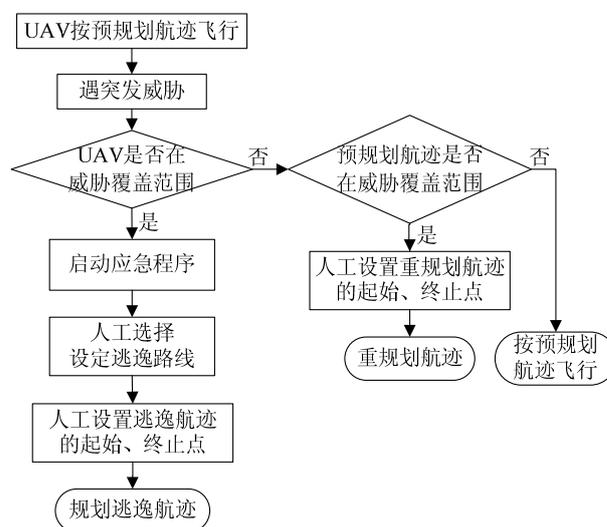


图1 人工辅助决策流程图

1.2 改进的智能算法

针对 UAV 低空突防航迹规划问题的实际, 基于进化算法的原理, 引入改进的智能算法, 应用该算法求解航迹时, 在解空间中用多个子种群代替单

一种群进行搜索, 子种群按照设定的模式分别进行独立进化, 各自探询不同的解域。在适当的时候, 种群之间按照一定的迁移策略交换子种群中的个体, 然后汇集在一起寻求整体最优解, 这样, 种群的多样性得以丰富和保持, 不仅可以提高算法的运算速度, 而且还具有维持种群多样性的能力。为了更进一步抑制早熟收敛, 提高算法的搜索效率, 在划分的子种群中, 引入小生境自适应遗传机理, 将其中每一代个体划分为若干类, 每类中选出适应度较大的个体作为一个类的优秀代表组成新的种群, 再在新的种群中以及不同种群之间通过杂交、变异, 即利用自适应的交叉和变异算子产生新一代子种群, 同时利用基于共享函数的小生境方法维持群体的多样性, 通过搜索产生更优的个体, 引导种群新一轮进化, 实现在解空间内对尽可能多的最优解的寻优^[11,13]。算法运算过程描述如下:

1) 生成初始种群: 设置进化代数计数器, 在可行解空间生成 α 个初始群体 $P(t)$ 。

2) 划分种群: 将 $P(t)$ 按交换模型分成 α 个子种群, $P(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t)\}$, 每个子种群中有 k 个个体, n 为分组数, $k = m/n$, $\#k$ 为整数。

3) 计算个体适应度: 分组计算各子种群 $P_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ 中个体的适应度 $f_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k)$ 。

4) 对各子种群进行小生境自适应独立进化。

(1) 设置独立进化计数器;

(2) 在子种群中依据个体适应度对 $P_i(t)$ 进行降序排列, 记忆前 q 个体 $q < k$;

(3) 利用改进的选择、交叉、变异算子分别对子种群内的个体进行复制、杂交、变异等自适应操作, 得到 $P'_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$;

(4) 对子种群做小生境淘汰运算: 将步骤(2)产生的 q 个体和步骤(3)产生的 $P'_i(t)$ 中的 k 个体合并在一起, 得到一个含有 $k+q$ 个个体的新群体; 计算新群体中各个个体在群体中的共享度 $S_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k+q)$, 依据 S_{ij} 来调整各个个

体, 得到新的适应度 $f'_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k+q)$;

(5) 依据新适应度 f'_{ij} 对各个个体进行降序排列, 记忆前 k 个个体, 得到 $P''_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$;

(6) 小生境终止条件判断: 若不满足小生境终止条件, 则更新独立进化计数器, 并将第(5)步排列中的前 k 个个体作为新的下一代群体, 再转到第(2)步; 若满足终止条件, 则退出小生境自适应进化。

5) 按照一定的迁移策略交换子种群中的个体, 得到下一代群体 $P_i(t+1) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

6) 终止进化条件判断: 若不满足终止进化条件, 则更新进化代数计数器, 转向步骤 3); 若满足终止进化条件, 则输出优化结果, 算法结束。

1.3 基于共享机制的小生境实现方法

利用反映个体之间相似程度的共享函数来调整种群中各个个体的适应度, 依据调整后的新适应度进行选择操作, 将搜索空间的多个不同峰值在地理上区分开来, 使每个峰值处接受一定比例数目的个体, 从而限制群体内个别个体的大量增加, 以维护种群的多样性, 创造出小生境的进化环境。

本文采用一种将海明距离测度(基因型差异)与适应度距离(表现型差异)相结合的方法, 共享函数 $Sh[i, j]$ 可定义为:

$$Sh[i, j] = \begin{cases} 1 - d_1[i, j] / \sigma_1 & d_1[i, j] < \sigma_1, d_2[i, j] \geq \sigma_2 \\ 1 - d_2[i, j] / \sigma_2 & d_1[i, j] \geq \sigma_1, d_2[i, j] < \sigma_2 \\ 1 - \frac{d_1[i, j] * d_2[i, j]}{\sigma_1 * \sigma_2} & d_1[i, j] < \sigma_1, d_2[i, j] < \sigma_2 \\ 0 & d_1[i, j] \geq \sigma_1, d_2[i, j] \geq \sigma_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_1[i, j]$ 是个体 i 和 j 之间的海明距离, $d_2[i, j]$ 是个体 i 和 j 之间的适应度距离; σ_1 和 σ_2 是小生境的半径, 即分别为基因型和表现型的作为一个小生境内的个体最大距离。

共享度是某个个体在群体中共享程度的一种度量, 它定义为该个体与群体内其它个体之间的共享函数值之和, 子种群 i 中第 j 个个体的共享度用 S_{ij} 表示:

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^{k-1} Sh[i, j] (j = 1, 2, \dots, k; i \neq j) \quad (2)$$

计算出子种群中各个个体的共享度后, 依据下式来调整种群各个个体的适应度:

$$f'_{ij} = f_{ij} / S_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

2 飞行航迹的表示

只有切实反映出求解问题实质的飞行航迹的数学表示, 才能提高智能算法的收敛性。本文利用角度的变长度基因编码表示飞行航迹, 航迹点序列中的第 i 段航迹点 (x_i, y_i, z_i) 可以用 (l_i, φ_i, μ_i) 表示, l_i 是第 i 段航迹段的长度, μ_i, φ_i 是第 i 段航迹段俯仰角和偏航角。

2.1 航迹编码

采用这种角度量表示飞行航迹的方式能较容易地满足 UAV 自身性能的机动性要求, 不会出现难以飞行的路径; 同时 μ_i, φ_i 都是 UAV 的飞行控制量, 用它来表示航迹节点, 便于飞控系统实现自动驾驶, 获得所要求的最佳飞行性能。再将三维空间的参数 (l_i, φ_i, μ_i) 转换成由基因按一定结构组成的染色体, 从起点到终点的飞行航迹用一条长度不定的基因染色体来表示, 如下:

$g_1, g_2, \dots, g_{i-1}, g_i, \dots, g_{n-1}$ 为表示一条飞行航迹的染色体的基因串, 每个基因位 g_i 的取值范围为 $[0, 127]$ 之间的整数, 每个基因位上的整数表示在一个等间距航迹段 Δl 内 ($l_i = \Delta l$), 相邻航迹段航迹偏航角 φ_i 和俯仰角 μ_i 的变化情况的组合, 整条飞行航迹共分成等间距的 n 段, n 根据实际的飞行航迹节点数确定, 不同的飞行航迹, 其所表示的染色体的基因串的位数 n 各不相同。根据无人机自身性能的约束, 航迹偏航角和俯仰角的大小由 UAV 的过载来确定, $\varphi_i \leq \pm 70^\circ, \mu_i \leq \pm 30^\circ$, 以 10° 为一个间隔, μ'_i 的取值为 $\{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\}$, φ'_i 的取值为 $\{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 7\}$, μ'_i, φ'_i 分别用 3 位、4 位二进制表示, 最高位为符号位, “1”为负, “0”为正, 而 $[0, 127]$ 之间的整数可以用一个 7 位二进制编码表示, 所以 g_i 能够表示 μ'_i, φ'_i 的组合, 进而能够

表示出 μ_i, φ_i 的变化情况的组合, 如图 2 所示。

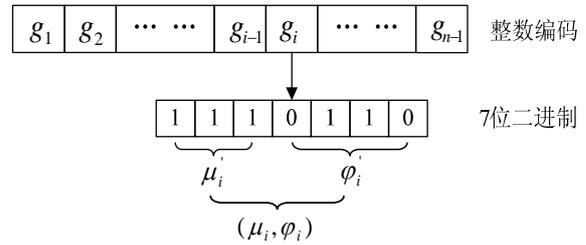


图 2 染色体基因编码

例如: 当 $g_i = 118$, 转换成二进制编码为 ‘1110110’, 分解后, $\mu'_i = 111$, $\varphi'_i = 0110$, 可得, $\mu_i = -30^\circ$, $\varphi_i = 60^\circ$, 表示第 i 段飞行航迹向下倾斜 30° , 逆时针方向偏转 60° 。

2.2 染色体解码

染色体解码实际上是编码的一个逆过程, 即从得到的染色体基因序列求出各对应航迹点在原数字地图坐标系下直角坐标的过程。染色体解码过程分为以下两步进行:

- 1) 由染色体基因串 $g_1, g_2, \dots, g_{i-1}, g_i, \dots, g_{n-1}$ 得到对应相邻航迹段俯仰角和偏航角序列, 即 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i, \dots, \mu_{n-1}, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_{n-1}$ 。
- 2) 由以下方程求得航迹点在规划空间中的原数字地图坐标系中的直角坐标。

$$\begin{cases} x(i+1) = x(i) + \Delta l * \cos \sum_{j=1}^{i+1} \mu_j * \cos \sum_{j=1}^{i+1} \varphi_j \\ y(i+1) = y(i) + \Delta l * \cos \sum_{j=1}^{i+1} \mu_j * \sin \sum_{j=1}^{i+1} \varphi_j \\ z(i+1) = z(i) + \Delta l * \sin \sum_{j=1}^{i+1} \mu_j \end{cases} 0 \leq i \leq N-1 \quad (4)$$

3 仿真计算

利用地形高程数据, 生成 80×80 km 三维地形, 其能够模拟实际地形的山峰和山谷, 满足航迹规划算法需要。6 个已知威胁源, 1 个突发威胁源。种群大小为 80, 预规划最大进化迭代次数为 300, 重规划最大进化迭代次数为 50。

通过大量仿真, 统计实验数据, 得到不同算法的性能对比表 1。采用改进的智能算法收敛到全局

最优解和次优解所需平均收敛代数分别为 87 代和 158 代, 平均耗时分别为 51.4 s 和 92.7 s, 较其他算法性能有较大改进。

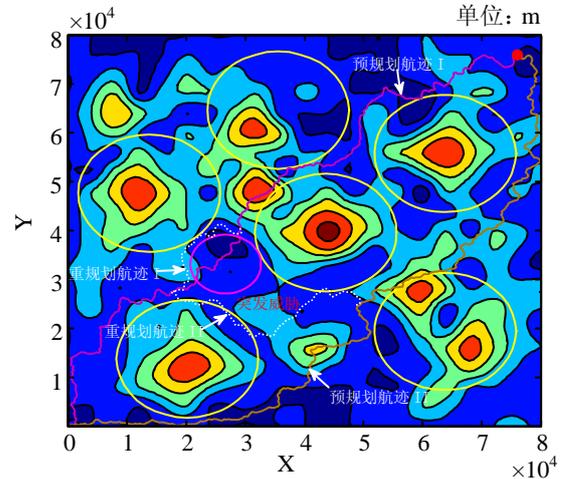
表1 不同算法的性能对比

算法	平均收敛代数	平均耗时/s	备注
基本遗传算法			无解
小生境自适应遗传算法	1136	912	最优解
小生境伪并行遗传算法	725	556	最优解
改进的智能算法	87	51.4	最优解
	158	92.7	次优解

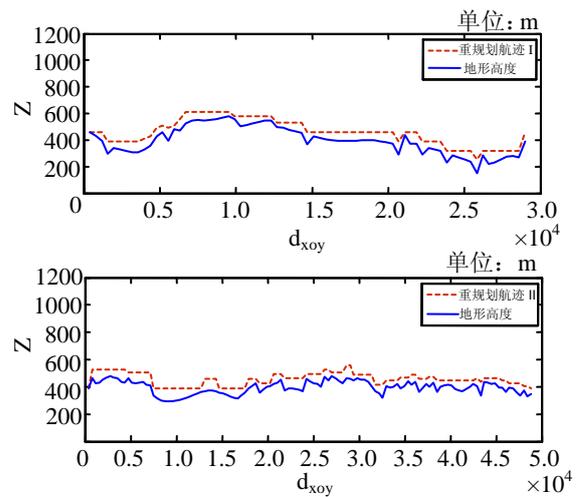
3.1 UAV在突发威胁覆盖范围外的航迹规划

图 3(a)为重规划航迹高程图, 图中 6 个形状和大小相等空心圆表示 6 个威胁源的作用范围, 两条航迹交汇处的实心圆点为目标点, 从图中可以看出, 应用改进智能算法预规划的航迹 I 和 II 充分利用了各个威胁源之间的盲区, 成功地回避了威胁。选择预规划航迹 I 作为飞行航迹, 当 UAV 沿着预规划航迹 I 前进到一定距离时, 由于战场环境的动态不确定性, 发现前方航迹被突发威胁所覆盖(图中粉红色空心圆表示突发威胁源的作用范围), 造成预规划航迹 I 不可飞, 需要对预规划航迹 I 进行重规划, 此时, 利用人的智慧和经验根据实际情况, 快速设置重规划航迹的起始点(预规划航迹 I 上且 UAV 尚未到达的点)和终止点(分别在预规划航迹 I 或 II 上且在突发威胁覆盖外的点), 应用改进智能算法重规划飞行航迹, 从图中可以看出, 重规划的两条飞行航迹都能够成功躲避突发威胁, 然后, 评估综合态势与威胁程度进行, 根据实际作战任务需求, 对重规划出航迹进行选择、判断, 人为选择出实际飞行航迹。如果发现威胁较晚, 且对航迹计算时间要求苛刻的情况下, 可人为设置少量导航点, 应用改进智能算法分段快速计算重规划航迹, 保证 UAV 能及时、有效躲避威胁。图 3(b)是重规划飞行航迹剖面图, 横坐标 d_{xoy} 为飞行航迹在水平面内的投影, Z 为飞行高度, 从图中可以看出, 重规划

飞行航迹实现了地形回避和地形跟随。同时, 改进智能算法本身通过最大航迹俯仰角和偏航角的限制满足了 UAV 自身飞行性能的要求, 使 UAV 低空突防成为可能。



(a) 重规划航迹高程图



(b) 重规划航迹剖面图

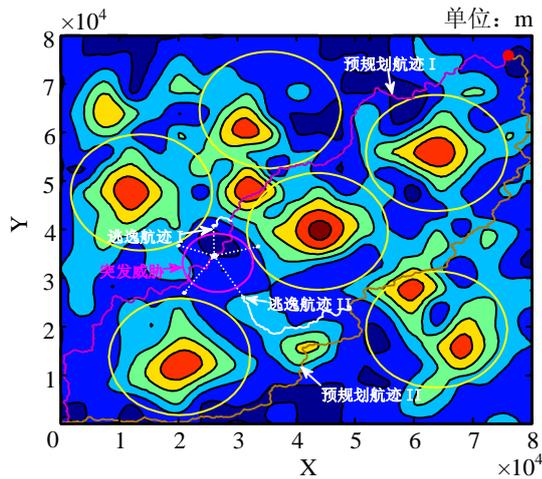
图 3 UAV 在突发威胁覆盖范围外的航迹规划

3.2 UAV 在突发威胁覆盖范围内的航迹规划

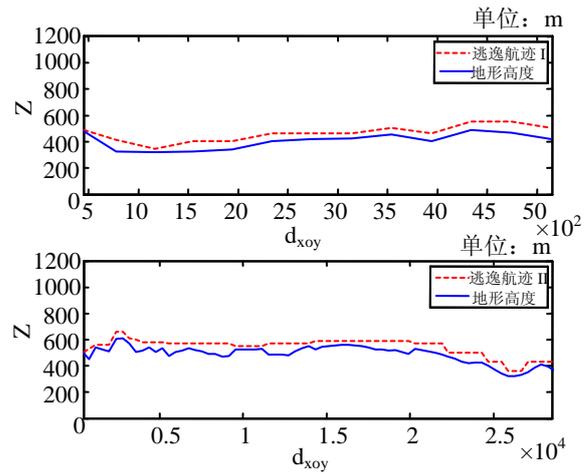
图 4(a)为逃逸规划航迹高程图, 固定威胁源、突发威胁源和预规划航迹和图 3 表述一致。当 UAV 沿着预规划航迹 I 前进时, 发现 UAV 被突发威胁所覆盖, 此时, 迅速启动应急程序, 图中虚线所示为在电脑程序设定好的快速逃逸路线(共 5 条, 沿不同方向), 利用人的智慧和经验评估综合态势和

威胁程度,快速选出合适的逃逸路线,再以该逃逸路线逃出威胁覆盖范围的航迹点作为下一阶段逃逸航迹的起始点,人工设定逃逸航迹的终止点(在预规划航迹 I 或 II 上且在突发威胁覆盖外的点),应用改进的智能算法规划出下一阶段逃逸航迹(航迹中的实线部分),从图中可以看出,两条逃逸航

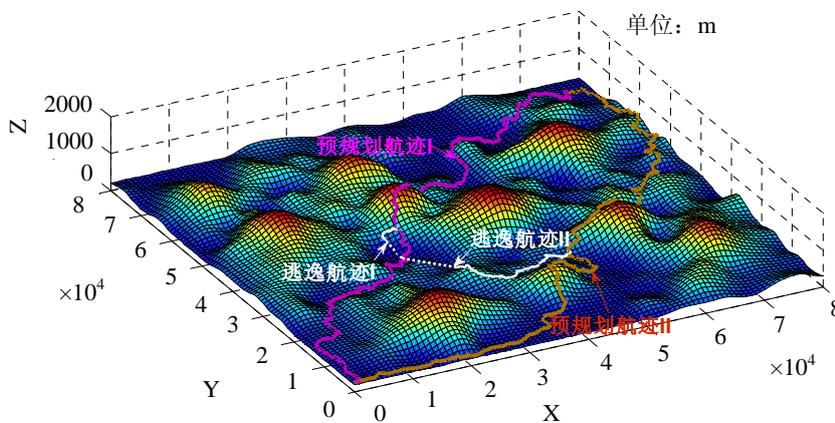
迹都能够及时规避威胁,并将 UAV 引导至预规划飞行航迹上来。图 4(b)是逃逸航迹的剖面图,图 4(c)是逃逸航迹三维图,从图中可以更加全面、清晰地看出逃逸航迹是能够实现地形回避和地形跟随,满足 UAV 低空突防要求的。



(a) 逃逸航迹高程图



(b) 逃逸航迹剖面图



(c) 逃逸航迹三维图

图 4 UAV 在突发威胁覆盖范围内的航迹规划

4 结论

本文在编队协同作战的背景下,提出了针对突发威胁的人机协同智能航迹规划算法,并通过大量仿真计算得出以下结论:

1) 人工辅助决策,发挥人脑这个超级智能系统在“高危环境下”下针对突发威胁的覆盖范围来引导航迹求解过程,及时规避突发威胁,获得切实

可行的飞行航迹。

2) 在已知地形和威胁信息的情况下,应用改进的智能算法重规划的飞行航迹能够满足 UAV 低空突防的要求,具有可飞性和可操作性的。

3) 利用角度量的变长度基因编码表示飞行航迹,能够将 UAV 自身飞行性能约束条件融入到改进智能算法中加以解决。

综上, 有人机和无人机编队协同作战是一种全新的、可行的作战模式, 采用人机协同的智能航迹规划算法在“高危环境下”下针对突发威胁的覆盖范围来引导航迹求解过程, 规划出的三维航迹能够有效躲避突发威胁, 实现威胁回避、地形回避和地形跟随, 满足 UAV 低空突防要求的, 是可行的和有效的, 是值得深入研究和推广应用的。

参考文献:

- [1] Murray C C, Park W. Incorporating Human Factor Considerations in Unmanned Aerial Vehicle Routing [J]. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society (S2168-2216), 2013, 43(4): 860-874.
- [2] Savla K, Temple T, Frazzoli E. Human-in-the-loop vehicle routing policies for dynamic environments [C]// Proc. 47th IEEE Conf. Decision Control, Cancun, Mexico. USA: IEEE, 2008: 1145-1150.
- [3] Donald W. Manned/unmanned common architecture program (MCAP): a review [C]// Proceedings of the 22nd Digital Avionics Systems Conference, Indianapolis, United States. USA: IEEE, 2003: 6.B.4/1-6. B.4/7.
- [4] Valenti M, Schouwenaars T, Kuwata Y, *et al.* Implementation of a manned vehicle-UAV mission system [R]// AIAA-2004-5142, 2004. USA: AIAA, 2004.
- [5] Schouwenaars T, Valenti M, Feron E, *et al.* Linear programming and language processing for human/unmanned aerial vehicle team missions [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics (S0731-5090), 2006, 29(2): 303-313.
- [6] Myung H, James K, Takeo K. Efficient Two-Phase 3D Motion Planning for Small Fixed Wing UAVs [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy. USA: IEEE, 2007: 1035-1041.
- [7] Chingtham T S, Sahoo G, Ghose M K. An unmanned aerial vehicle as human-assistant robotics system [C]// IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, Coimbatore, India. USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [8] 任鹏, 高晓光. 基于 AH / UAV 编队协同侦察打击的作战效能研究 [J]. 飞行力学, 2011, 29(3): 92-96.
- [9] 符小卫, 高晓光. 基于贝叶斯优化的三维飞行航迹规划 [J]. 兵工学报, 2007, 28(11): 1340-1345.
- [10] 彭建亮, 孙秀霞, 朱凡, 张健. 基于遗传算法的多约束三维航迹规划方法研究 [C]// 第 27 届中国控制会议, 中国, 昆明. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 94-97.
- [11] 沈志华, 赵英凯, 王晓荣. 基于小生境伪并行遗传算法的自主机器人路径优化 [J]. 现代电子技术, 2005, 206(15): 85-87, 90.
- [12] 李霞, 魏瑞轩, 周军, 等. 基于改进遗传算法的无人飞行器三维路径规划 [J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 343-348.
- [13] 张春梅, 武钧, 梁治安. 用自适应伪并行遗传算法求解双准则三维运输问题 [J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(11): 21-28.

《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报), 第一次给出了我国 5600 余种中外文学学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续三年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!