

引入优化算子的无人机遗传航路规划算法研究*

潘 亮¹ ,朱华勇 ,沈林成 ,常文森

(国防科技大学机电工程与自动化学院 ,湖南 长沙 410073)

摘要 :在大范围真实地形环境中规划出满足任务要求、导航、安全性等约束的较优航路 ,对提高无人机(UAV)的武器系统性能有重要意义。在基于直接航路编码的遗传算法中引入优化操作算子 ,将复杂约束合理地应用于遗传进化过程 ,可以较好地克服一般遗传操作的不足。采用均匀设计的试验方法确定较优的控制参数 ,并通过算例验证了算法的有效性。

关键词 :无人机 ,航路规划 ,遗传算法 ,优化算子 ,均匀设计

中图分类号 :TP24 文献标识码 :A

Using Local Optimization Operator in Genetic Algorithm for UAV Route Planning Problem

PAN Liang ,ZHU Hua-yong ,SHEN Lin-cheng ,CHANG Wen-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation , National Univ. of Defense Technology ,Changsha 410073 , China)

Abstract :To get the optimal flight routes which satisfy constraints such as mission request , navigation and security in large scope and real terrain important to enhance the unmanned aerial vehicle(UAV)'s weapon system efficiency. An improved genetic algorithm which based on direct encoding method of individual and local optimization operator is represented to solve the route planning problem. By applying the complex constraints to the evolutionary process , the algorithm can overcome the drawbacks of canonical GA. The control parameters are selected by the uniform design of the experimental method , and the result of examples has proved that the algorithm is effective.

Key words :UAV ,route planning ,genetic algorithm ,optimization operator ,uniform design

无人机(UAV)是现代战争中实施侦察、干扰和精确打击的有效武器。由于无人机遂行作战任务的留空时间较长 ,而惯导导航误差随时间的平方增长 ,要完成既定的作战任务 ,需要沿航路安排 GPS 点或地形匹配区(TERCOM)以修正惯导漂移误差 ,同时为了提高 UAV 的生存概率 ,还需要采用地形跟踪等手段以规避威胁。典型的作战任务由多架 UAV 构成 ,规划人员根据任务要求确定每架 UAV 从出发点到目标点的航路 ,以图形方式显示规划信息并提供良好交互手段的航路规划系统可以有效地提高规划效率 ,但即使这样 ,要交互完成满足众多约束条件的单条航路的工作量也极大。因此 ,在规划环境确定后 ,能有效完成规划要求并将生成的航路提交给规划人员的自动航路算法是 UAV 航路规划系统的重要组成部分。

1 问题描述

UAV 航路规划属于路径规划问题。最小代价路径规划问题是人工智能领域的经典问题之一 ,如 TSP 问题、移动机器人路径规划问题 ,针对具体的问题背景和优化指标也提出了基于可视图(visibility graph)的 Dijkstra 算法^[1]、动态规划法、混合整数规划法、势场法、A* 及改进的算法(如 A_ε^[2]、ABC^[3])、DIRECT 算法^[4]、模拟退火算法、遗传算法等。

UAV 发射后按导航系统装订的指令沿预先规划的参考航路飞行 ,可以将参考航路看作包括侧向机动、纵向机动、地形匹配、地形跟踪等动作的事件序列。由于航程较长 ,所经过的地理区域广阔 ,在对抗环

* 收稿日期 :2003 - 05 - 24
基金项目 :国家 973 项目资助(2003 - 5130801 - 1 - 3)
作者简介 :潘亮(1973—)男 ,博士生。

境中要保证对目标的攻击精度必须在飞行过程中采用自主性较高的地形匹配技术以修正惯导误差。UAV 航路规划就是在给定发射点、攻击目标和攻击方向后确定满足飞行性能约束、战略和战术限制、突防性能和攻击精度要求的航路事件序列及事件控制参数,最大允许事件数量受导航系统内存容量限制。由于地形跟踪方案较特殊,可在其他事件确定后根据穿越威胁的情况单独设计。若以导航点定义飞行动作事件,定义航路为从发射点到目标点的导航点序列,则问题可描述为:

$$\min F(r) = \min [f_1(r), f_2(r), f_3(r), f_4(r)]$$

$$\text{st } h_i(r), i = 1 \dots 8$$

其中,各项物理意义如下:

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| $f_1(r)$: 到目标点的导航误差 | $f_2(r)$: 航程 |
| $f_3(r)$: 机动次数 | $f_4(r)$: 损失概率 |
| $h_1(r)$: 燃油约束 | $h_2(r)$: 不穿越禁飞区 |
| $h_3(r)$: 最小航段距离约束 | $h_4(r)$: 侧向机动性能约束 |
| $h_5(r)$: 纵向机动性能约束 | $h_6(r)$: TERCOM 相关约束 |
| $h_7(r)$: 最小安全飞行高度约束 | $h_8(r)$: 攻击精度 |

纯惯导和经单次不同精度误差校正后导航误差及飞行管道(飞行包络线)的变化趋势如图 1 所示。

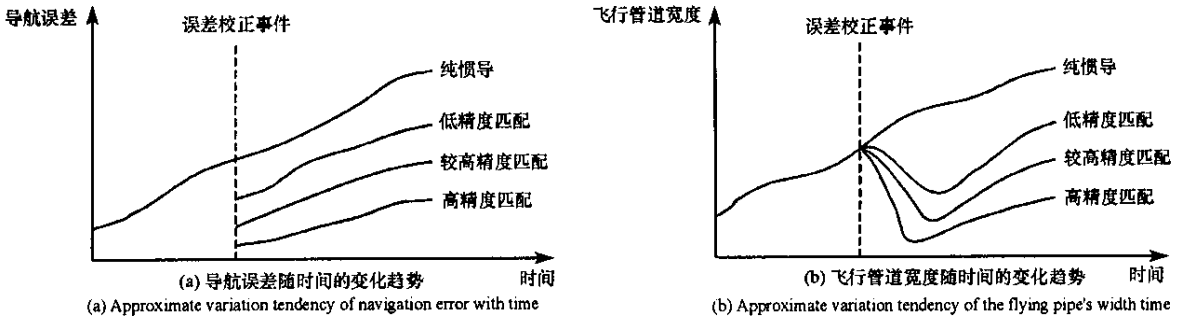


图 1 导航误差和飞行管道宽度的变化趋势

Fig.1 Approximate variation tendency of navigation error and the flying pipe's width with time

在规划环境确定后,TERCOM 的分布与导航精度和飞行方向有关。若不考虑禁飞区、避飞区和威胁分布,则安排或改变侧向机动事件对 TERCOM 事件及纵向机动事件的影响如图 2 所示,其中箭头方向表

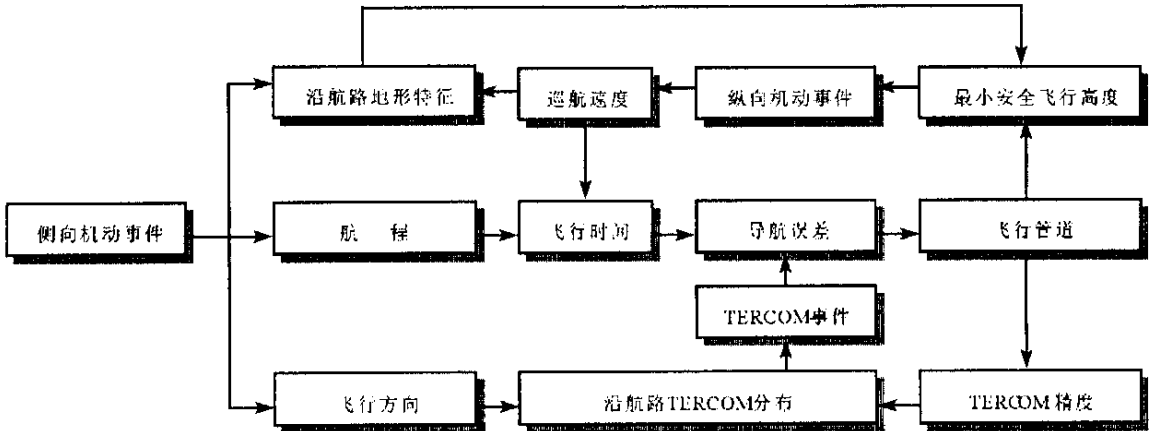


图 2 侧向机动对其他事件的影响

Fig.2 The affect of turn maneuvers event to others

示影响传播的方向。

从图 2 中可看出航路规划应当是迭代的闭环设计过程。与战术航路规划问题不同的是,由于事件之间以及事件控制参数与地形环境之间呈紧耦合的关系,各种事件发生的次数和顺序是未知的,在计算资源和时间有限的前提下,要在大范围、高精度的复杂地形环境中搜索可行航路都很困难,因此必须采用合适分辨率的环境模型和规划算法以有效降低问题的复杂性并提高规划效率。

2 规划环境模型

规划环境包括规划数据及相应的访问、计算接口。规划数据主要包括格网类型数据和矢量类型数据。格网类型的高精度地形数据和预处理数据在空间数据库中采用“图层”的方式管理。所谓图层(layer)就是用户按照一定的需要或标准把相关的物体组合起来,形成具有特定物理意义的的数据组合,是将包含多种地理信息的复杂空间数据层次化的一种途径。图层的概念对于抽象意义上的数据,如地形高程、景象、地形适配性分析结果、景象适配性分析结果等也同样适用。由于地形和景象特征分析的计算量很大,为提高规划响应速度和重用分析结果,可以在合适的空间粒度和方向粒度下按照规划要求的若干典型分析窗口进行规划前的预处理,形成多张特征分析图层,从而将规划中的准则计算过程转化为数据查询过程。此外还按照一定的方法生成索引图以提高多张专题图之间的查询速度。当规划位置或方向在分析粒度间隔内时,采用可以反映实际物理过程的方法插值计算。对规划数据的访问有两种方式(1)以空间数据库作为数据支撑环境,在规划过程中通过 C/S 方式访问数据,其缺点是服务器性能和可靠性以及网络带宽将成为系统的瓶颈(2)空间数据库根据规划系统的资源及任务要求,在规划前按照指定的规格通过适当降低空间分辨率的方法制作组合地图,以减小对外部数据源的依赖。组合地图主要包括大地坐标系下在规划区空间范围内一致连续的格网数据(地形高程图层、多层地形适配性分析及索引图层、多层威胁量化图层等)和矢量数据(禁/避飞区图层、行政境界图层等),它是在指定分辨率下完成航路规划所需的最小数据集。

3 基于遗传算法的 UAV 航路规划算法

从优化的角度来看,遗传算法是基于评价函数的零阶优化方法,能够处理定义在离散空间、连续空间或混合搜索空间的函数优化和组合优化问题。遗传算法的基本原理和框架可参见文献[5~7],算法设计的关键环节包括编码方式的选择、适应度函数设计、群体初始化、操作算子设计和控制参数选择。对 UAV 航路规划问题采用三维空间中直接随机搜索的方法找到可行解的概率很低,要想有效提高算法性能,就必须针对问题的特点引入领域知识和启发信息。

3.1 航路编码方式

以导航点(包括经纬高、事件类型、飞行速度、控制参数等)表达基本事件,导航点双向链表表达航路。和二进制编码方式相比,其物理意义明确,便于计算、操作和引入领域知识,降低了编码解码的复杂性,提高了计算效率。文献[8]也从理论上分析了与问题表达相一致的编码方式的优点。

3.2 适应度函数设计

与其他规划问题不同的是:由于约束条件较强,可以估计可行解集是问题空间很小的子集,其分布和形态都是未知的,这可从初始化和演化的前期阶段群体中几乎没有可行解的现象得以印证。对于有约束的优化问题,可以采用罚函数对不满足约束的个体加以惩罚,但这种方法有明显的缺点^[9],而且不能反映约束之间的耦合关系。由于不可行解的组合情况非常多,当约束条件较多时,罚函数会引入过多的主观因素,如函数的设计、权重的选取等。要使适应度函数有足够的分辨力,首先通过操作算子保证以下性质,从而将问题转化为弱约束的多目标优化问题:

- 所有个体满足 $h_1 \sim h_4$ 项约束
- 所有个体所安排的 TERCOM 满足 h_6
- 所有 TERCOM 之前的航段满足 h_5, h_7

然后采用定性和定量相结合的方法确定适应度函数的形式。用遗传算法求解多目标优化问题有聚合函

数、基于 Pareto 优解概念等方法^[10]。本文采用了聚合函数方法,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,是一种在搜索前决策的方法,目标函数反映了决策者的意图和偏好。由于本问题很难定义对所有状态都有效的单一目标函数,因此根据个体满足约束的不同情况对可行解和不可行解分别设计相应的目标函数,以优化指标作为可行解的评价因素,而对不可行解则只评价其已满足约束的航段。在设计时需要考虑评价因素的量纲和可能的取值范围,以保证适应值能比较准确地反映个体之间的优劣。

- 对满足 h_8 且最后一个 TERCOM 之后的航段满足 h_5, h_7 的可行个体 r

$$fitness_1(r) = \omega_1[5000 - f_1(r)] + \omega_2[\pi(f_2(r), f_3(r))] + \omega_3 f_4(r)$$

其中, $\pi(f_2(r), f_3(r))$ 是 $f_2(r), f_3(r)$ 的综合评价函数, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 是各目标的权重。

- 对不满足 h_8 的个体 r

$$fitness_2(r) = \omega_1[5000 - f_1(r)] + \omega_2[\pi(f'_2(r), f'_3(r))] + \alpha \omega_3 f'_4(r)$$

其中 $f'_2(r), f'_3(r), f'_4(r)$ 是最后一个 TERCOM 之前可行航段的航程、机动次数和损失概率, α 是小于 1 的正数。

- 对满足 h_8 , 但最后一个 TERCOM 之后的航段不满足 h_5 或 h_7 的个体, 先删除最后一个 TERCOM, 再按照 $fitness_2(r)$ 计算。这可有效降低此类不可行解的适应值, 并增加变异操作的启发信息。

由于在约束条件限制下, 最差的不可行解到目标点的导航误差不会超过 5000m, 并且不可行解的 $f_1(r)$ 总是大于可行解的 $f_1(r)$, 因此式中以 $5000 - f_1(r)$ 作为评价指标之一, 以体现“个体越优, 评价值越大”的原则。由于所定义的适应度函数是对可行解和不可行解的可行部分分别进行评价, 因此算法总体演化趋势是先搜索可行解, 然后优化可行解。

3.3 群体初始化方法

算法提供了两种初始化方法: (1) 在规划区范围内随机生成航路个体; (2) 在交互规划限定的范围内进行随机扰动初始化。两种方法都通过修正算子(见 3.4 节)以满足 $h_1 \sim h_4$ 项约束。对于第二种方法, 不同的限定范围对算法的影响见算例分析。

3.4 操作算子

(1) 选择算子: 采用最优个体保留的赌轮策略, 保证了最优个体适应值是单调递增的。对于多目标优化问题, 这种策略可以有效提高算法效率。对于可能出现较优个体在群体中过度繁殖而导致算法过早收敛的情况, 可以通过选择合适的控制参数保持个体多样性。

(2) 修正算子: 参与初始化、交叉和变异过程, 根据个体不满足约束的情况, 通过随机移动、删除转弯点等操作调整相关航段, 保证新生成的个体满足 $h_1 \sim h_4$ 项约束及导航点间的方向相关约束, 同时保证个体在规划区或交互规划限定的范围内。

(3) 优化算子: 是确定性算法, 参与初始化、交叉和变异过程, 是算法中计算量最大的过程, 也是设计的重点环节。它将图 2 的闭环设计过程分解成两个规划层次: ① 通过交叉和变异算子调整转弯点以设计航路走向; ② 通过优化算子根据给定的航路走向安排 TERCOM 和高度变化点。优化算子综合考虑了 h_3, h_5, h_6 等项约束及 TERCOM 对导航误差和安全飞行高度的影响, 通过使用多种规划策略使算子不受违反约束的 TERCOM 和高度变化点的影响以保证结果的正确性; 保证所安排的 TERCOM 满足 h_2, h_3, h_6 , 并且最后一个 TERCOM 之前的所有航段满足 h_7 ; 采用最保守的策略以保证所安排的高度变化点在最坏情况下满足 h_5, h_7 。这样设计的航路剖面虽不是最优的, 但剖面优化却可解耦成算法结束后单独的设计过程, 从而可以减小计算量和算子的复杂性。优化算子的结果反映出多种因素对航路的综合影响, 据此评价航路显然比按照违反约束的情况评价提供了更多正确的信息, 并可以根据 TERCOM 的安排情况为变异操作提供启发信息。

(4) 交叉算子: 采用随机单点交叉的方法, 交叉位置只选择在转弯点, 以组合出新的航路走向。对每个新生成的个体使用修正算子。若修正失败, 则直接将一个父代个体复制到子代, 否则使用优化算子, 以保证下一步变异操作中启发信息的正确性。

(5) 变异算子: 通过随机移动、增加、删除转弯点以及调整转弯点参数等操作改变航路走向。由于优

化算子的性质,可使与最后一个 TERCOM 相关的转弯点有较高的变异概率,对新生成的个体必须使用修正算子。若修正失败,则直接将父代个体复制到子代,否则使用优化算子,以保证个体适应值计算的正确性。

3.5 控制参数选择

由于群体中包含大量不可行解,当变异或交叉概率较小,算法的搜索空间也较小,算法可能找不到可行解。而变异或交叉概率太大,会使计算时间增长。本文采用均匀设计的试验方法考察在全局随机初始化条件下交叉概率和变异概率对算法的影响,每个因素考虑 [0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95] 12 个水平,按照 U_{12}^* 及其使用表^[11] 确定参数组合。组合地图数据量为 210MB,群体规模 50,最大演化代数 50,每组参数运行 20 次,在 Intel 1.4GHz 主频、512MB 内存的测试环境下,平均每次运行时间 15 ~ 40min。典型的变化趋势如图 3 所示。综合考虑解的质量、收敛性和计算时间,采用交叉概率为 0.5,变异概率为 0.7。

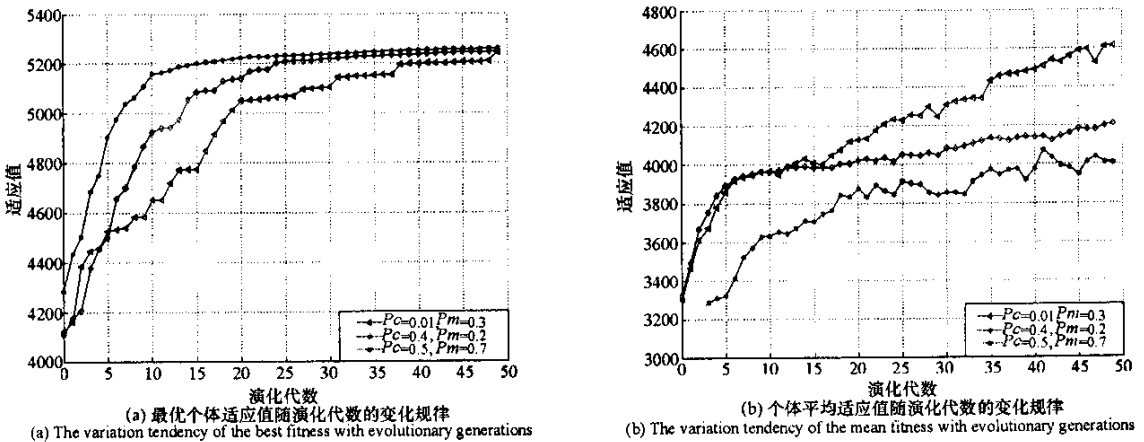


图 3 导航误差和飞行管道宽度的变化趋势
 Fig.3 Performance of algorithm with different control parameters

4 算例及分析

组合地图采用大地坐标系下 15s 等纬差的 6480 × 6000 的规则 DEM 格网数据,以及相同地理范围内多层 TERCOM 分析及索引图层和威胁量化图层,数据量约为 210MB。出发点为目标点的大圆距离约为 1000km。在无优化算子、使用优化算子在规划区范围内搜索以及使用优化算子并根据已有的部分规划结果交互限定 100km 和 200km 的规划走廊等四种情况下各运行 20 次,最优个体平均适应值变化趋势如图 4 所示。

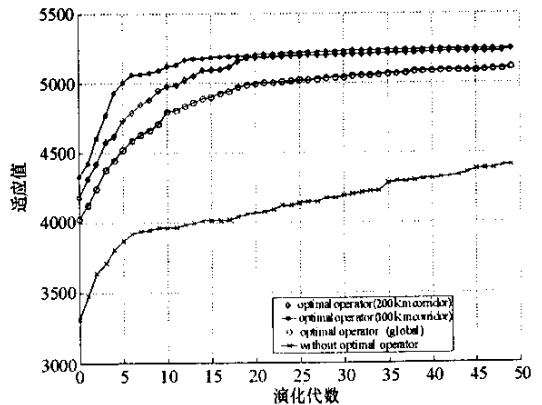


图 4 四种情况下最优个体平均适应值变化趋势
 Fig.4 The variation tendency of the best fitness with evolutionary generations in different planning bounds

表1 四种情况下算法性能比较

Tab.1 Performance of algorithm in four different planning bounds

	找到可行 解的次数	Max(最优个 体适应值)	Max(最优个体 平均值适应值)	平均运行 时间(min)
无优化算子	0	4500	4412	10
优化算子 全局搜索	14	5236	5172	22
优化算子 限定规划走廊 100km	20	5371	5276	13
优化算子 限定规划走廊 200km	20	5371	5276	17

不同情况下算法的性能如表 1 所示。可以看出,使用优化算子可以在合理的时间内有效提高算法性能,并且通过合理限定规划范围,可以进一步提高算法效率和解的质量。在实际规划中可以结合交互规划和自动规划形成闭环设计过程,从而达到设计和优化可行航路的目的。

5 结论

本文的方法表明,通过优化算子引入领域知识并结合修正算子将强约束问题转化为弱约束问题,可以有效解决复杂约束下大范围真实地形环境中无人机航路规划问题,并且在规划中合理利用规划人员把握全局信息的能力限制规划范围,可以非常有效地提高遗传算法的搜索效率和求解质量,减少随机操作的盲目性。

参考文献:

- [1] Jungert E, Holmes P D. A Knowledge-based Approach to the Shortest Path Problem in a Digitized Map[R]. IEEE Workshop on Visual Languages, 1988.
- [2] Pearl J. A_ε — An Algorithm Using Search Effort Estimates[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(4).
- [3] Alechina N, Logan B. State Space Search with Prioritised Soft Constraints[J]. Applied Intelligence, 2001, 14(3).
- [4] Bartholomew-Biggs M C. Using DIRECT to Solve an Aircraft Routing Problem[J]. Computational Optimization and Applications, 2002, 23(3).
- [5] 王正志, 薄涛. 进化计算[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [6] 刘勇, 康立山, 等. 非数值并行算法(第二册)——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] 周明, 等. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [8] Chung S, Perez R. Why Is Problem-dependent and High-level Representation Scheme Better in a Genetic Algorithm[C]. ACM, ISBN 0 - 89791 - 850 - 9, 1997.
- [9] Calos A, Coello C. A Survey of Constraint Handling Techniques Used with Evolutionary Algorithms[R]. <http://citeseer.nj.nec.com>.
- [10] Calos A, Coello C. A Comprehensive Survey of Evolutionary-based Multiobjective Optimization Techniques[J]. Knowledge and Information Systems, 1999(3).
- [11] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

