

基于量子粒子群优化的在线航迹规划

过金超^{1,2} 黄心汉¹ 王延峰² 崔光照²

(华中科技大学 武汉 430074)¹ (河南省信息化电器重点实验室 郑州 450002)²

摘要 现代战场中,环境信息是变化的,飞行器很难预先获得精确的全局环境信息,因此要求无人飞行器具有实时的航迹规划能力,采用量子粒子群优化算法,将约束条件和搜索算法相结合,有效解决了简单粒子群算法在高维空间中易陷入局部最优点的问题;同时,根据地形障碍、敌方防御雷达、防空火力等威胁以及禁飞区的分布情况,引入最小威胁面的概念,利用B-Spline插值逼近最小威胁面中的三维航迹在二维水平面内的投影,从而将三维曲线的规划问题简化为二维平面中控制点的寻优问题,简化了问题复杂度,提高了计算效率。仿真结果表明该方法可以满足在线航迹规划的要求。

关键词 无人飞行器,在线航迹规划,量子粒子群优化,最小威胁面

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A

Online Route Planning Based on Quantum Particle Swarm Optimization

GUO Jin-chao^{1,2} HUANG Xin-han¹ WANG Yan-feng² CUI Guang-zhao²

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)¹

(Information Based Electrical Appliance Lab of Henan Province, Zhengzhou 450002, China)²

Abstract With regard to modern warfare, the environmental information is changing and it's difficult to obtain the global environmental information in advance, so the real-time flight route planning capabilities of unmanned aircraft is required. Quantum particle swarm optimization was introduced to solve this optimization problem. Incorporating constraints into the algorithm, the local trap problem of simple PSO algorithm was solved effectively. Meanwhile, according to the threats distribution of terrain obstacles, adversarial defense radar sites and unexpected surface-to-air missile (SAM) sites, surface of minimum risk was introduced and used to form the searching space. B-spline curves were used to approach the horizon projection of the 3-D route and this simplified the original problem to a two dimension optimization problem, thus the complexity of the optimization problem was decreased and efficiency was improved. The simulation results show that this method can meet the online route planning.

Keywords Unmanned aircraft, Online route planning, Quantum particle swarm optimization, Surface of minimum risk

飞行器航迹规划就是指综合考虑飞行器机动性能、突防概率、碰地概率和飞行时间等约束因素,寻找一条从起始点到目标点的最优或可行的飞行轨迹^[2]。在防空体系日益完善的现代战争中,航迹规划是提高飞行器作战效能,实施远程精确打击的有效手段^[3]。由于敌方环境的复杂性和动态性,无人飞行器不可能预先完全获得敌方环境信息,这就要求无人飞行器必须在未知环境中具备实时航迹规划的能力。假设无人飞行器自身带有某种环境探测传感器(这里假设为雷达),来获取飞行器自身环境的局部信息。目前主要采用的方法可分为全局的和局部的路径规划方法。全局路径规划方法有最速下降法、神经网络法、遗传算法、蚁群算法、最优控制法和Voronoi图法等^[3-5];局部路径规划方法主要有人工势场法等^[8]。这些方法各有优缺点,其优劣主要取决于方法的计算快速性及所求解的最优性。文献[8]给出了一种基于进化算法的离线和在线航迹搜索算法;文献[9]针对动态威胁提出了

基于进化算法的多航迹规划策略。

本文通过对上述文献的研究,在文献[8]的基础上,结合最小安全曲面的概念^[1],引入量子粒子群优化(QPSO)算法,不但使生成的航迹能满足各种航迹的约束条件,而且能够根据环境信息自动地调节航迹,符合环境实时变化的要求,实现了实时局部优化航迹的搜索。

1 量子粒子群优化算法

粒子群优化(PSO, Particle Swarm Optimization)算法是一种基于群体智能的演化算法,最早由Kennedy和Eberhart于1995年提出,其通过潜在解(粒子)以随机的速度追随当前最优粒子,在解空间中进行搜索来实现寻优。但标准PSO算法具有搜索空间有限、容易陷入局部最优的缺点,在高维空间中更是如此,目前已有多种改进的PSO算法。但是这些算法大多着眼于PSO的参数选择或某个参数的动态修改策略,故

到稿日期:2008-12-22 返修日期:2009-03-05 本文受国家自然科学基金(60773122)资助。

过金超(1978-),男,博士研究生,研究方向为智能控制及信息融合等,E-mail:gjc@zzuli.edu.cn;黄心汉(1946-),男,博士生导师,研究方向为机器人控制及信息融合等;王延峰(1973-),男,博士,研究方向为智能优化算法设计;崔光照 教授,研究方向为无线传感网络。

难以克服标准 PSO 算法易陷入局部极值的固有弱点。本文采用多量子粒子群优化(QPSO, Quantum Particle Swarm Optimization)方法^[6,7],同时引入变异参数,解决了 PSO 算法的局部收敛问题,同时提高了算法的收敛速度。

1.1 优化算法设计

文献[10]认为,生物群体中个体的思维是不确定的,在很大程度上就像粒子有量子行为,因此把量子理论应用于粒子群算法,提出了量子粒子群算法(QPSO),其中粒子的进化公式为:

$$mbest = r \times P_{best} + (1-r) \times P_{gbest}, i=1, \dots, N \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{\alpha |x_{id} - mbest|}, d=1, \dots, D \quad (2)$$

$$x_{id} = P_{id} \pm L \times \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (3)$$

其中, N 为粒子数, D 为粒子维数, r 和 u 为随机数。 $mbest$ 是粒子群 P_{best} 与 P_{gbest} 之间的随机位置, x_{id} 为量子行为下粒子的新状态。 α 为 QPSO 的收缩扩张系数,一般取为:

$$\alpha = \alpha_{min} + (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \times (Gen_{max} - T) / Gen_{max} \quad (4)$$

在 QPSO 算法中,只有一个参数 α 决定粒子的收敛速度和位置,因此比基本 PSO 算法更具操作性。

1.2 代价函数设计

在线航迹规划过程的代价函数主要考虑各种约束条件,寻求各种约束集的一个最小量化指标,在考虑了地形障碍及威胁信息后,考虑总的路径长度最短以及最小转弯半径的约束问题;同时,在目标函数中加入势场函数,从而使无人飞行器从初始点出发后,能够逐渐地向目标点靠近。总的代价函数为:

$$f = \sum_{i=1}^2 \alpha_i f_i \quad (5)$$

其中, α_i 为权重系数, f_i 为约束项,具体定义如下:

约束项 f_1 为路径长度约束:

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (6)$$

约束项 f_2 主要用来提供满足飞行器性能的最小转弯半径^[8]。如图 1 所示,路径曲线上两个连续控制点间的夹角 θ 被用作评判的指标,当 θ 小于一预设值时,一个惩罚项就被加到了代价函数中。这样就大大简化了最小转弯半径的求解过程,提高了计算速度,缩短了优化过程。



图 1 控制点间的连线夹角

约束项 f_3 为一个势函数(Potential function):

$$f_3 = \ln\left(\frac{r_2 + c * r_0}{r_1 + c * r_0}\right) \quad (7)$$

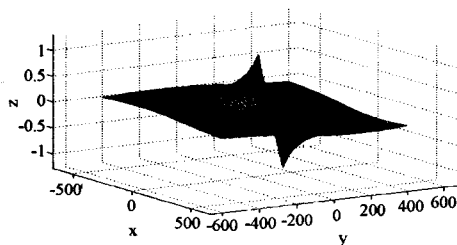


图 2 某典型势场函数三维空间图

r_1 是当前曲线最后一个点距离初始点的距离, r_2 是当前

曲线最后一个点距离目标点的距离, r_0 是初始点距离目标点的距离, c 为一固定常数。势函数将引导飞行器从出发点逐渐的接近目标点。图 2 为某势函数的三维空间表示。

1.3 QPSO 算法实现

利用 QPSO 算法进行局部寻优的流程如下:

- 1) 在局部环境中构建解空间, x 取固定步长, y 为待优化参数;
- 2) 设置量子子群的粒子个数、最大迭代步长等参数,初始化量子粒子在解空间中的随机位置;
- 3) 求取基于各控制点的 B-Spline 的中间点;
- 4) 根据式(5)计算各粒子的代价函数值;
- 5) 根据式(1)一式(3)更新粒子群位置,获取其最优解 $gbest$;
- 6) 判断是否满足结束条件。不满足返回 3); 否则停止迭代。

迭代结束后,用量子粒子群求取的 $gbest$ 作为飞行器的航迹控制点,并用 B-Spline 插值对航迹进行平滑。从而得到飞行器的三维航迹。对应的流程图如图 3 所示。

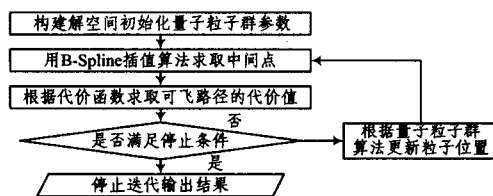


图 3 量子粒子群算法流程图

2 在线航迹实时规划策略

由于飞行器自身所带雷达的测量范围是有限的,因此,每次只能在雷达的探测范围内对飞行器的航迹进行规划,如图 4 所示,实曲线代表了规划的路径,由 4 个连续的 B-Spline 线段所组成(1-3, 3-5, 5-7, 7-8),点 1 为起始点,点 8 为目标点,每次规划只在一个半径为 R 的局部圆形区域内进行,虚线表示的圆形区域表示飞行器对环境的感知范围,每次在前一次规划路径的 2/3 长度处,以前一次规划的终点为起点展开第二次规划(对应的圆心为小圆 1, 3, 5, 7)。每次规划的终点分别为实心黑圆(点 3, 5, 7),当目标点(点 8)位于无人飞行器的探测范围内时,终止规划。

系统航迹规划的流程图如图 5 所示。

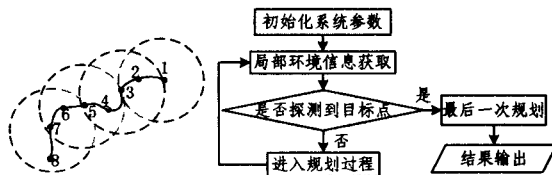


图 4 在线规划示意图

图 5 航迹规划系统流程图

3 仿真分析

规划对象假定为面积 $1500 \text{ km} \times 1500 \text{ km}$ 的区域,对该区域进行栅格划分,栅格间距为 20 km ,则地图区域为 75×75 单位。假设每次局部规划有 4 个控制点,控制点间距为 50 km ,则 x 方向的步进为 2.5 个栅格单位(以下均为无量纲栅格表示)。一个局部地图的规划平面表示如图 6 所示。针对不同的地图和不同的优化参数,通过 Matlab 仿真,仿真结果如图 7—图 14 所示。

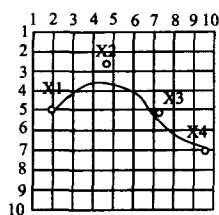


图6 局部地图规划平面表示

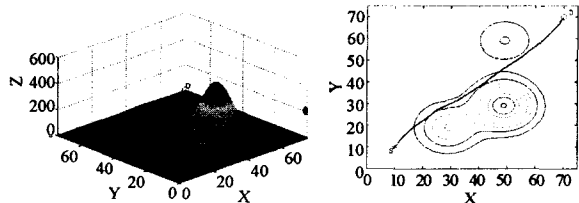


图7 $S(10, 10, 5), D(70, 70, 5)$; 约束项 f_1 的权重 α_1 为 0.38, 约束项 f_2 的权重 α_2 为 0.1, 约束项 f_3 的权重 α_3 为 0.52 时, 在地图 1 上产生的路径

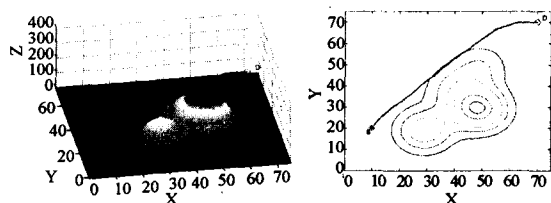


图9 $S(10, 20, 5), D(70, 70, 5)$; 约束项 f_1 的权重 α_1 为 0.38, 约束项 f_2 的权重 α_2 为 0.1, 约束项 f_3 的权重 α_3 为 0.52 时, 在地图 2 上产生的路径

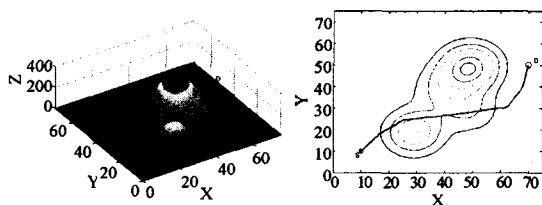


图11 $S(10, 10, 5), D(70, 50, 5)$; 约束项 f_1 的权重 α_1 为 0.4, 约束项 f_2 的权重 α_2 为 0.1, 约束项 f_3 的权重 α_3 为 0.5 时, 在地图 2 上产生的路径

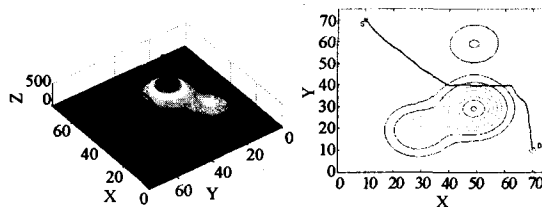


图13 $S(10, 70, 5), D(70, 10, 5)$; 约束项 f_1 的权重 α_1 为 0.4, 约束项 f_2 的权重 α_2 为 0.1, 约束项 f_3 的权重 α_3 为 0.5 时, 在地图 1 上产生的路径

结束语 针对三维航迹在线规划问题, 本文基于最小威胁曲面的概念, 利用 B-Spline 函数逼近航迹在水平面内的投影, 给出了一种基于量子粒子群优化的在线航迹规划方法。本方法克服了简单粒子群算法在高维空间寻优过程中易陷入局部最优的缺点, 提高了搜索效率。采用上述方法, 通过减少局部控制点、在代价函数中引入势能函数等来实现对飞行器航迹的实时规划, 在线得到了符合各种约束条件的三维航迹。用这种方法得到的航迹是一种在线的次优解。

参考文献

- [1] Menon P K A, Kim E, Cheng V H L. Optimal Trajectory Synthesis for Terrain-Following Flight [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1991, 14(4): 807-813
- [2] 李思海, 白存儒. 基于遗传算法的飞行器航迹规划研究[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(4): 147-151
- [3] 高晖, 陈欣, 夏云程. 无人机航迹规划综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 35-38
- [4] 刘砚菊, 杨青川, 辜吟吟. 蚁群算法在机器人路径规划中的应用研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(5): 263-265
- [5] 唐强, 朱志强, 王建元. 一种用于低空飞行的在线航迹重规划方法[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(2): 271-275
- [6] 李士勇, 李盼池. 求解连续空间优化问题的量子粒子群算法[J]. 量子电子学报, 2007(5): 569-574
- [7] 谢景权, 须文波, 孙俊. 基于量子粒子群算法的医学图像配准[J]. 计算机工程与设计, 2008(2): 430-432
- [8] Nikolos I K, et al. Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation [J]. IEEE Transactions on System, 2003(33): 898-912
- [9] 郑昌文, 李磊徐, 帆江, 等. 基于进化计算的无人飞行器多航迹规划[J]. 宇航学报, 2005, 26(2): 223-227
- [10] Sun J, Feng B, Xu W B. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [C]// USA: Proceedings of 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004: 325-331

(上接第 233 页)

- [9] 宾雪莲, 杨玉海, 金士尧. 一种有限优先级的静态优先级分配算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 815-822
- [10] Doytchinov B D, Lehoczy J P, Shreve S E. Real-time queues in heavy traffic with earliest-deadline-first queue discipline [J]. Annals of Applied Probability (SI050-5164), 2001, 11(2): 332-378
- [11] Hansen J P, Zhu H, Lehoczy J P, et al. Quantized EDF Schedu-

- ling in a Stochastic Environment [C]// Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2002: 94
- [12] Li Wenming, Kavi K, Akl R. A Non-preemptive Scheduling Algorithm for Soft Real-time Systems [J]. Computers & Electrical Engineering (S0045-7906), 2007, 33(1): 12-29
- [13] Baker T P. Stack-based Scheduling of Realtime Processes [J]. Real-Time Systems (S0922-6443), 1991, 3(1): 67-99