

文章编号:1005-2615(2001)02-0135-04

无人机航路规划研究

高 晖 陈 欣 夏云程

(南京航空航天大学自动化学院 南京,210016)

摘要 无人机航路规划的目的是无人机具有对复杂任务进行快速规划或重规划的能力,其中快速而有效的重规划尤其重要。在无人机飞行任务执行过程中,无人机需要根据局部地形、地貌、障碍、威胁等信息以及飞机本身机动能力的限制,实时地计算出飞行航路,并跟踪该航路完成飞行任务。本文通过比较各种算法在航路规划应用中的优劣性,提出了 Dynapath(动态规划)算法在无人机航路规划中的应用,给出了仿真结果。仿真结果表明:Dynapath 算法生成的最优参考航路基本上满足无人机任务飞行的要求,获得了良好的飞行品质。

关键词: 无人航天器;动态规划;最优航迹;任务管理;数字地图
中图分类号: V27 **文献标识码:** A

引 言

航路轨迹规划是根据任务目标规划满足约束条件的飞行轨迹。自动航路轨迹规划是无人机(UAV)先进任务规划系统的关键组成部分。轨迹规划的目的是在适当的时间内计算出最优或次最优的飞行轨迹,能使 UAV 回避敌方威胁环境,安全地完成预定任务。美国空军莱特飞行实验室的飞行控制研究所在地面使用实时仿真测试了几个航迹产生器算法,并比较了不同数学方法的优劣^[1]。目前,航路产生器优化算法有:可行性方向算法(Feasible direction algorithm, FDA)、通用动态算法(General dynamic algorithm, GDA)及实时优化算法(Realtime optimization algorithm for dynamic maneuvering and penetration, RoadMAP)。另外人们还尝试使用了 A* 搜索算法、电势理论、神经网络、梯度法等方法,这些方法均没有有效地解决全局最优问题^[2]。本文采用的 Dynapath^[3~5]算法是一种前向链动态规划技术,在大的任务区域内进行航线规划是典型的大范围优化问题, Dynapath 算法

可以得到问题的全局最优解。在许多文献中也提到了 Dynapath 算法,并指出了该算法具有维数爆炸特性的缺陷,但在本文中针对某型高空无人机的航路规划中不存在维数爆炸问题,因而采用 Dynapath 算法可得到全局最优解,仿真结果也证明了这一点。

无人机航路规划一般分为两个层次进行^[6],第一层是整体参考航迹规划;第二层是局部航迹动态优化。整体参考航迹规划是飞行前在地面上进行的。参考航迹的优劣依据预先确定的性能指标,一般根据无人机飞行的任务要求、安全要求、飞行时间和其他战略、战术考虑等因素组合确定,以此最优性能指标为标准,通过动态路径规划算法生成一条最优参考航迹。有了参考航迹之后,无人机在实际飞行中并非一定严格沿着参考航迹来飞,它还要受到参考航迹周围的威胁情况和自身约束条件如最小转弯半径、滚转角、飞行高度、飞行速度等的限制。因此参考航迹生成后还要根据参考航迹周围的威胁情况和无人机自身的性能指标对参考航迹进行局部动态优化,最后生成最优航迹。

基金项目:国家“九五”预研课题基金(编号:A9619-3089)资助项目。

收稿日期:2000-06-15;修订日期:2000-09-08

作者简介:高 晖,男,硕士研究生,1973年2月生;陈 欣,男,副研究员,1958年11月生;夏云程,男,研究员,1937年11月生。

1 威胁建模

在无人机执行任务之前需要对任务进行规划,预装任务航路数据其中包括航路的几何形状特征(航路形状、高度、气候和敌方防空火力等),然后自动生成任务航路的最优航迹。威胁建模是一个复杂的综合问题,它随着威胁的种类、特征和飞行任务的变化而变化。无人机在起飞后将保持一定的高度进入巡航阶段,巡航阶段的威胁主要来自敌方防空火力、气候条件、地形等。可将各种威胁简化建模为具有一定作用半径的圆柱体或圆锥体等几何体的组合。无人机在巡航阶段飞行时一般只考虑它的横侧向运动即水平航迹^[7],因此根据无人机预定的巡航高度进而可简化为平面几何来处理。如图1所示, A 为基地, B 为目标地,1,2,3为无人机在巡航高度 h 时 A , B 之间的威胁区域。高度 h 变化时 A , B 之间的威胁区域也跟着变化。

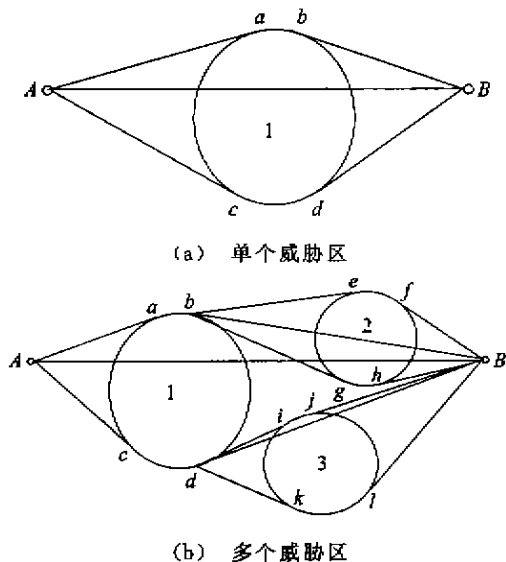


图1 威胁模型和节点及节点代价

2 动态路径规划算法求最优航迹

确定无人机从基地到一个目标地的最优航迹准则是距离最短,并能避开任务飞行区域内各种威胁地区。动态路径规划算法是一种逆序算法,从末端开始,到始端为止,逆向递推,一级一级地求最优解。

2.1 整体参考航迹规划

利用动态规划算法求解最优航迹,首先得根据任务飞行区域内的威胁模型确定从基地到目标地

之间的各级节点及各节点代价,然后以此为基础生成一棵航迹树。

2.1.1 确定各级节点及各节点代价

如图1(a)所示,在基地 A 与目的地 B 之间有1个威胁区。线段 AB 经过威胁区1,则做 Aa , Ac , bB , dB 切圆1,切点 a , b , c , d 为 A 与 B 之间的各级节点。再计算出线段 Aa , Ac , bB , dB 和弧线 ab , cd 的长度作为节点代价。

对于在基地 A 与目的地 B 之间有多个威胁区,可采用从左至右(基地至目的地)的方向依次递推,先对线段 AB 所经过的威胁区按照图1(a)的方法算出切点和切线段、圆弧的长度,得到节点和节点代价,再判断所得到的切线段是否经过威胁区,如经过则对该线段继续采取图1(a)的方法算出切点和切线段、圆弧的长度,得到新一级的节点和节点代价,并对上一级级的节点代价做相应的调整。依次类推则可得到一棵航迹树。如图1(b)所示。在图1(b)中, AB 间有3个威胁区,路径 AB 经过威胁区1,作切线 Aa , Ac , bB , dB ,可求得节点 a , b , c , d ,又 bB , dB 分别经过威胁区2,3,以此类推采用图1(a)的方法可求得新的节点 e , f , g , h , i , j , k , l 。算出线段 Aa , Ac , be , bg , di , dk , fB , hB , jB , lB 和弧线 ab , cd , ef , gh , ij , kl 的长度作为节点代价。在图1(b)中,如假设 jB 经过威胁区2,则对线段 jB 还要继续采用图1(a)的方法作切线求出下一级节点及其节点代价。

需要注意的是:(1)在每一步对线段所经过的威胁区做切线时不必对每个经过的威胁区都作切线,只对最左边的威胁区作切线,然后再判断切线段是否经过威胁区;(2)在多个威胁区有重叠部分时看成一个整体作切线;(3)在针对基地 A 与目的地 B 之间的威胁区进行航路规划时需要确定航迹的上限,方法为对 A , B 之间最外围的威胁区作最外边的切线,再把这些切点和切线段、圆弧的长度作为节点及节点代价与采用前面的方法所得到的节点及节点代价一起构成一棵航迹树,其目的是确保参考航迹的全局最优。

2.1.2 动态规划法求解

在图1中确定各级节点及各节点代价,其最终目的是得到一棵从基地至目的地的航迹树,这棵树与别的树不同之处在于它的树枝全都汇集一点(目的地)。

图1(b)所示的多个威胁区的航迹树见图2。

本文用动态规划算法求解最优航迹的递推方程^[1]为

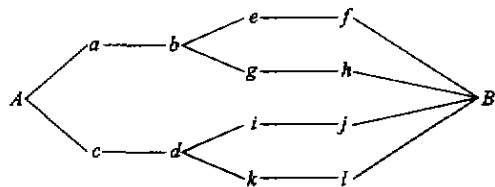


图2 航迹树

$$J_N(x) = \min_{S_N(x)} \{d[x, S_N(x)] + J_{N-1}[S_N(x)]\} \quad (1)$$

$$J_1(x) = d(x, B) \quad (2)$$

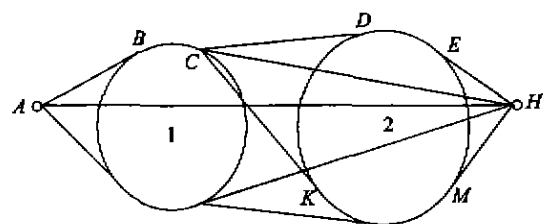
式中: $S_N(x)$ 为各级决策, $d(x, B)$ 为各级距离。

根据递推方程比较树枝端点的性能指标并找到代价最小的节点, 反向搜索其父节点, 一直追溯到初始节点, 最后可得到一条最优参考航迹。

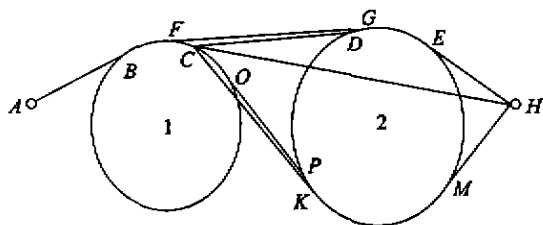
2.2 局部航迹动态优化

有了参考航迹后, 无人机并非沿着参考航迹飞行, 还要根据参考航迹周围的威胁情况和无人机自身的约束条件如最小转弯半径、滚转角等进行局部动态优化。最后得到一条最优航迹。

在图3(a)中可求出 A, H 之间的最优参考航迹为 $ABCDEH$, 很明显参考航迹的 CD 段需要优化, 优化方法为作圆1、圆2的外切线 FG , 见图3(b)。最后可得最优航迹 $ABFGEH$ 。在图3(a)中假设参考航迹为 $ABCKMH$ (仅是假使, $ABCDEH$ 才是最优参考航迹), 则 CK 段需要优化, 优化方法为作圆1、圆2的内切线 OP , 如图3(b)所示, $ABOPMH$ 为优化后的航迹。



(a) 优化前参考航迹



(b) 优化后最优航迹

图3 局部航迹动态优化

由图3(b)也可看出, 最优参考航迹经局部动态优化后所得到的最优航迹由线段和圆弧组成, 且线段与圆弧均为相切关系, 这样无人机在飞行中不

会出现滚转角很大和转弯半径很小的情况, 其次由于本课题所研究的该型无人机高空巡航速度的限制经上述方法优化后的航迹一般满足无人机自身约束条件。

3 最优航迹生成

随着计算机的迅猛发展和广泛应用, 以往是人工在地图上用图钉加连线确定航迹的方式已过时, 现在可以在计算机上编程实现, 由于在 $VC++$ 中可以调用 $MATLAB$, 因此可采用 $MATLAB$ 和 $VC++$ 混合编程。用 $VC++$ 来编写系统的实时处理部分、对端口的操作和应用程序的界面, 而对大量的数据分析、数据统计和图形绘制, 则可采用 $MATLAB$ 来处理。这样既提高了航线规划的精度, 也提高了工作效率。

3.1 最优航迹生成步骤

(1) 输入无人机任务目标点和威胁模型等航路数据。

(2) 根据两目标点之间的威胁数据, 按从左至右(基地至目的地)方向采用图1的方法及1, 2, 3点注意事项确定多级决策过程的各级节点及其代价, 最后得到一棵航迹树。

(3) 用动态路径规划算法逆向递推求解最优参考航迹。

(4) 参考无人机自身性能指标和参考航迹周围的威胁数据对参考航迹进行局部动态优化, 得到最优航迹。

Dynapath 算法产生水平参考航迹的程序流程图如下所示:

Program: Dynapath 算法产生水平参考飞行航迹

Begin:

初始化

调入数字地图、威胁模型, 定义优化控制参数

While 没有到达目标点

定义航迹树起始点及相关信息

While 没有达到一次应该生成的航迹树规模

生成航迹树

End: 生成航迹树

计算代价最小的航迹树终点

While 没有反向搜索到起点

反向搜索航迹树, 形成参考飞行航迹

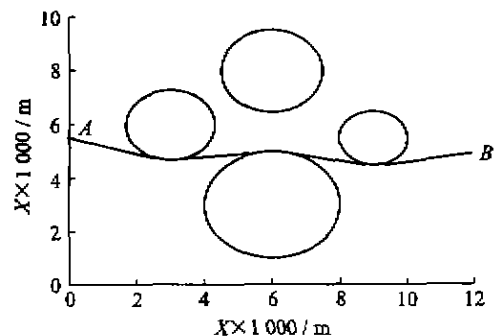
End: 反向搜索

End: 主循环

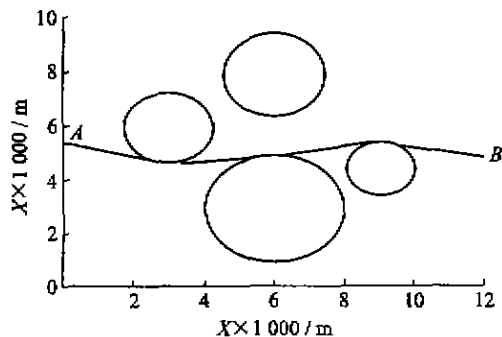
End: Dynapath

3.2 仿真验证

根据本课题无人机飞控系统关键技术研究——无人机航路规划的要求,给定两点和区域威胁模型后能自动生成两点间的最优航迹,基于这一要求,本文在 MATLAB 中进行了仿真。在 MATLAB 中给出 A, B 两点的坐标和 4 个威胁区圆的方程,经 Dynapath 算法计算可得动态优化后的最优航迹(如图 4 所示)。



(a) 结果 1



(b) 结果 2

图 4 仿真结果

在图 4(b)中改变了一下第 4 个威胁区的圆心坐标,最优航迹也相应的改变了。仿真结果表明,通过动态路径规划算法生成一条最优参考航迹,这条航迹保证了整个飞行任务的全局最优特性,以该航迹为参考进行动态航迹优化,可以保证优化结果的最优性,该方法既满足了无人机任务飞行的需要也利于工程上的实现。

参考文献

- 1 胡寿松,王执铨,胡维礼. 最优控制理论与系统[M]. 南京:东南大学出版社,1994. 202~216
- 2 雷仲魁. 无人机飞行监测系统及其策略[J]. 航空计算技术,1994,1:29~33
- 3 Denton R V, Marsh J P. Applications of autopath technology to terrain/obstacle avoidance[J]. NAECON, 1982,82:1373~1377
- 4 Denton R V, Jones J E, Proeber P L. Demonstration of an innovative technique for terrain following/terrain avoidance—the dynapath algorithm[J]. NAECON, 1985,85:522~529
- 5 Denton R V, Pekelsma N, Hagen M, et al. Guidance automation for nap-of-the-earth[C]. In: Flight 7th DASC, 1985. 261~266
- 6 李清. 综合低空飞行与突防系统研究[D]:[学位论文]. 南京:南京航空航天大学,1997. 66~73
- 7 邱晓红,张林昌,高金源. 战术飞行任务的水平航迹快速生成算法[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(6):775~779
- 8 Lemm R D, Feeser K A. TF/TA² system design evaluation[J]. NAECON, 1985,85:530~530

Study on Trajectory Plan for Unmanned Aircraft Vehicle

Gao Hui Chen Xin Xia Yuncheng

(College of Automation Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract The target for unmanned aircraft vehicle (UAV) trajectory programming is to enable UAV to plan and replan complex tasks, of which the rapid and effective replan capability is more important. During implementing the task, the UAV tracks the real-time trajectory to finish the task. It is often calculated in term of terrain, physiognomy, obstacle, threaten, and itself maneuverability. Advantages and disadvantages of various calculating formulas are compared, and a new dynamic plan is presented. Simulation shows that the optimized reference trajectory generated by dynamic path can obtain the best flying quality.

Key words: unmanned spacecraft; dynamic path; optimal trajectory; task management; digital map