面向地面运动目标的无人机协同航迹规划

曾 佳 申功璋 夏 洁 杨凌宇

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 由于现有无人机协同航迹规划主要局限于固定目标,提出了一种面向地面运动目标的无人机协同航迹规划方法.给出面向地面运动目标的无人机协同航迹规划总体方案;采用按时间推进的自规划与同步规划交替进行的协同规划机制,满足协同信息交互存在时间间隔的约束;在规划中将无人机运动与地面目标运动结合并构造适合于地面运动目标的启发函数,利用启发式搜索算法快速生成航迹段;采用分布计算协同变量的方法降低了协同计算量.仿真结果表明该方法可以使无人机通过信息交互和自主分布计算快速生成面向地面运动目标的三维协同航迹,且满足规划的实时性要求.

关 键 词: 无人机; 航迹; 规划; 运动; 目标

中图分类号: V 249

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)07-0887-04

Cooperative trajectory planning for UAV towards moving target aground

Zeng Jia Shen Gongzhang Xia Jie Yang Lingyu

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract In contrast to the most existing unmanned aerial vehicle (UAV) cooperative trajectory planners that are suitable for stationary targets, a novel decentralized cooperative trajectory planning method for UAV towards moving target aground was proposed. The decentralized cooperative trajectory planning scheme was given and the time advancing mechanism by alternation of self-planning and synchronized-planning was adopted to match the constraints of information transfer interval. The heuristic information function suitable for moving target aground was constructed to enhance the UAV trajectory feasibility. The heuristic search algorithm was used to generate the trajectory segments, which make UAV reacting to target movement aground. The decentralized computing method for cooperative variable was designed to reduce the cooperative computing. The simulation results show that the method could generate the real time three-dimensional cooperative trajectory for UAV towards moving target aground via information transfer and decentralized computing, which meets the real time application requirement.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); trajectories; planning; moving targets

现代信息化战争常常需要多架无人机从不同机场出发协同追击敌方地面战车等运动目标.目标位置的时变性、战场环境的复杂性使面向地面运动目标的无人机协同航迹规划尤为困难.现有飞行器协同航迹规划研究中,文献[1]将问题分解为整体协同规划和航迹调整两层,在航迹调整层对整体协同规划出的最优航迹进行延长来实现团队时间协同,导致规划结果偏离了最优解.文献[2]提出一种层次分解策略用于解决面向固定目标的协同航迹规划,采用分布规划及统一协调决策方法,协调计算量大,难以满足面向运动目标协同航迹规划的实时性要求.运动目标使许多传统的航迹规划方法失效,原因是规划终点不断更新,而传统方法规划阶段与执行阶段分离.文献[3]指出具有启发信息的贪婪搜索方法可以实时生成搜索路径;文献[4]首次提出自学习实时启发式

收稿日期: 2008-06-12

作者简介: 曾 佳(1980-),女,江西南昌人,博士生, zengj@asee.buaa.edu.cn.

搜索算法,规划阶段与执行阶段交替进行有效地满足了动态环境的需求. 文献[5]在此基础上结合飞行器特性提出多步搜索算法,但节点扩展时间受到给定时间限制. 现有面向运动目标航迹规划的文献不多且通常没有明确的运动目标属性. 本文针对面向地面运动目标的协同航迹规划问题,综合研究协同规划机制、实时航迹规划方法及分布协同计算方法,不对武器投放方式及空中运动目标涉及的战术规划进行讨论.

1 问题描述

面向地面运动目标的无人机协同航迹规划问题可以具体描述为:多架无人机从不同机场出发,规避威胁区及禁飞区,同时抵达地面运动目标区域. 协同规划需要综合考虑无人机协同规划机制、机动性能约束及燃油约束、规划方法的实时性、信息交互时间间隔等. 问题的关键是建立面向地面运动目标的协同航迹规划机制,使无人机按照该机制进行自主在线协同航迹规划及动态调整. 本文对无人机及地面目标作如下假设:①地面目标区域处于无人机可达范围;②无人机可实时获取目标信息;③协同无人机之间按一定时间间隔通过信息链路获取友机信息,充分考虑信息交互时间间隔;④当无人机与目标距离较近时,航迹拉起以满足攻击占位需求.

2 总体方案

面向地面运动目标的无人机协同航迹规划总体方案如图1所示. 协同无人机具有一致的内部功能模块:通信模块、规划模块和轨迹跟踪模块. 通信模块负责目标及友机信息的订购与发布. 规划模块负责无人机协同航迹规划,为实现面向运动目标的协同飞行,无人机需要实时获取目标信息并及时交互、更新友机信息,由于交互信息存在时间间隔,因此采用了按时间推进的自规划与同步规划交替进行的协同规划机制. 规划模块未获得友机信息时进行自规划,将规划结果传递给轨迹跟踪模块执行;规划模块获取友机信息后进行同步规划,将规划结果传递给轨迹跟踪模块执行,同步规划与自规划交替进行,直至到达目标.

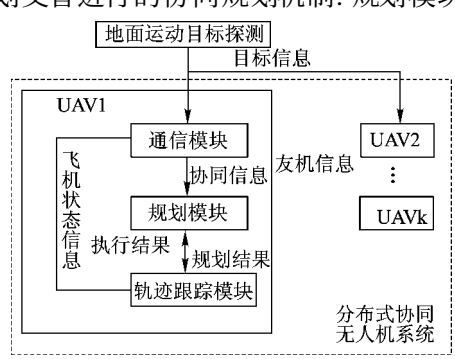

图1 总体方案

本文假设通信模块能够定期完成交互且跟踪模块能够成功跟踪航迹,着重研究协同航迹规划方法,不对通信模块和轨迹跟踪模块进行讨论.

3 实现方法

本文采用按时间推进的自规划与同步规划交替进行的协同规划机制,时间推进间隔选取为T_K,即从$t=0$时刻开始,每隔T_K,进行一次规划. 同步规划时间间隔受信息交互时间间隔影响,信息交互间隔较短,则同步规划间隔较小;反之则较大. 以下详细介绍自规划方法与同步规划方法.

3.1 自规划方法

目标运动使航迹规划终点不断变化,每次规划都以无人机和地面目标当前位置作为起点和终点,自规划方法一次仅扩展一段航迹,在启发函数中不断调整规划终点,使航迹段对目标运动做出及时反应,从而实现面向地面运动目标的实时航迹规划. 同时,实时规划出全局最优的航迹非常困难,为使扩展航迹段尽可能接近全局最优解,扩展节点时不仅考虑下一扩展节点是否存在威胁或扩展节点附近的威胁对航迹的影响,而是考虑扩展节点可探测的全部威胁对下一航迹段的综合影响,避免无法得到满足约束条件的节点或生成的航迹点需要较大的拐弯角/俯仰角才能规避威胁,使航迹段在满足实时性要求的同时,接近全局搜索及回溯得到的最优航迹.

3.1.1 搜索节点扩展

采用启发式搜索算法[6]生成航迹段需要扩展搜索节点,要求满足的约束有[5]:单步最大拐弯角ϕ、单步最大爬升/俯冲角θ、最低飞行高度H_{min}和最大航迹总长d_{max}. 上述约束将扩展节点限制在一个由四棱锥所包围的球面上,四棱锥在顶点处纵向张角为2θ,水平张角为2ϕ,球面半径为步长. 将球面在垂直和水平方向分别等分,得到若干离散化的位置节点. 等分精度越高则航迹规划结果粒度越细,算法收敛时间也相应增加,选值应兼顾算法精度与效率. d_{max}受燃油约束限制,当扩展节点的已飞航迹长度与该扩展节点到目标节点直线长度之和大于d_{max}时,该扩展节点被抛弃,从而保证规划航迹满足燃油约束. H_{min}使无人机在扩展节点时必须考虑高度信息,当扩展节点高度

值小于 H_{min}时则被抛弃, 从而保证航迹的安全性.

3.1.2　启发函数构造

无人机低空飞行往往需要规避地形威胁, 同时需要尽可能低的飞行以减少被敌探测概率, 此外无人机载有的燃油有限, 限制了无人机的航迹总长. 因此, 航迹启发函数主要由威胁信息、航迹长度信息和高度信息 3部分组成. 假设当前节点为 O, 扩展节点集合为 $\{O'_0, O'_1, \cdots, O'_i, \cdots, O'_n\}$, 目标节点为 T, 扩展节点的启发函数构造为

$$h(O'_i) = w_1 t(O'_i) + w_2 d(O'_i) + w_3 a(O'_i) \quad 0 \leqslant i \leqslant n \tag{1}$$

式中, $t(O'_i)$, $d(O'_i)$, $a(O'_i)$分别为扩展节点的威胁信息、航迹长度信息、高度信息; w_1, w_2, w_3 分别为威胁信息、航迹长度信息、高度信息对航迹的影响权重. 规划时依据任务要求对权重进行取值: 当任务对航迹安全性要求较高时, w_1 取值较大; 当任务对航迹长度 (燃油)约束较严格时, w_2 取值较大; 当任务要求无人机尽可能低的飞行时, w_3 取值较大. 启发函数具体构造如下:

1) 威胁信息. 威胁信息预先考虑扩展节点可探测的全部威胁对下一航迹段的综合影响, 用概率表示为

$$t(O'_i) = P(t_{i1} \cup t_{i2} \cup \cdots \cup t_{im}) \tag{2}$$

式中 t_{i1}, t_{i2}, …, t_{im}为 O'_i 当前探测到的全部威胁.

无人机低空飞行需要规避山峰等地形障碍物, 以山峰威胁 t_{i1}为例说明威胁信息构造方法. 山的形成多为火山爆发或地壳隆起, 可粗略的以圆锥体近似, 威胁 t_{i1}基本数据可描述为: ①底半径 r_{i1}; ②底面圆中心坐标 $(x_{i1}, y_{i1}, 0)$; ③高度 a_{i1}. 选取 O'_i 高度平面的山峰截面, 其中心坐标为 $(x_{i1}, y_{i1}, z_{O'_i})$, 半径 $r_{O'_i} = (a_{i1} - z_{O'_i}) \times r_{i1} / a_{i1}$, 计算当前节点与 O'_i连线或其延长线到山峰截面中心的距离 d_{i1}, 则威胁 t_{i1}对 O'_i的威胁概率可近似为

$$P(t_{i1}) = \begin{cases} 1 & d_{i1} \leqslant r_{O'_i} \\ 1 - (d_{i1} - r_{O'_i}) / d_{safe} & r_{O'_1} < d_{i1} < r_{O'_i} + d_{safe} \\ 0 & d_{i1} \geqslant r_{O'_i} + d_{safe} \end{cases} \tag{3}$$

式中 d_{safe}为安全距离. 依次计算 $t_{i1} \sim t_{im}$对 O'_i的威胁概率并代入式 (2)计算 O'_i的威胁信息 $t(O'_i)$.

2) 航迹长度信息

$$d(O'_i) = \sqrt{(x_T - x_{O'_i})^2 + (y_T - y_{O'_i})^2 + (z_T - z_{O'_i})^2} / d_{max} \tag{4}$$

式中, $d(O'_i)$为航迹长度信息; (x_T, y_T, z_T)为目标节点坐标; $(x_{O'_i}, y_{O'_i}, z_{O'_i})$为扩展节点坐标.

3) 高度信息

$$a(O'_i) = (z_{O'_i} - H_{min}) / z_{O'_i} \tag{5}$$

式中 $z_{O'_i}$为扩展节点的高度值.

至此, 启发函数构造完毕.

3.1.3　自规划算法具体步骤

自规划采用启发式搜索算法, 具体步骤如下:

1) 判断无人机是否已经达到目标位置. 若是, 则任务完成; 若否, 则进入 2);

2) 按前述方法扩展节点 O, 生成可行扩展节点集 $\{O'_0, O'_1, \cdots, O'_i, \cdots, O'_n\}$, 计算 $h(O'_i)$并取出最优节点 (假定为 O'_0)作为下一步位置节点;

3) 目标运动至 T', 将 O'_0 赋给无人机当前位置, T'赋给目标当前位置, 转入第 1)步.

3.2　同步规划方法

面向地面运动目标的协同航迹规划需要提高无人机分布协同计算效率以满足实时性要求, 因此本文采用无人机分布式自主计算协同变量的方法, 通过定期交互获取友机信息, 计算理想速度, 并对当前速度在可行范围内进行调整, 实现同时到达地面运动目标区域. 同步规划采用自规划算法求解航迹段, 自规划阶段不进行速度规划, 按照同步规划速度调整结果飞行.

以第 k架无人机为例介绍协同变量及理想速度计算方法.

1) 估算飞行距离并与友机比较. 依据目标当前位置信息估算本机到目标飞行距离并与友机比较, 得到协同无人机最长飞行距离, 记为 l_{max}, 作为协同到达时间及理想速度计算的基准值.

2) 计算协同到达时间

$$T_C = l_{max} / v_{max} \tag{6}$$

3) 计算理想速度及参数调整. 协同飞行时, 飞行距离越长的无人机, 理想速度应越快, 因此可假设飞行距离与理想速度近似成正比, 又 $v_k \in [v_{min}, v_{max}]$, 则理想速度为

$$v_k = \max\{l_k / T_C, v_{min}\} \tag{7}$$

即

$$v_k = \max\{(l_k / l_{max}) v_{max}, v_{min}\} \tag{8}$$

无人机依据飞行距离比例关系计算得到理想速度, 经过一段飞行后, 飞行距离最长的无人机可能仍然处于距离目标最远的位置, 当绕行规避较大威胁时, 飞行距离增加, 协同飞行速度调节的难度增大, 飞行距离较短的无人机应该据此减去一个补偿参数, 从而降低速度, 提高协同冗余度. 本文引入速度调整参数 C, 将式 (8)修正为

$$v_k = \max\{((l_k - C) / l_{max}) v_{max}, v_{min}\} \tag{9}$$

参数 C 可以减小协同无人机飞行距离的差距, 从而降低速度协调的难度, 取值与威胁分布相关. 从定性的角度分析, 威胁个数及覆盖范围相差越大, 则 C 取值越大; 相反, 则 C 取值较小. 从定量的角度分析, C 可以表示为威胁属性、威胁等级评估结果、威胁覆盖范围及威胁分布概率等诸多影响因素的函数, 是一个综合衡量的结果.

4) 根据理想速度调整当前速度. 无人机速度变化率需要满足最大加速度限制, 调整无人机当前速度时, 首先比较理想速度与当前速度. 若当前速度小于理想速度, 则无人机以最大加速度加速飞行; 若当前速度大于理想速度, 则无人机以最大加速度减速飞行.

4 仿真验证

4.1 仿真环境

仿真想定为两架无人机协同追击一个地面运动目标, 无人机从不同机场出发, 地面目标作匀速直线运动. 仿真机器为 Pentium Ⅳ 2.80 GHz, 模拟生成威胁环境, 规划区域为 300 km × 300 km, Φ = 60°, θ = 30°, H_{min} = 0.5 km, d_{max} = 2 000 km, 等分精度为 5°, d_{safe} = 1 km, T_K = 2 s, 仿真选取一次自规划与一次同步规划交替进行.

4.2 仿真结果及分析

1) 协同航迹规划结果图. 面向地面运动目标的无人机协同航迹规划结果如图 2和图 3所示. 地面隆起为威胁环境, 两架无人机成功规避威胁并协同到达地面运动目标区域, 通过大量仿真选取 C = 400. 仿真中单步规划的平均时间和最长时间分别为 0.541 s和 1.797 s, 满足实时性要求.

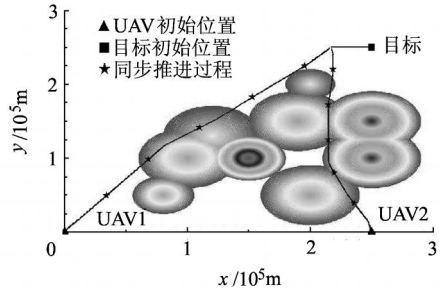

图 2 协同规划结果俯视图

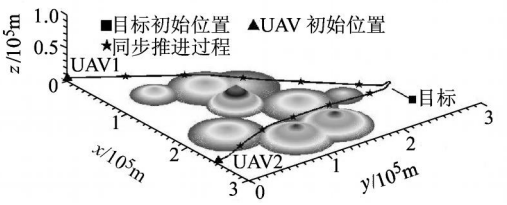

图 3 协同规划结果侧视图

2) 时间与速度变化的关系图. 无人机速度随时间变化曲线如图 4所示. 无人机速度变化曲线连续, 通过参数调整, 协同无人机与地面目标相对距离关系发生了改变, 降低了速度调节的难度, 提高了协同冗余度.

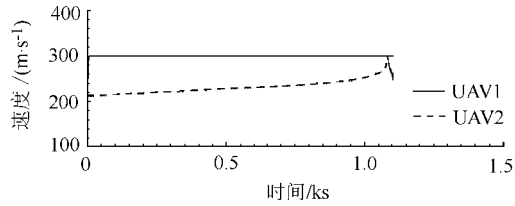

图 4 速度随时间变化曲线

5 结束语

本文提出了一种面向地面运动目标的无人机协同航迹规划方法. 其中协同规划机制有效的满足了协同信息交互存在时间间隔的约束, 启发函数和分布计算方法使无人机对地面目标运动做出及时反应, 实现了面向地面运动目标的三维协同航迹规划. 后继工作预期引入事件驱动协同机制, 使突情发生在非定期交互时, 协同无人机也能通过该机制促使信息交互发生, 提高规划主体的智能性和交互性.

参考文献 (References)

[1] McLain T, Beard R. Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles[R]. AIAA-00-4369, 2000

[2] McLain T, Chandler P, Pachter M. A decomposition strategy for optimal coordination of unmanned air vehicles[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2000, 1: 369-373

[3] Grundel D. Searching for a moving target: optimal path planning [C]//2005 IEEE Networking, Sensing and Control. ICNSC2005-Proceedings. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 867-872

[4] Ishida T, Korf R. Moving-target search: a real-time search for changing goals[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(6): 609-619

[5] 郑昌文, 丁明跃, 关世义, 等. 一种针对运动目标的飞行器航迹搜索算法[J]. 宇航学报, 2003, 24(5): 444-450
Zheng Changwen, Ding Mingyue, Guan Shiyi, et al. A route planning algorithm for unmanned air vehicle towards moving target [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(5): 444-450(in Chinese)

[6] 夏洁, 高金源. 满足战场需求的实时飞行路径规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 95-99
Xia Jie, Gao Jinyuan. Real-time flight path planning for combat mission[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 95-99(in Chinese)

(责任编辑: 王玉娟)