

无人作战飞机自主攻击三维实时轨迹规划研究

刘鹤鸣¹, 黄长强¹, 董志², 李佑军³, 赖志平⁴

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军驻沈飞军代表室, 沈阳 110850;
3. 中国人民解放军95214部队, 长沙 410115; 4. 中国人民解放军广州军区空军装备部, 广州 510071)

摘要: 以无人作战飞机挂载激光制导武器打击地面目标为研究背景, 针对空对地武器投放过程的多约束和强实时性要求, 提出自主攻击轨迹规划系统总体框架, 建立了激光制导武器可发射区模型; 在此基础上结合UCAV动力学约束, 提出了一种基于改进A*算法的三维攻击轨迹决策算法。算法结合规划轨迹最优性约束和UCAV平台的运动学约束, 选择扩展节点, 从而降低了算法的复杂度; 结合微积分的思想, 取步长足够小, 将步长范围内高度变化忽略不计, 将UCAV水平方向和垂直方向飞行航迹独立解耦, 并结合法向过载进行高度修正, 从而有效避免了维数灾难问题。仿真结果表明, 该算法能快速获得三维航迹, 引导UCAV到达目标可发射区, 且UCAV终端状态满足武器发射条件, 为构建无人作战飞机自主攻击平台奠定了良好的基础。

关键词: 三维攻击轨迹规划; 无人作战飞机; 可发射区; 改进A*算法

中图分类号: V279 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)06-0034-06

Three Dimensional Trajectory Planning Under Multiple Constraints for UCAVs in Autonomous Attacking

LIU Heming¹, HUANG Changqiang¹, DONG Zhi², LI Youjun³, LAI Zhiping⁴

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Military Representative Office of PLA in Shenyang Aircraft Industries, Shenyang 110850, China; 3. No. 95214 Unit of PLA, Changsha 410115, China; 4. Guangzhou Military Region Air Force Armament Department of PLA, Guangzhou 510071, China)

Abstract: The issue of unmanned combat air vehicles (UCAV) to attack ground targets with laser guidance missile was studied. Considering the multiple constraints and high real-time requirement in air-to-ground weapon delivery trajectory planning, we proposed a general framework of autonomous attack trajectory planning system, established the Acceptable Launching Area (LAR) model for the missile, and proposed a strategy to generate 3D weapon delivery trajectories based on an improved A-star algorithm. This algorithm combined the optimal constraints and UCAV motion constraints to find the appropriate successor node, which can greatly decrease the complexity of the algorithm. We chose an appropriate step to eliminate height change within each step, which helped to separate horizontal plane and the vertical plane of the trajectory, and then revised the vertical trajectory height based on normal acceleration. Simulation results prove that this strategy can quickly generate a 3D weapon delivery trajectory which can lead the vehicle to the target LAR and satisfy the constraints for launching a missile.

Key words: 3D weapon delivery trajectory planning; unmanned combat aircraft vehicle(UCAV); launch acceptable region; improved sparse A* search algorithm

0 引言

无人作战飞机(Unmanned Combat Aircraft Vehicle,

UCAV)自主攻击技术体现了无人作战飞行器一体化、自动化、智能化的发展方向, 而自主攻击轨迹规划技术是实现无人自主攻击的前提和关键技术^[1]。

文献[2]针对联合防空系统对UCAV构成的巨大威胁, 分别对UCAV、雷达以及地空导弹建模, 以UCAV毁伤概率为优化目标函数, 并采用极小极大最优控制理论完成UCAV轨迹规划。美国爱荷华州立大学的

收稿日期: 2012-05-28 修回日期: 2012-07-17

基金项目: 航空科学基金(20105196016)

作者简介: 刘鹤鸣(1984—), 男, 湖南常德人, 博士生, 研究方向为无人飞行器武器系统总体技术。

“虚拟战场空间”项目^[3]综合考虑威胁规避,燃料消耗和达成探测目的三方面因素,采用粒子群优化算法规划航迹点,并利用 B 样条曲线将航迹点拟合为三维飞行航迹。该算法可同时生成多条飞行航迹,地面“飞行员”只需从可选路径集中选择当前的最佳航迹,从而极大降低了操纵难度,增强了规划航迹的适应性。总的来说,这些算法主要针对UCAV 侦察等任务背景展开,未考虑终端武器投放约束,并不适用于攻击轨迹决策。文献[4]提出一种基于 Gauss 伪谱法的轨迹优化问题求解策略,并分别以时间最短和燃料消耗最小进行仿真验证。该算法计算量比较大,无法处理复杂约束和突发威胁,不能用于在线实时规划。

针对上述缺陷,本文以无人作战飞机挂载激光制导武器打击地面低速/静止目标为研究背景,在分析激光制导武器可发射区模型的基础上,结合飞机性能约束和轨迹规划的实时性要求,建立了无人作战飞机攻击轨迹规划模型;在分析研究传统 A* 算法三维航迹规划局限性的情况下,对其进行改进,提出了一种基于UCAV 当前速度方向和最大转弯角度的航迹节点搜索策略,并结合真实的三维数字地图完成轨迹决策。该算法把飞机性能限制、导弹使用的约束条件和地形平滑处理技术融合到路径选择的过程中,使平滑处理只需要满足从当前航迹点到选择节点方向的飞行约束条件,并将该算法应用于战斗机航迹规划中,建立综合威胁和地形高度的威胁数字势场图,对算法进行了仿真。结果表明,算法规划的攻击轨迹满足武器投放要求,且算法的运行时间基本满足任务要求。

1 UCAV 自主对地攻击任务描述

当前航迹规划主要针对战场环境已知的区域和事先确定的目标展开,规划方案引导UCAV 从初始位置到达目标位置即可。然而,在实际作战过程中,战场环境瞬息万变,战斗时机稍纵即逝,如事先的情报不准,目标位置发生变化,或者事先侦察的目标已消失,取而代之出现了新的目标等,UCAV 将不能适应新的任务要求,从而导致任务失败。特别是对于现代战争而言,打击一些稍纵即逝的机动目标和即时发现的时间敏感性目标已成为作战的关键^[5],这就需要UCAV 在侦察到目标后,在目标重新隐蔽起来或丧失打击时机之前,立即做出判断和决策,对目标进行识别、跟踪和打击。因此,非常有必要研究一套轨迹规划算法,引导UCAV 根据发现目标的位置/状态信息,迅速机动到机载火控系统解算出的制导武器可发射区,完成对地攻击占位。针对上述需求,无人作战飞机自主攻击轨迹规划模块如图 1 所示。

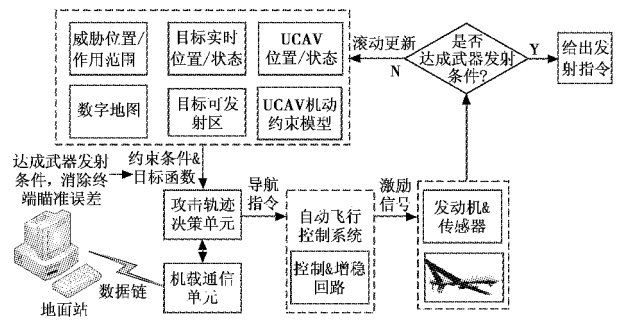


图 1 自主攻击轨迹规划系统总体框架

Fig. 1 Diagram of auto-attack trajectory planning

UCAV 执行任务时,首先由地面站将事先规划的航迹通过数据链发送给UCAV 机载通信单元,轨迹规划决策模块控制UCAV 跟踪指定的航迹,搜索和侦察敌方区域,当机载传感器发现敌方目标的实时位置/状态等信息后,由攻击轨迹决策单元依据UCAV 机动模型、机载火控系统送来的目标实时可发射区,结合UCAV 当前位置/状态和任务区域内的威胁环境,实时规划出一条可行的攻击轨迹,引导UCAV 到达目标可攻击区。UCAV 通过滚动优化的方式消除UCAV 终端瞄准误差,最终达成武器发射条件。

2 激光制导武器投放轨迹规划数学模型

2.1 UCAV 模型

攻击轨迹规划过程主要考虑UCAV 航迹控制,可将UCAV 视为一个质点,并且不考虑风的影响。采用三自由度质点模型即可满足要求。

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \psi \cos \gamma + W_x \\ \dot{y} = V \sin \psi \cos \gamma + W_y \\ \dot{H} = V \sin \gamma + W_h \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y, H 分别为经度、纬度和高度; V 为UCAV 的速度,即真空速; ψ, γ 分别为航向角和航迹倾角。 W_x, W_y, W_h 分别为风场在各个方向上的分量。

初始时刻 $\gamma = 0$, 其初始状态为

$$P|_{t=t_0} = (x, y, H, \psi, \gamma)|_{t=t_0} = (x_0, y_0, H_0, \psi_0, 0) \quad (2)$$

为了表征UCAV 平台受到的机动性能约束,建立约束条件为

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \\ \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \\ |\dot{\psi}| \leq \dot{\psi}_{\max} \\ |\dot{\gamma}| \leq \dot{\gamma}_{\max} \\ n_d \leq n_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{\psi}_{\max}$ 为最大航向角变化率; $\dot{\gamma}_{\max}$ 为最大航迹倾角变化率。由上式可得UCAV 转弯半径约束为

$$R = \Delta s / \Delta \psi \geq V_{\min} / \dot{\psi}_{\max} = R_{\min} \quad (4)$$

2.2 激光制导武器可发射区模型

制导武器可发射区是指针对特定的武器系统和目标,在一定的武器发射条件下,武器能满足一定的效能(对目标的杀伤概率)顺利进行瞄准发射的理想区域。可发射区与载机的状态、武器性能、目标特性和外界环境有关;其大小和形状受到载机所采用的攻击方式、机动特性、武器特性(射程、引信启动时间及导引制导能力)、目标探测系统的特性和安全要求等因素的限制^[6]。因此,可发射区的真实范围是非常复杂的。

图2为本文提出的目标可发射区示意图, $B'BCC'$ 为简化的目标可发射区。

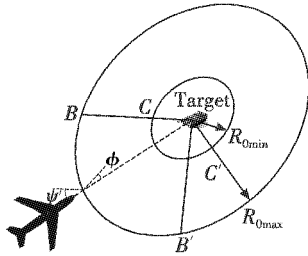


图2 目标可发射区示意图

Fig.2 Target launch acceptable region

UCAV 水平攻击时,假设飞行高度满足作战需求,则激光制导武器的可发射区可简化为由导弹的发射距离边界以及载机与目标的偏离角(UCAV 航向角和视线角的综合)侧边界构成。不等式组(5)为可发射区约束条件。

$$\begin{cases} R_{0\min}(H, V, \psi_x, \psi_{d\max}) \leq R_0 \leq R_{0\max}(H, V, \psi_x, \psi_{d\max}) \\ \phi_{\min}(H, V, \psi_x, \psi_{d\max}) \leq \phi \leq \phi_{\max}(H, V, \psi_x, \psi_{d\max}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_{0\max}, R_{0\min}$ 分别为可发射区最大、最小边界; ϕ_{\max}, ϕ_{\min} 分别为偏离角最大、最小约束; ψ 为UCAV 偏航角; ϕ 为偏离角; $\psi_{d\max}$ 为制导武器最大目标跟踪角。

为方便处理,假定当目标位置确定时,式(5)中 $R_{0\min}, R_{0\max}, H, V$ 参数均为已知,则攻击轨迹的终端约束可转化为UCAV 攻击轨迹终端状态 (x, y, ψ) 的不等式约束。

$$R_{0\min}(\psi) \leq \|(x - x_d, y - y_d)\|_2 \leq R_{0\max}(\psi) \quad (6)$$

式中: $\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}; P_d(x_d, y_d, H_d)$ 为目标位置坐标。

为了使UCAV 按照上述约束条件要求的方位和进入角范围接近目标并对目标实施打击,在目标附近设置了一个桶形的禁飞区,如图3所示。图中 $BCC'B'$ 为目标点 M 在给定高度范围内的可攻击区的简化模型。可攻击区两侧阴影部分为一个桶形的禁飞区,将该区域内的节点排除在可选扩展节点之外。

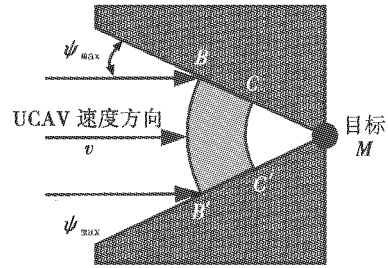


图3 桶形约束示意图

Fig.3 Sketch map of barrel-shape constraints

2.3 对地攻击约束模型

UCAV 实施空地打击、防空火力压制等任务时,主要针对具有较为重要的地面战术时效目标,如指挥所,小股部队的集结点,以及地面雷达阵地等实施打击任务。打击过程中,UCAV 容易暴露在地面强火力的攻击范围内,其飞行过程中受到如下约束。

1) 地形威胁约束。

为了降低UCAV 撞地风险,首先对飞行区域地形建模,本文采用美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的90 m 分辨率数字高程地图,如图4所示。



图4 某地区三维数字高程地图

Fig.4 3D digital elevation model

2) 敌方威胁约束。

敌方火力威胁可近似处理为半球。

$$\|(x(t) - x_{DD,i}, y(t) - y_{DD,i}, z(t) - z_{DD,i})\|_2 \leq R_{0,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (7)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示两点间的距离; $(x_{DD,i}, y_{DD,i}, z_{DD,i})$ 和 $R_{0,i}$ 分别表示第 i 个雷达探测阵地的坐标位置及其作用半径。

3) 禁飞区。

受政治、军事、天气等因素影响,该区域UCAV 不能进入,本文一律处理为禁飞区威胁,为了处理方便,假定禁飞区为圆柱体形区域。约束条件式为

$$\|(x(t) - x_{JF,i}, y(t) - y_{JF,i})\|_2 \leq R_{JF,i} \quad (8)$$

式中, $(x_{JF,i}, y_{JF,i})$ 和 $R_{JF,i}$ 分别表示第 i 个禁飞区中心坐标位置及其作用半径。

3 ISAS 算法

A*算法作为一种启发式图搜索算法,其运行时间

短,可适应突发威胁,十分适合有威胁环境下的攻击轨迹决策规划。国内外学者针对该算法进行了大量研究^[7-9]。主要存在如下缺陷:1)算法搜索节点过多,特别是当算法扩展至三维空间后,由于维数灾难从而导致算法失效;2)节点搜索过程中没有考虑到平台自身的动力学约束,特别是UCAV的运动方向和最小转弯半径对轨迹的约束。文献[10]指出:UCAV按最小转弯半径转弯形成的圆弧C和圆弧间的切直线L组成了任意两点的最短距离。因此,最优轨迹是由圆弧C和切直线L拼接而成的。基于此,提出一种结合UCAV平台运动学约束的节点搜索策略。同时,结合微积分的思想,当单位步长dS足够小,步长范围内高度起伏变化可基本忽略不计,从而可以将UCAV水平方向和垂直方向上的飞行航迹分离开进行考虑,大大降低了计算代价。

3.1 水平方向航迹节点的搜索策略

考虑到航迹规划过程中的性能指标一般是要求规划的航迹最短,而Dubins的研究已经证明,在一定的转弯半径下,某一矢量从起始点到末端点存在最短路径。具体到航迹规划中,考虑到UCAV在飞行过程中需要满足各种动力学/运动学约束条件,同时战场环境存在威胁和障碍,UCAV的最短飞行轨迹由UCAV按最小转弯半径飞行形成的圆弧C和圆弧间的切直线L组成。如图5所示,UCAV当前点为 P_i ,最优轨迹由图中圆弧C和切直线L拼接而成。

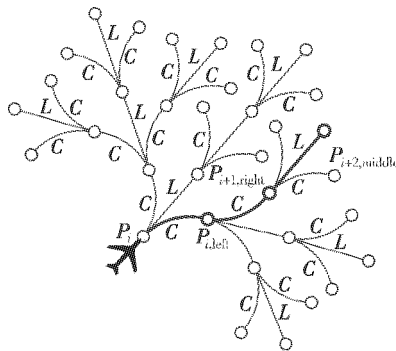


图5 搜索节点扩展示意图

Fig. 5 Trajectory node search strategy

后继节点的示意图如图6所示。图中:dS为单位步长; R_{min} 为UCAV最小转弯半径。

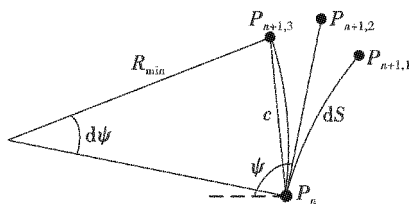


图6 后继节点示意图

Fig. 6 Sketch map of successor node

则下一代扩展点($P_{n+1,left}, P_{n+1,middle}, P_{n+1,right}$)的坐

标可计算得出。

$$d\psi = dS/R_{min} \quad (9)$$

$$c = R_{min} \sqrt{2(1 - \cos(d\psi))} \quad (10)$$

$$P_{n+1,left} = P_n + \begin{bmatrix} -c * \cos(\psi - 0.5d\psi) \\ c * \sin(\psi - 0.5d\psi) \\ -d\psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P_{n+1,middle} = P_n + \begin{bmatrix} -dS * \cos \psi \\ dS * \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P_{n+1,right} = P_n + \begin{bmatrix} -c * \cos(\psi + 0.5d\psi) \\ c * \sin(\psi + 0.5d\psi) \\ d\psi \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 目标函数设计

代价函数 $f(n)$ 由已消耗代价 $g(n)$ 和估计代价 $h(n)$ 两部分组成。代价函数设计时,需要对航迹长度、航迹安全性等因素综合评估。本文设计的代价函数表达式为

$$g(n) = w_1 * D_L + w_2 * D_H \quad (14)$$

式中: D_L 和 D_H 分别为采取归一化之后的航迹长度代价和高度代价; w_1 和 w_2 为代价相应权值, $w_1 + w_2 = 1$ 。对于雷达威胁范围内的航迹点,在节点扩展时将其删除。这样一方面有效规避了威胁,另一方面也减少了搜索节点数,提高了算法效率。

估计代价 $h(n)$ 又称启发函数,在算法中用来选择合适的搜索方向。合适地评估当前节点的代价对于确保算法可靠、快速收敛非常重要。文献[11-12]取当前点与目标点之间的欧几里德距离并不能正确反映当前节点的估计代价,容易导致前面搜索节点代价值 $f(n)$ 较小,随着迭代的增加,后添加的节点代价值较大,不利于算法继续向前搜索。为此,本文采用的估计代价值为

$h(n) = w_1 * D_L + w_2 * [D_H + \lambda * (L/dS - 1) * \bar{D}]$ (15)
式中: $\lambda = 0.618$;L为当前点与目标点在水平方向的距离;dS为单位步长; \bar{D} 为该区域内的平均高度代价。式中前两项为欧几里德距离代价,修正因子 $\lambda * (L/dS - 1) * \bar{D}$ 正是算法估计的当前节点到达目标节点的高度代价。

3.3 垂直方向高度拟合

为了使规划出的水平参考航迹满足飞机性能的要求,需要在获得的航迹点经纬度和偏航角三维坐标的基础上,综合考虑飞机的机动过载和方位角速度的约束条件,对参考航迹进行修正拟合,主要考虑的飞行约束条件有飞机的最小离地间隙 h_{min} 、航迹坡度角范围 $[\beta_{min}, \beta_{max}]$ 、飞机的法向过载范围 $[\rho_{min}, \rho_{max}]$ 。不同法向过载约束下的拟合航迹如图7所示。

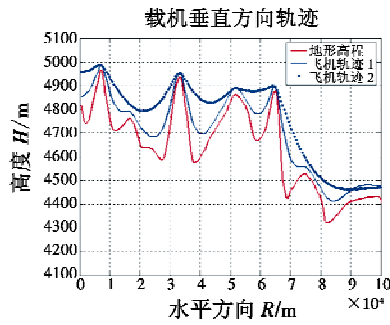


图7 不同法向过载约束下的拟合航迹

Fig. 7 Fitting trajectories of different normal acceleration

1) 最小离地间隙 h_{\min} 约束。为了安全起见,飞行器离地面的垂直距离不能小于规定的离地间隙 h_{\min} , 其取值主要受地形地貌以及飞机机动性能确定,一般在 10 ~ 200 m 左右。

设水平参考航迹由 (x_i, y_i) 组成, 令 $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 、 g_i 为参考点的地形高度, 给定飞机的最小离地间隙 h_{\min} 后, 得到垂直面的初始航迹点为 (r_i, h_{r_i}) 。

$$h_{r_i} = g_i + h_{\min} \quad (16)$$

2) 航迹坡度角范围 $[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ 约束。从航迹节点 (x_i, y_i) 和相邻航迹节点 (x_{i+1}, y_{i+1}) 点的高度分别为 $h_{(x_i, y_i)}$ 和 $h_{(x_{i+1}, y_{i+1})}$, 航迹点之间的实际距离为 Δr , 进行以下运算来修正航迹。

$$\begin{cases} h_{(x_i, y_i)} = h_{(x_{i+1}, y_{i+1})} - \Delta r \cdot \tan \beta_{\max}, & \text{若 } (h_{(x_{i+1}, y_{i+1})} - h_{(x_i, y_i)}) / \Delta r \geq \tan \beta_{\max} \\ h_{(x_{i+1}, y_{i+1})} = h_{(x_i, y_i)} + \Delta r \cdot \tan \beta_{\min}, & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

根据式(17)得到满足坡度角约束条件的修正航迹点高度值。

4 攻击轨迹规划算法流程

攻击轨迹规划算法流程如图8所示。

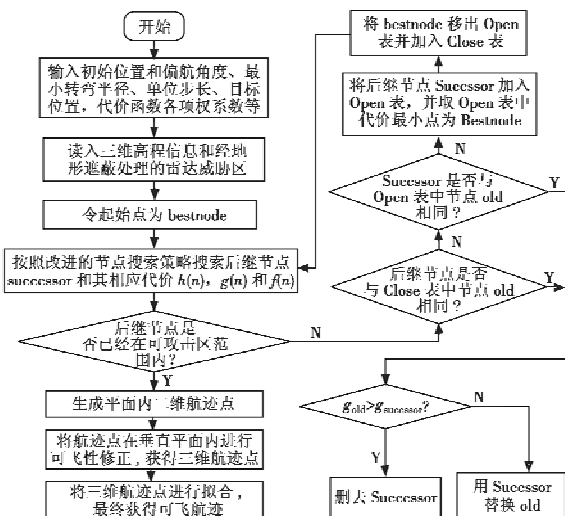


图8 自主攻击轨迹决策算法流程图

Fig. 8 Flow diagram of auto-attack trajectory planning algorithm

5 仿真结果及分析

某UCAV 挂载激光制导武器以俯仰角 $\theta = 0$, 偏航角 $\psi_x = 120^\circ$, 进入 $E120^\circ \sim E121^\circ, N29^\circ \sim N30^\circ$ 范围内的作战区域, UCAV 初始位置为 $(N29^\circ 10', E120^\circ 30')$, 其水平方向最小转弯半径为 5 km, 垂直方向最大爬升角为 60° , 俯冲角为 30° , 此时发现目标位于 $(N29^\circ 57', E120^\circ 57')$ 。已知导弹发射火力半径 5 km, 导弹发射时要求UCAV 与目标间的偏离角满足 $|\psi| < 30^\circ$ 。编写的算法程序在 1.8 GHz 赛扬 430CPU, 2 GB 内存, Matlab7.12 上运行。

图9为作战区域内没有敌方地面威胁的情况下, 地形和航迹长度权重取不同值的攻击轨迹图。红色☆标记为目标位置。两条曲线分别表示了地形和航迹长度代价权重不同时规划的攻击轨迹(如表1中情形1和情形2)。

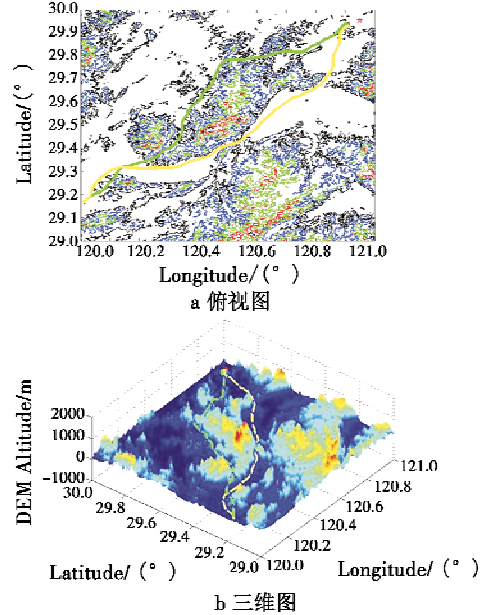


图9 无威胁条件下UCAV最优攻击轨迹

Fig. 9 The optimal attack trajectory of UCAV under no threat

由图可见, 当地形威胁代价 w_h 较大时(情形1), 规划轨迹与地形轮廓基本保持一致; 而当航迹长度代价 w_L 较大时(情形2), 轨迹在一些地形起伏并不是很剧烈的位置直接穿越该区域, 从而有效缩短了航迹长度。

图10为有敌方地面导弹/雷达威胁下UCAV规划的攻击轨迹, 由于难以实时对敌方防御阵地威胁大小进行评估, 规划算法对敌方威胁直接进行规避。由规划结果可见, 规划的攻击轨迹避开了敌方威胁, 规划航迹比较平滑, 不存在UCAV不可飞的尖角, 整个曲线的高度变化也比较小, 适合于实际的UCAV攻击轨迹。

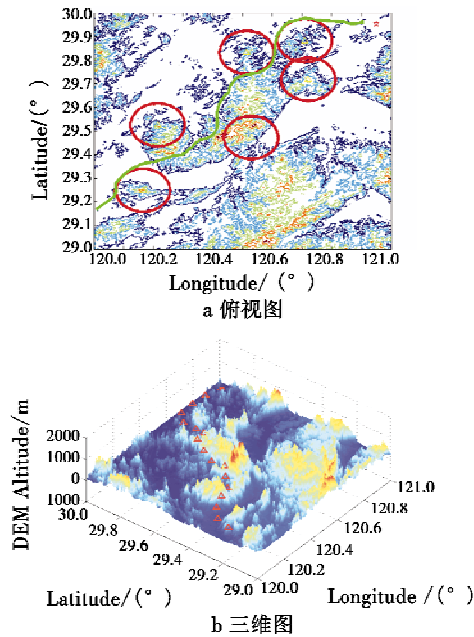


图10 威胁条件下UCAV攻击轨迹

Fig. 10 The optimal attack trajectory of UCAV under threat
算法运行结果如表1所示。

表1 算法运行结果

Table 1 Algorithm executing results

| | 情形1 | 情形2 | 情形3 |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| 敌方威胁 | 无 | 无 | 有 |
| 高度权值 w_h | 0.1 | 0.3 | 0.1 |
| 距离权值 | 0.9 | 0.7 | 0.9 |
| 航迹长度/km | 288 | 302 | 354 |
| 仿真用时/s | 33.09 | 34.12 | 43.26 |
| 终端偏离角 $\psi/(^\circ)$ | ~3 | ~8 | ~13 |
| 终端水平距离/km | 4.6 | 4.77 | 4.83 |
| 总代价 $f(n)$ | 1.85 | 2.43 | 1.99 |

由结果可见,规划航迹基本满足目标可攻击区的要求,算法运行时间均在60s以内,实时性能较好,为算法移植至UCAV自主攻击平台奠定了良好的基础。

6 结论

以无人作战飞机挂载激光制导武器打击地面目标为研究背景,针对空对地武器投放轨迹规划问题存在的高度非线性、强约束、多因素耦合等困难,完成以下3方面工作。

1) 在详细分析空地攻击武器投放可攻击区影响因素的基础上,结合激光制导武器打击地面固定或低速目标这一特殊应用背景,给出了简化的目标可攻击区模型。

2) 针对传统A*算法存在难以满足直飞限制以及飞机最小转弯半径等约束的局限性,提出了一种结合

飞行器简化运动学方程ISAS的三维攻击轨迹决策算法,并利用可飞性修正算法和三次B样条曲线对航迹进行拟合,形成最终的攻击轨迹。

3) 采用某地区实际的三维高程地图,对提出的ISAS算法进行仿真。仿真结果表明,在不同的地形和航迹长度权重,以及不同的威胁条件下,该算法均能够以较短的时间规划出一条满足要求的三维攻击轨迹,从而验证了算法的可靠性。

参考文献

- [1] Office of the Secretary of Defense. Unmanned systems roadmap 2007-2032 [R]. DoD, Washington DC, 2007.
- [2] KABAMBA P T, MEERKOV S M, ZEITZIII F H. Optimal path planning for unmanned combat aerial vehicles to defeat radar tracking[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(2):279-288.
- [3] FOO J L. Path planning of unmanned aerial vehicles using B-splines and particle swarm optimization[J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2009, 6:271-290.
- [4] 张煜,张万鹏,陈璟,等.基于 Gauss 伪谱法的UCAV对地攻击武器投放轨迹规划[J].航空学报,2011,32(7):1240-1251.
- [5] 张蕾.国外无人机发展趋势及关键技术[J].电讯技术,2009,149(7):88-92.
- [6] 黄长强,曹林平,翁兴伟,等.无人作战飞机精确打击技术[M].北京:国防工业出版社,2011:123-128.
- [7] SZCZERBA R J. Robust algorithm for real-time route planning [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2000, 36(3):869-878.
- [8] 刘希,朱凡,蔡满意,等.一种改进的快速航路规划方法[J].飞行力学,2011,29(1):89-92.
- [9] 郑昌文.飞行器航迹规划方法研究[D].武汉:华中科技大学,2003.
- [10] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, ZBIKOWSKIZ R, et al. 3D dubins sets based coordinated path planning for swarm of UAVs [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 21-24 August 2006, Keystone, Colorado, 2006:1-20.
- [11] 郝震,张健,朱凡,等.雷达威胁环境下的无人机三维航迹规划[J].飞行力学,2010,28(1):47-52.
- [12] 李季,孙秀霞.基于改进A-Star算法的无人机航迹规划算法研究[J].兵工学报,2008,29(7):788-792.