

面向无人机低空突防的轨迹规划技术

樊旭东, 阮玉晗, 黄康强, 李勇朝*

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 在满足无人机机动性和隐蔽性的基础上, 对无人机的飞行轨迹进行优化, 以减小撞山风险, 提高生存概率, 是实现无人机低空突防的重要因素。针对低空突防轨迹规划问题, 首先, 在满足无人机自身性能要求和环境威胁的基础上, 对轨迹规划问题进行建模。其次, 运用二维三次卷积插值法对数字高程地图进行处理, 为低空突防的环境模型构建打下基础。然后, 运用综合地形平滑技术对地形坡度和曲率进行约束, 实现无人机自身性能和环境地形的贴合。最后, 结合轨迹规划与综合地形平滑算法进行仿真, 表明了所运用的轨迹规划算法可以在无人机飞行总体代价最优且紧贴地面安全飞行的情况下, 生成安全曲面, 提高无人机的生存概率, 实现无人机低空突防。

关键词: 无人机; 轨迹规划; 数字高程地图; 综合地形平滑

中图分类号: E836.2 **文献标识码:** B

Trajectory Planning Technology for Low – Altitude Penetration Of Drones

FAN Xu – dong, RUAN Yu – han, HUANG Kang – qiang, LI Yong – zhao*

(State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an Shanxi 710071, China)

ABSTRACT: On the basis of satisfying the maneuverability and concealment of the drone, optimizing the flight path of the drone to reduce the risk of collision and improve the survival probability is an important factor to realize the low – altitude penetration of the drone. In this paper, based on the low – altitude penetration trajectory planning problem, the trajectory planning problem firstly was modeled based on satisfying the UAV's own performance requirements and environmental threats. Then, the two – dimensional cubic convolution interpolation method was used to process the digital elevation map, which lays a foundation for the construction of the low – altitude penetration environment model. Next, the integrated terrain smoothing technology was used to constrain the slope and curvature of the terrain to achieve the fit of the UAV's own performance and environmental terrain. Finally, trajectory planning was combined and terrain smoothing algorithm was integrated. It is shown that the trajectory planning algorithm used in this paper can generate safe surfaces and improve drones when the overall cost of drone flight is optimal and close to the ground. The survival probability of the UAV is low penetration.

KEYWORDS: Unmanned aerial vehicles; Trajectory planning; Digital elevation map; Integrated terrain smoothing

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)具有重量轻、长航时、机动性能好和突防能力强等特点, 已逐渐成为对地攻击的重要手段^[1-4]。然而, 随着地面雷达和防空武器性能的不断强大, UAV 在高空中受到的威胁日益加大, 在高空中利用机动约束来降低飞机自身雷达横截面(Radar Cross –

Section, RCS)的效果越来越不明显。因此, 低空突防轨迹规划作为 UAV 安全飞行作战的关键技术之一成为当前研究的热点^[5-8]。

相关学者对低空突防轨迹规划主要涉及到的关键技术进行了大量细致的研究。文献[9]采用二维线性插值的方法对地形快速插值得到了更为精确的地图, 为轨迹规划提供了较为精细化的环境模型; 文献[10]对地形坡度进行了约束, 提出了一种地形平滑方法, 使规划的爬升轨迹更加安全; 文献[11]提出了一种综合地形坡度的曲率约束平滑算法, 使生成的俯冲轨迹更加可靠; 以上的研究在一定程度上解决了

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200200)

收稿日期: 2019-04-09 修回日期: 2019-04-19

UAV 性能约束问题,生成了安全可飞行曲面,但是在处理的过程中,对原始地形的保护做的不够好,对山谷抬升的同时对山峰削平太多,实际飞行时存在撞山的风险。另外,文献[12]对算法进行了深入的研究,对稀疏算法做了进一步的改进,将其成功地运用于三维轨迹规划,提高了算法的实时规划能力;文献[13]将时间指标加入算法代价函数中,通过速度调整策略进行三维轨迹规划,航迹规划的实时性得到加强。

综上所述,目前对于无人机低空突防轨迹规划的研究还不够完善,没有综合考虑无人机自身的性能约束,对环境结合不够紧密,存在超出飞机自身安全底线的可能性和环境模型与规划轨迹冲突的风险点。因此,本文采用基于时间指令的A*算法及轨迹约束等因素进行建模,以控制飞机自身安全性能。然后,运用二维三次卷积插值法对数字高程地图进行处理,以提高网格分辨率,为生成安全曲面提供精细化环境模型。最后,运用综合地形平滑技术对地形坡度和曲率进行约束,并添加150m的最低安全飞行高度,生成安全可飞行曲面,以期在UAV满足机动性和隐蔽性的基础上减少撞山风险,提高突防作战能力。轨迹规划的流程如图1所示。

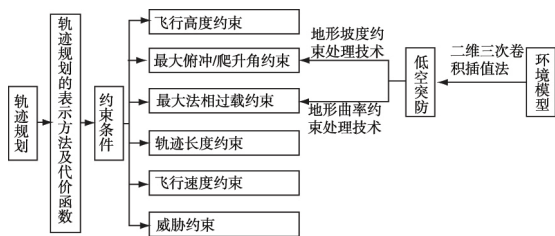


图1 轨迹规划流程图

2 低空突防轨迹规划建模

无人机轨迹规划是描述无人机在安全高效的前提下从初始点飞往目标点的飞行轨迹。因此,轨迹规划不仅需要考虑合适的轨迹表示方法来描述飞行,还需要添加多种约束条件来满足飞机自身的飞行安全指标,从而构建代价函数,以求得轨迹规划的最优解。

2.1 轨迹的表示方法

采用无人机三维位置坐标、每个节点的时间和速度信息 $(x_0, y_0, z_0, t_0, v_0)$ 的表示方法,这样做不仅可以获取飞行器的位置信息、飞行时间与速度,还有利于掌握飞机基本动态,便于直观的获得飞行信息。

2.2 轨迹规划的约束条件

2.2.1 飞行高度约束

无人机进行低空突防时,高度限制因素有两个:一是避免撞地,需设置一个最低安全飞行高度;二是隐蔽性,需设置无人机不被发现的最高离地高度。因此,高度限制如下方法

$$z_{\text{safe}} \leq z(t) - z_{\text{terrain}}(t) \leq z_{\text{follow}} \quad (1)$$

其中: $z_{\text{terrain}}(t)$ 表示地形高度, z_{safe} 表示最小安全飞行高度,

z_{follow} 表示地形跟随飞行时无人机达到隐蔽效果的最高离地高度。

2.2.2 最大俯冲/爬升角约束

无人机在地形跟随或地形回避时,结合其自身的机动性能,需将俯冲/爬升角进行限制,设 θ_{zmax} 为最大俯冲/爬升角,则

$$\tan^{-1}\left(\frac{z_i - z_{i-1}}{d}\right) < \theta_{\text{zmax}} \quad (2)$$

其中: z_i 和 z_{i-1} 分别为第*i*和*i-1*个轨迹节点的高程值, d 为两点间的水平距离。

2.2.3 最大法向过载约束^[14]

轨迹的曲率 ρ_z 和法向过载 n_z 的关系如下所示

$$\rho_z = \frac{n_z - g}{V^2} \quad (3)$$

式(3)表明,对无人机法向过载的约束可以转化为对地形曲率的约束,并且当速度一定时,过载与曲率成正比。假设无人机的最大法向过载为 n_{zmax} ,可以得出地形曲率的最大值 ρ_{zmax} ,通过对地形曲率进行约束使其满足无人机的机动性能。

2.2.4 轨迹长度约束

在进行轨迹规划时,考虑到无人机机动性能,节点间轨迹长度不宜太小。另外,结合油耗约束,整个轨迹航程不能过长,其约束如下

$$\begin{aligned} L_i &\geq L_{\min} \\ \sum L_i &\leq L_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: L_i 表示第段轨迹长度, L_{\min} 为最小轨迹长度, L_{\max} 为最大航程。

2.2.5 飞行速度约束

为防止无人机失速,速度有上下限约束,即

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad (5)$$

2.3 轨迹规划的代价函数

在代价函数设计中,稀疏A*算法的代价函数为

$$f(x) = g(x) + h(x) \quad (6)$$

其中: $g(x)$ 表示从起始点到达当前点*x*的真实代价, $h(x)$ 为启发式函数,表示从当前节点*x*到达目标点的估计代价, $f(x)$ 表示总代价值。在A*算法的扩展中,每一步都要求*f(x)*值最小的节点插入到open表中。文献[15]可知,若 $h(x)$ 不超过当前节点到目标点的真实代价,同时搜索区域里有可行解,则A*算法可以找到最优解,生成最优轨迹。

文献[16]提出了基于时间的A*算法的代价函数,具体公式如下

$$f_i(n) = g_i(n) + h_i(n) \quad (7)$$

式(7)中:所有量都是与时间有关的函数, n 表示飞机目前所在的节点, $f_i(n)$ 表示飞机从起始点到目标点总的的时间代价, $g_i(n)$ 表示从起始点到达当前节点所用的时间, $h_i(n)$ 表示从当前节点到达目标点需要花费的时间估计。综上,单纯的考虑时间代价并不实用。在飞行过程中,还应考虑各种轨迹约束条件、环境影响以及威胁因素等。因此,本文在轨迹规划

过程中,使用如下所示的代价函数。

$$\begin{aligned} CostFun = & \omega_1 * ThreatCost + \omega_2 * TimeCost \\ & + (1 - \omega_1 - \omega_2) FuelCost \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中: $CostFun$ 为总代价函数, $TimeCost$ 、 $ThreatCost$ 、 $FuelCost$ 分别为时间代价、威胁代价、燃油代价, ω_1 、 ω_2 为权重因子。根据任务需要,地面人员在各个代价因素之间做出的倾向性选择。式(8)表示在满足给定的时间约束条件下,追求威胁代价和燃油代价最小,从而使得总代价函数最小。

上式中,关于时间代价($TimeCost$)计算,受 A^* 算法代价函数的启发,计算采用下式

$$\begin{aligned} f_i(n) &= g_i(n) + h_i(n) \\ g_i(n) &= g_i(A) + L(nA)/v(nA) \\ h_i(n) &= T_c - T_{use} - L(nA)/v(nA) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中: n 为待扩展节点, A 为当前节点, $g_i(n)$ 表示从起始点到扩展节点 n 的时间代价, $g_i(A)$ 为起始点到当前节点的时间代价, $h_i(n)$ 为到达下一节点 n 以后实际剩余的飞行时间, $L(nA)$ 为当前点到下一扩展节点距离, $v(nA)$ 为区间飞行速度, $L(nA)/v(nA)$ 为从当前点 A 到达下一节点 n 的时间代价, T_{use} 为飞行到当前点 A 所用时间, T_c 为指令总时间。

在考虑燃油代价时,由于燃油与航程直接相关,在无人机速度变化不大时,燃油代价可以等效为航程代价。

2.4 基于 AHP 理论的威胁等效

在轨迹规划时,无人机应根据地面的控制指令和突发的威胁信息做出实时反馈^[17]。由于受到机动性能限制,在低空突防时对时限要求严格,如果在线地对空导弹、高炮和雷达等分别处理会增加解算时间。因此,本文将威胁归一化处理,用半球表示威胁,半径表示威胁的大小,表达式为 (X, Y, Z, R, V) 。其中 (X, Y, Z) 表示半球圆心坐标, V 为威胁等级, R 为威胁半径。由于本文在轨迹规划过程中,采取地形跟随飞行,威胁的高度均大于无人机飞行高度,对于威胁采取绕飞的方式,结合安全可飞行曲面考虑,可以将半球威胁等效为其在平面上的投影圆,而认为其高度无限。

由于威胁源的大小取决于它的作用距离,本文引入 AHP 理论的 9 级分层表示方法进行描述,计算公式如下^[18]

$$l_{th} = \frac{\kappa 1 g P_{ra}}{V_{th} - 10} \quad (10)$$

式(10)中: $P_{ra} \in (0, 1)$, $V_{th} \in [1, 9]$, $V_{th} \in Z$, l_{th} 表示当前点到威胁中心的距离, κ 是与威胁源相关的常数, V_{th} 为威胁级别。它表示威胁层次从半球中心逐渐向边缘降低,超出半球区域,威胁影响忽略。

由此,可以根据摧毁概率 p_{cr} 和击伤概率 p_{mi} 计算出相应的摧毁距离 l_{cr} 和击伤距离 l_{mi} ,从而得到威胁半径 R 的大小。

通常情况下,地面威胁主要有探测雷达、高炮、地空导弹等,下面对其进行威胁特征的研究(假设 $P_{cr} = 0.75$ 、 $P_{mi} = 0.25$)。结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 典型条件下不同威胁种类的特性值

威胁类型	V_{th}	R/km	l_{cr}/km	l_{mi}/km
雷达	1	52	7	38
高炮	5	8	4	6
地空导弹	7	40	27	35

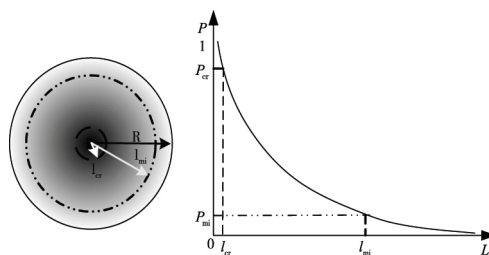


图 2 威胁区域层次化示意图

3 数字高程地图预处理

3.1 数字高程地图模型

本文采用正方形网格模型,即用正方形进行网格划分,每个网格有对应的高程值,该高程值可以认为是在网格的中心,也可以认为是该网格的平均值。

目前大多数三维轨迹规划中,通常使用仿真地形,通过计算机生成的数字地图虽然可以反映地形高度和坡度大小等信息,但模拟的数据有很多简化和假设^[19]。为了使仿真更加贴近实际,本文采用美国国家测绘局和美国太空总署所使用的精度为 90 m 的 SRTM3 数据系统。在研究的过程中,采用分辨率为 90 m 的文件,地图编号为 N33E071,使用 globe mapper 软件生成的地形如图 3 所示,使用 Matlab 生成的三维数字地形如图 4 所示。

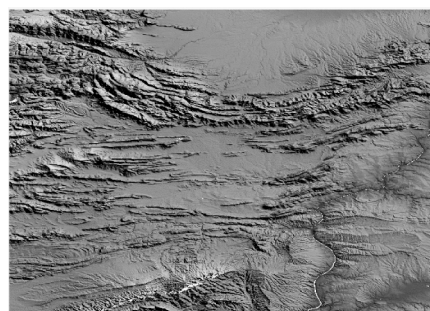


图 3 标准数字高程地图

3.2 数字高程地图的插值处理

本文用到的是离散数据点,对地形的曲率和坡度进行限制时,需要知道网格周围未知点的高程。因此,选用二维三次卷积插值法对所选地图进行插值处理,得到更多的离散点。

二维三次卷积插值的原理是利用给定点附近 16 个点的

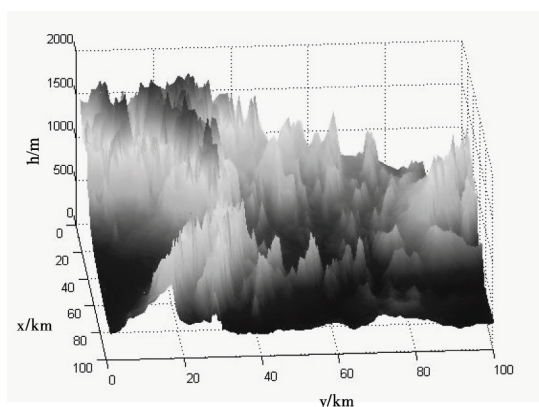


图4 标准数字高程地图

数据高程进行加权运算,如图5所示。

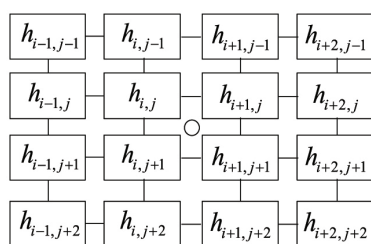


图5 二维三次卷积插值原理图

图5中,中心的圆圈表示要求的未知点,平面坐标给定为 (x, y) ,通过三次卷积多项式对附近的16个点进行加权求取该点的高程值。表达式如下:

$$h(x, y) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} a(\Delta y) \\ b(\Delta y) \\ c(\Delta y) \\ d(\Delta y) \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} h_{i-1,j-1} & h_{i,j-1} & h_{i+1,j-1} & h_{i+2,j-1} \\ h_{i-1,j+1} & h_{i,j+1} & h_{i+1,j+1} & h_{i+2,j+1} \\ h_{i-1,j+2} & h_{i,j+2} & h_{i+1,j+2} & h_{i+2,j+2} \\ h_{i-1,j-1} & h_{i,j-1} & h_{i+1,j-1} & h_{i+2,j-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\Delta y) \\ b(\Delta y) \\ c(\Delta y) \\ d(\Delta y) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_i) / l, \Delta y = (y - y_i) / l \\ a(\Delta x) = (-\Delta x^3 + 2\Delta x^2 - \Delta x) \quad a(\Delta y) \\ \quad = (-\Delta y^3 + 2\Delta y^2 - \Delta y) \\ b(\Delta x) = (3\Delta x^3 - 5\Delta x^2 + 2) \quad b(\Delta y) \\ \quad = (3\Delta y^3 - 5\Delta y^2 + 2) \\ c(\Delta x) = (-3\Delta x^3 + 4\Delta x^2 + \Delta x) \quad c(\Delta y) \\ \quad = (-3\Delta y^3 + 4\Delta y^2 + \Delta y) \\ d(\Delta x) = (\Delta x^3 - \Delta x^2) \quad d(\Delta y) \\ \quad = (\Delta y^3 - \Delta y^2) \end{cases} \quad (12)$$

运用二维三次卷积方法的插值仿真结果如图6所示。

由图6可以看出,运用二维三次卷积插值法对周围的16

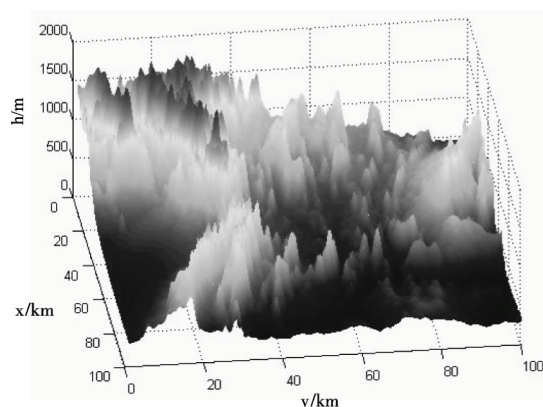


图6 二维三次卷积插值后效果图

个点进行加权,即可得高分辨率的数字高程地图。

4 安全可飞行曲面生成技术

无人机在进行地形跟踪/回避时,机动性能约束主要是最大爬升/俯冲角约束和最大法向过载约束。一方面,通过限制地形的坡度满足来满足爬升/俯冲角约束;另一方面,通过限制地形曲率来满足最大法向过载约束。在高精度地图的基础上,运用综合地形平滑算法对地形的坡度和曲率进行平滑处理。最后,在处理过的地形上加上无人机安全飞行最低高度,即可生成安全可飞行曲面。

4.1 地形坡度约束处理技术

无人机在进行地形跟踪/回避时,可能遇到山峰较陡或者坡度下降太快,爬升/俯冲角超过限制而导致撞山的情况。因此,采用一种坡度限制的平滑方法。

假设无人机最大爬升角限制为 λ_{\max} ,坡度处理简图如图7所示。

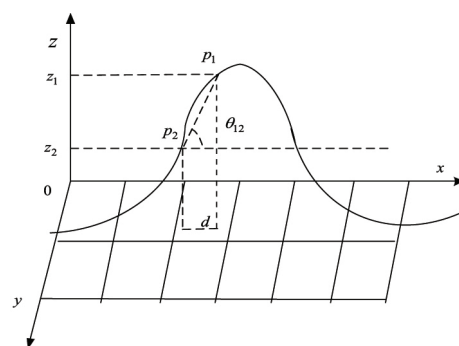


图7 地形坡度简图

图7中 p_1, p_2 为网格上对应的连续相邻的两个点, z_1, z_2 分别为该点的高程值, θ_{12} 表示两点连线与地面的夹角, d 为两点的水平距离, θ_{12} 可以表示为

$$\theta_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{z_1 - z_2}{d} \right) \quad (13)$$

若 $\theta_{12} > \lambda_{\max}$ 抬高 p_2 点 则

$$z_2 = z_1 - d \times \tan(\lambda_{\max}) \quad (14)$$

若 $\theta_{12} < -\lambda_{\max}$ 抬高 p_1 点 则

$$z_1 = z_2 + d \times \tan(\lambda_{\max}) \quad (15)$$

通过计算坡度进行高度修正,如此反复迭代,直到满足条件为止,坡度约束处理完成。

4.2 地形曲率约束处理技术

设地形高程函数为 $z = h(x, y)$, 则曲率 ρ_x 可以表示为

$$\rho_x = \frac{h''_x}{(1 + h'^2_x)^{2/3}} \quad (16)$$

其中: h'_x 和 h''_x 分别为高程函数 $h(x, y)$ 的一阶导数和二阶导数。

式(16)表明,地形曲率 ρ_x 与 h'_x 成反比,与 h''_x 成正比。由于坡度只与 h'_x 成正比,所以坡度约束不足以限制曲率的大小,需要对曲率做进一步约束处理,曲率约束如图8所示。

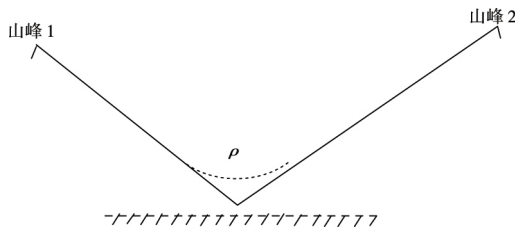


图8 曲率约束处理简图

由于三次卷积插值的方法会造成网格点的二阶偏导数不连续,必须分别考虑其二阶偏导数,以二阶右偏导数为例(二阶左偏导数方法相同),曲率约束处理方法如下:

Step1: 利用高程数据,找出每一行和每一列中的最高点;

Step2: 从最高山峰点开始,分别向两侧进行曲率约束;

Step3: 计算网格点 (x_i, y_j) 处的一阶偏导数, $h'_x = (h_{i+1,j} - h_{i-1,j}) / 2l$;

Step4: 计算二阶右偏导 $h''_{x右} = (2h_{i-1,j} - 5h_{i,j} + 4h_{i+1,j} - h_{i+2,j}) / l^2$ 和二阶左偏导 $h''_{x左} = (-h_{i-2,j} + 4h_{i-1,j} - 5h_{i,j} + 2h_{i+1,j}) / l^2$;

Step5: 将 h'_x 和 $h''_{x右}$ 代入式(16)中得出地形的曲率 $\rho_{x右}$ 。

Step6: 保持 h'_x 不变,使坡度满足要求,只需要进一步对山峰和山谷进行处理,

假设 $\Delta h = 1/6 \cdot l^2 \cdot (\rho_{x右} - \rho_{\max}) \cdot (1 + h'^2_x)^{(3/2)}$

对于山峰 If $\rho_{x右} < -\rho_{\max}$ then $h(i-1, j) = h(i, j) - \Delta h$, $h(i+1, j) = h(i, j) - \Delta h$;

对于山谷 If $\rho_{x右} > \rho_{\max}$ then $h(i, j) = h(i, j) + \Delta h$, $h(i+2, j) = h(i+2, j) + \Delta h$ 。

Step7: 重新判断坡度是否满足约束要求,若满足,程序结束。否则,返回Step2。

y 方向的限制原理与 x 方向相同。

4.3 综合地形平滑算法

结合安全飞行高度,采用综合地形平滑算法生成可飞行

安全曲面,基本流程如下:

Step1: 对原始的数字地形进行二维三次卷积插值,提高分辨率;

Step2: 采用坡度平滑处理技术对坡度限制;

Step3: 采用曲率平滑技术进行曲率限制;

Step4: 判断处理后的坡度是否满足条件,满足的话,进入下一步,否则,返回Step2;

Step5: 将满足约束的数字地形加高150 m的安全飞行高度,得到安全可飞行曲面,程序结束。

综合地形平滑算法的基本流程图如图9所示。

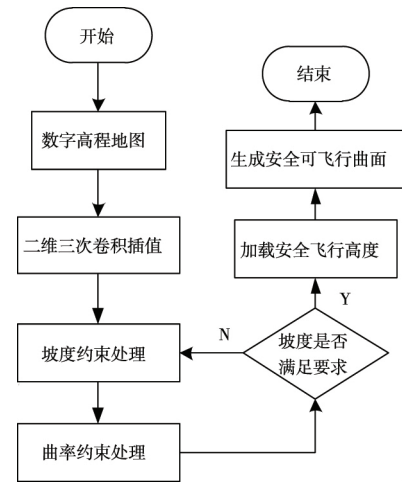


图9 综合地形平滑算法基本流程图

4.4 数字仿真与分析

使用综合地形平滑算法进行仿真。仿真所用参数: $n_{\max} = 3g$, $\lambda_{\max} = 45^\circ$, $\rho = 200 \text{ m/s}$, $h = 150 \text{ m}$ 。仿真结果如图10-13所示。

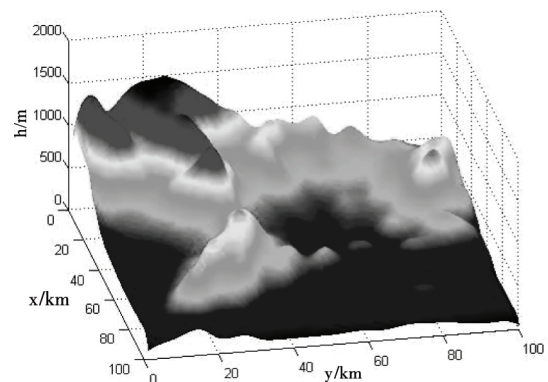


图10 综合地形平滑算法生成的安全可飞行曲面

图10为综合地形平滑算法生成的安全可飞行曲面。由图可知,由于综合地形平滑算法对曲率的限制使地形的一阶导数基本不变,曲率的调节对坡度的影响较小,减少了迭代

的次数 较好的保持了原有地貌特征。

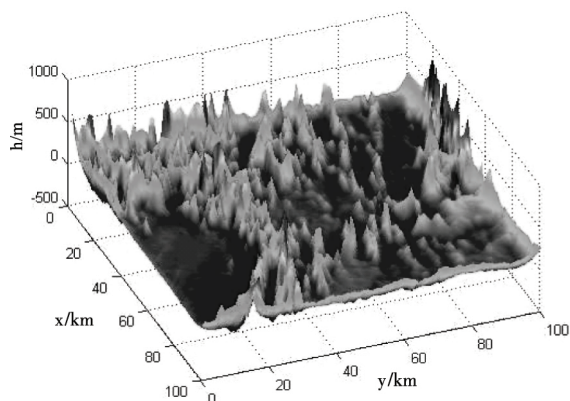


图 11 综合地形平滑算法处理后与原地图高度差

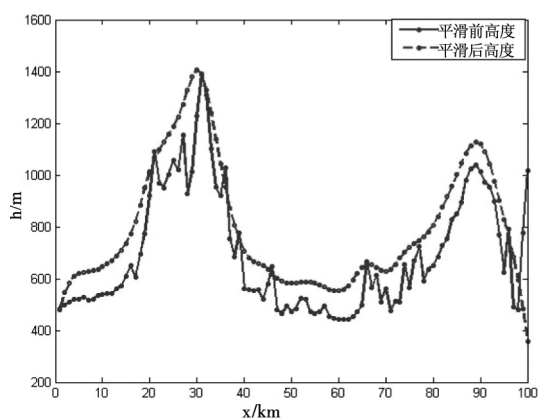


图 12 $y = 38\text{km}$ 平滑前后剖面对比图

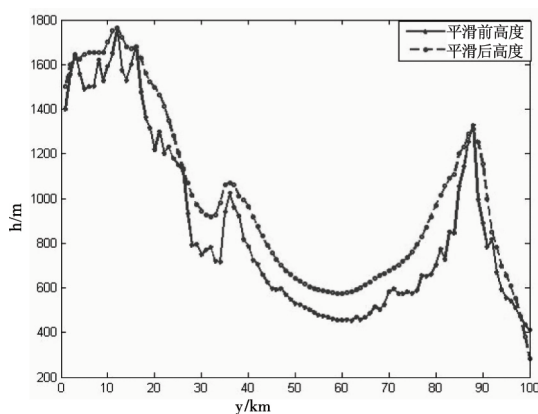


图 13 $x = 20\text{km}$ 平滑前后剖面对比图

由图 11 - 13 可知,地图平滑前后高度相差最大约 150 m,说明平滑后较好的保持了原有地形特征,在满足无人机动性和隐蔽性的基础上,优化低空突防轨迹,不仅减少 UAV 撞山概率,增大低空突防能力,而且总体代价较小。

5 小结

1) 综合地形平滑方法可有效地体现山峰和山谷等地貌特征。

2) 本文所采用的方法生成的安全可飞行曲面,总体代价较小。在满足无人机的机动性和隐蔽性的基础上,可安全飞行,减少撞山概率,达到了利用地形跟踪和地形回避实现自身隐蔽和对敌突袭的目的。

参考文献:

- [1] J Tožička, A Komenda. Diverse Planning for UAV Control and Remote Sensing[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2199 - 2219.
- [2] Cao H, Liu Y, Yue X, et al. Cloud - Assisted UAV Data Collection for Multiple Emerging Events in Distributed WSNs[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1818 - 1831.
- [3] Juntong Qi, Tong Ding, Xiang Lu. Design of multi - UAVs flight control system and trajectory planning[J]. Chinese Control Conference, 2018, 37: 9968 - 9973.
- [4] Jiadong LI, Xueqi LI, Lijuan YU. Multi - UAV Cooperative Coverage Path Planning in Plateau and Mountain Environment[J]. Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2018, 33: 820 - 824.
- [5] William Metzler, Daniel Pinson, Austen Hendrickson, et al. Low - Cost Drone System for Analyzing Elevation[J]. Systems and Information Engineering Design Symposium, 2018, 2: 182 - 184.
- [6] Yueneng Yang, Jie wu, Wei Zheng. Adaptive fuzzy sliding mode control for robotic airship with model uncertainty and external disturbance[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(2): 250 - 255.
- [7] 华珊珊. 无人机航路自动规划优化方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 45 - 48.
- [8] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1075 - 1083.
- [9] 刘凌云, 彭靖. 低空突防仿真用数字地形模型的建立[J]. 中国体视学与图像分析, 2010, 15(3): 245 - 250.
- [10] 李清. 综合低空飞行与突防系统研究[D]. 南京航空航天大学, 1998.
- [11] 胡志忠, 徐克虎, 沈春林. 低空突防用数字地形的平滑处理[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(5): 493 - 498.
- [12] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [13] 周青, 李广文. 基于 A* 算法的无人机四维航迹规划研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(4): 92 - 96.
- [14] Jennifer Nicole Wilburn. Development of an Integrated Intelligent Multi - Objective Framework for UAV Trajectory Generation[D]. Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2013.
- [15] 赵明元, 周军. 基于 A* 算法的四维实时航迹规划算法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(3): 98 - 101. (下转第 66 页)

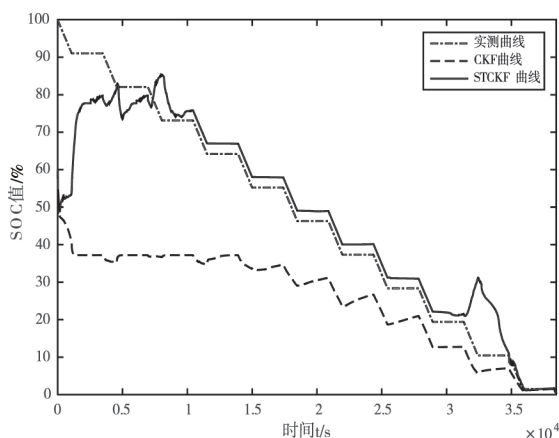


图6 40%误差时 CKF 与 STCKF 估计曲线

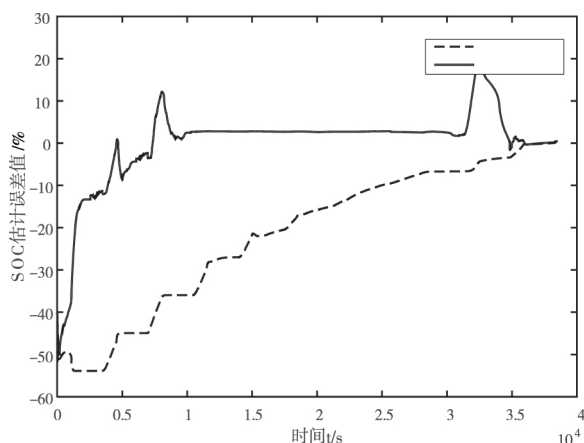


图7 40%误差时 CKF 与 STCKF 估计误差曲线

5 结论

- 1) 二阶 RC 模型具有较高的建模精度,可以良好模拟锂电池内部充放电过程;
- 2) 通过调节卡尔曼滤波增益,使残差序列保持正交,算法精度得到提高,收敛时间减少;
- 3) 强跟踪容积卡尔曼滤波在磷酸铁锂电池 SOC 估计中,利用强跟踪技术提高了算法的鲁棒性,滤波精度高,结构

清晰简单,在非线滤波工程应用中有更广阔的前景。

参考文献:

- [1] 蒋超宇,王伟超,杨学平. 混合动力汽车磷酸铁锂动力电池建模与 SOC 计算[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 897-901.
- [2] Zhang L, Lei Z, Papavassiliou C, et al. Intelligent Computing for Extended Kalman Filtering SOC Algorithm of Lithium-Ion Battery[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 4(4): 1-14.
- [3] 吴燕,周云山,李泉. 三元锂电池 SOC 电量准确估计仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(12).
- [4] 夏飞,王志成,郝硕涛,等. 基于改进扩展卡尔曼粒子滤波算法的锂电池 SOC 估计[J]. 系统仿真学报, 2018-11.
- [5] Garcia R V, Pardal P C P M, Kuga H K, et al. Nonlinear filtering for sequential spacecraft attitude estimation with real data: Cubature Kalman Filter, Unscented Kalman Filter and Extended Kalman Filter[J]. Advances in Space Research, 2019.
- [6] 贺姝,师昕. 带渐消因子的容积卡尔曼滤波算法[J]. 科技与创新, 2017, 13(1): 1-2.
- [7] 赵伟. 基于容积规则的鲁棒卡尔曼滤波算法研究与应用[D]. 燕山大学, 2017.
- [8] 梁新宇,吴建德,黄国勇,等. H_{∞} 鲁棒自适应 CKF 算法在组合导航中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(9).
- [9] Yin Z, Li G, Sun X, et al. A speed estimation method for induction motors based on Strong Tracking Extended Kalman Filter[C]. Power Electronics & Motion Control Conference. 2016.
- [10] Bhuvana V P, Huemer M, Tonello A. Battery internal state estimation using a mixed Kalman cubature filter[C]. IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2015.

【作者简介】



帅孟超(1993-),男(汉族),湖北人,硕士生,研究方向:新能源与储能技术。

宋春宁(1969-),男(汉族),广西人,副教授,研究方向:电池管理系统及其应用。

邓志刚(1993-),男(汉族),山东人,硕士生,研究方向:新能源与储能技术。

【作者简介】



樊旭东(1991.04),男(汉族),陕西韩城人,工学硕士,主要研究领域为无人机通信。

阮玉晗(1991.12),女(汉族),陕西咸阳人,工学博士,西安电子科技大学通信工程学院师资博士后,主要研究方向为空地一体化通信网络。

黄康强(1991.02),男(汉族),湖南安化人,作战参谋,主要研究无人飞行器作战系统与技术。

李勇朝(1974-),男(汉族),陕西西安人,教授,博士生导师,主要研究领域为宽带无线通信。

(上接第30页)

- [16] 郑昌文,丁明跃,周成平. 一种飞行器在线航迹重规划算法[J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(2): 90-92.
- [17] Reza Kamyar, Ehsan Taheri. Aircraft Optimal Terrain/Threat-Based Trajectory Planning and Control[J]. Journal of guidance control and dynamics, 2014, 37(2): 466-483.
- [18] 王铀. UCAV 自主攻击轨迹快速优化设计[D]. 西安:空军工程大学硕士学位论文, 2012.
- [19] 李璠. 无人机航迹规划算法研究[D]. 大连:大连理工大学硕士学位论文, 2011.