

无人机航迹控制模块的优化设计与实现

张凡[†], 刘正坤, 林典润

(广州中科智云科技有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:当前在无人机作业过程中,能够根据预设的目的地信息自主控制飞行的模块,在多个最优方案条件下,需要预设复杂约束条件,否则就会存在寻优过程不收敛的问题,导致控制效果不佳。针对这一问题,研究了无人机航迹自主控制模块的改进设计。设计可以采集无人机的位置、速度等飞行信息,并上传至飞行主控制器的模块硬件,软件在符合无人机飞行约束与威胁约束的条件下,规划获取后续飞行的最优航迹点。为了保证无人机飞行距离最短、高度最小,将无人机航迹自主控制问题变成优化问题。在面临多个最优方案条件下,构建基于鲸鱼算法的无人机航迹选择模型,以无人机飞行航线代价最小为目的,使用鲸鱼算法求解无人机航迹自主控制方案,完成软件设计。实验结果显示:使用所设计模块后,无人机可自主控制飞行航迹,成功避开静态威胁因素、动态威胁因素安全飞行至目的地。

关键词:无人机;航迹自主控制模块;鲸鱼算法;约束条件;不收敛;选择模型;航迹规划

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Optimization Design and Implementation of UAV Track Control Module

ZHANG Fan[†], LIU Zhengkun, LIN Dianrun

(Guangzhou Icloudstar Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: At present, in the process of UAV operation, the module that can autonomously control the flight according to the preset destination information needs to preset complex constraints under the condition of multiple optimal schemes, otherwise there will be a problem of non convergence in the optimization process, leading to poor control effect. Aiming at this problem, the improved design of UAV track autonomous control module is studied. The design can collect the position, speed and other flight information of the UAV, and upload them to the module hardware of the flight master. The software can plan and obtain the optimal track point for subsequent flight under the conditions of meeting the flight constraints and threat constraints of the UAV. In order to ensure the shortest flight distance and minimum altitude of UAV, the problem of autonomous control of UAV track is turned into an optimization problem. In the face of multiple optimal solutions, a UAV path selection model based on the Whale Algorithm is constructed. With the goal of minimizing the cost of UAV flight path, the Whale Algorithm is used to solve the UAV path autonomous control scheme and complete the software design. The experimental results show that after using the designed module, the UAV can control its flight path independently and successfully avoid static threats and dynamic threats to fly to the destination safely.

Key words: UAV; track autonomous control module; whale algorithm; constraints; non convergence; select model; route planning

无人机的航迹规划模块主要是在某些约束条件下获取符合无人机性能、作业环境信息约束条件的最佳飞行航线。其属于无人机任务规划的核心技术,支撑无人机完成自主控制、智能飞行^[1]。无人机的快速发展与大量使用不仅拓展了无人机的应用市场,也导致人们对无人机的要求逐渐变高^[2,3]。所以,研究无人机航迹自主控制模块设计技术,存在现实意义。

目前,也有相关学者使用智能模块控制无人机飞行航线,如彭皓月等人^[4]使用自适应 B 样条算法解决多无人机航迹规划问题,并得到较好的规划效果,但此方法对动态障碍物的避障效果有待测试;宋宏川等人^[5]设计一种控制器完成无人机航迹控制,虽然在实验中该控制器被验证具有较好的应用效果,但飞行时存在多种突发条件,控制器若不能自适应调整控制策略,便会导致航迹控制失败;陈方正等人^[6]针对动态威胁环境下的单无人机航迹规划问题提出有效方法,但此方法存在使用局限,不适用于多无人机控制问题,且定位结果存在误差。

以上方法主要是因为是在无人机作业过程中,模块根据预设的目的地信息自主控制飞行,在多个最优方案条件下,需要预设复杂约束条件,否则就会存在寻优过程不收敛的问题,导致控制效果不佳,为此,本文提出一种改进的无人机航迹自主控制模块设计方法,以期实现无人机航迹自主控制优化。

1 无人机航迹自主控制模块的优化设计

1.1 硬件设计

提出的无人机航迹自主控制模块主要是基于位置服务(Location Based Services, LBS)系统实现无人机航迹自主控制。无人机使用自主控制模块后,管理人员能够通过移动终端设备设置无人机的起点与目标点坐标,移动终端将所设置的信息上传至服务器端,服务器端使用安装在无人机身上的 GPS 装置、传感器,采集飞行环境中的障碍物信息、无人机目前速度信息上传至服务器端后,服务器端构建基于鲸鱼算法的无人机航迹自主控制模型,规划设计合理的无人机自主飞行航线,反馈至用户终端,用户终端点击使用后,无人机便可进行航迹自主控制飞行。模块的硬件结构图如图 1 所示。

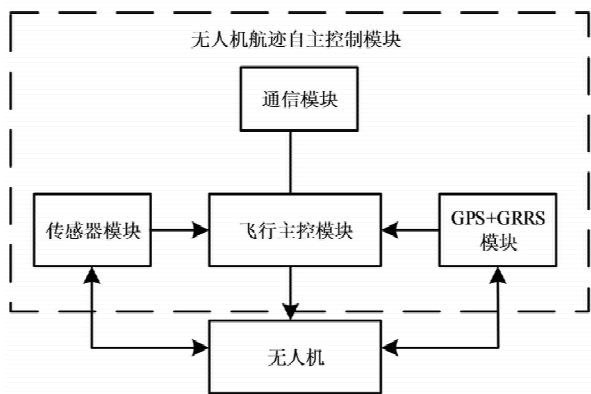
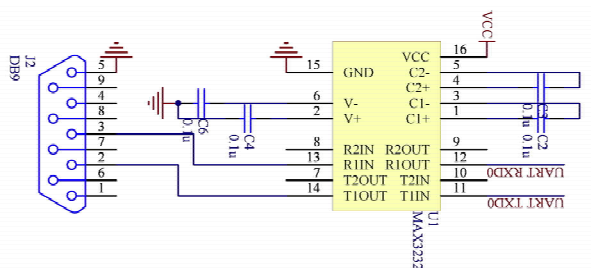
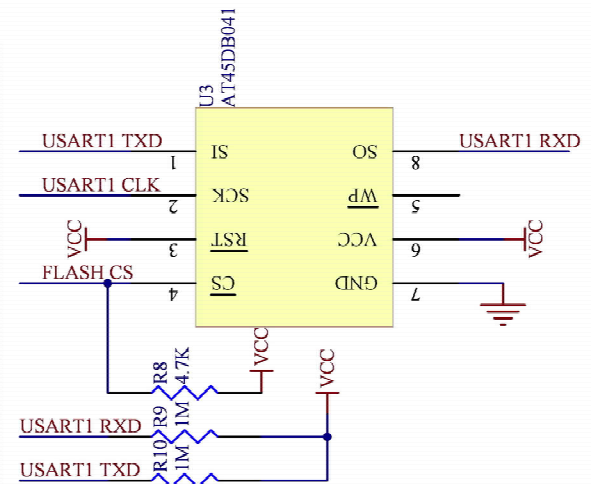


图 1 硬件结构

如图 1 所示,由飞行主控微处理器模块、传感器模块、串口模块、无线通信模块组成硬件结构。传感器模块属于无人机航迹自主控制中,对飞行环境信息感知的装置,可采集无人机的速度、加速度、高度等信息^[7]。当传感器模块与串口模块采集无人机的位置、速度等飞行信息后,上传至飞行主控模块,此模块计算无人机目前姿态后,结合无人机的目的地坐标信息,构建基于鲸鱼算法的无人机航迹自主控制模型,设计无人机航迹自主控制方案,实现无人机航迹自主控制。具体硬件设计如图 2 所示:



(a) 串口通信模块



(b) Flash 存储器模块

口,接收测量设备发出的命令;CC2420 无线通信模块通过接收控制器发送的 AT 命令来实现各种无线通信功能。

1.2 基于鲸鱼算法的无人机航迹自主控制模块软件设计

1.2.1 航迹规划算法设计

一般情况下,无人机航迹自主控制是在无人机作业区域 $N = \{n = (x, y, z)\}$ 中,结合无人机作业具体信息,在符合无人机飞行约束与威胁约束的条件下,规划获取后续飞行的最优航迹点 $Y_j = (x_j, y_j, z_j)$ 。为了保证无人机飞行航线代价 I 为最小值,此代价主要是指无人机飞行距离最短、高度最小。则将无人机航迹自主控制问题变成优化问题:

$$\min I = I_z + I_K \quad (1)$$

$$\text{s. t. } f_j \leq 0, j = 1, 2, \dots, n$$

$$k_j = 0, i = n + 1 \quad (2)$$

其中, I_z 、 I_K 依次是备选飞行航线距离与高度的代价函数; f_j 、 k_j 依次是无人机的飞行约束条件、威胁约束条件。

(1) 无人机航迹自主控制目标代价函数设计

无人机航迹自主控制目标代价函数主要分为距离型 I_z 、高度型 I_K 。

I_z 主要描述目前无人机坐标和目标点坐标的距离最小化,需设计最短飞行航迹,则:

$$I_z = \sum_{j=0}^{N-1} g_j \quad (3)$$

式中, g_j 是第 j 段航线中无人机坐标和目标点坐标的距离。则:

$$g_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2 + (z_{j+1} - z_j)^2} \quad (4)$$

式中, x_j 、 y_j 、 z_j 是无人机目前在第 j 段航线中的坐标。

无人机的飞行高度较低时,便能充分使用地形优势规避雷达干扰^[12]。高度代价函数 I_K 主要目的是设计飞行高度最小化的飞行航线。则:

$$I_K = \sum_{j=1}^N g_j \quad (5)$$

(2) 飞行约束条件 f_j

① 转向角。

无人机飞行航迹平滑性很重要,以约束无人机飞行航迹平滑为目的,设置各个航路点的最大转向角是:

$$\alpha_{\max} = \frac{m_{\max} f}{U} \cdot \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2} \quad (6)$$

式中, m_{\max} 、 f 依次是无人机最大横向过载重力、加速度; U 是无人机飞行速度。转向角约束条件 o_1 设定:

$$o_1 = \max(\alpha_j - \alpha_{\max}) \leq 0 \quad (7)$$

其中, α_j 是无人机目前在第 j 段航线中的转向角。

② 爬升/下降。

设置无人机飞行时爬升斜率最大值与最小值依次是 β_j 、 δ_j , β_j 、 δ_j 可约束无人机飞行航线中航路点 Ω_j 的斜率。则:

$$\Omega_j = \frac{z_{j+1} - z_j}{\sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}} \quad (8)$$

$$\beta_j = -1.5377 \times 10^{-10} z_j^2 - 2.6997 \times 10^{-5} z_j + 0.4211 \quad (9)$$

$$\delta_j = -2.5063 \times 10^{-9} z_j^2 - 6.3014 \times 10^{-6} z_j - 0.3257 \quad (10)$$

爬升与下降约束条件 o_2 、 o_3 依次是:

$$o_2 = \max(\Omega_j - \beta_j) \leq 0 \quad (11)$$

$$o_3 = \max(\delta_j - \Omega_j) \leq 0 \quad (12)$$

③ 地形。

无人机飞行时,飞行高度最小值必须大于安全高度阈值,则地形约束条件是:

$$o_4 = K_{\text{safe}} - \min(z_j - K_{\text{ter}}(x_j, y_j)) \leq 0 \quad (13)$$

式中, K_{safe} 、 $K_{\text{ter}}(x_j, y_j)$ 依次是安全高度阈值、 (x_j, y_j) 位置的地形高度值。

(3) 威胁约束条件 k_j

① 防空威胁 k_1 。

设计此约束条件的目的是避免无人机飞行时飞进地面防空雷达与武器的威胁区域中^[13]。则:

$$k_1 = \sum_{i=1}^N Q_{i,j} = 0 \quad (14)$$

式中, $Q_{i,j}$ 是第 i 个威胁在第 j 航路中点位置的威胁概率。

防空雷达的发现概率 Q_R 是:

$$Q_R = \begin{cases} 0, e > S_{S_{\max}} \\ \frac{1}{1 + \epsilon_2 (e^4 / \text{RCS}) \epsilon_1}, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中, ϵ_1 、 ϵ_2 是雷达固定参数; $S_{S_{\max}}$ 、 e 依次是雷达探测距离最大值、飞机雷达横截面 RCS 与雷达的间距。

② 禁飞 k_2 。

现实生活中,因为很多因素影响,某些区域禁止飞行。所以,本文设置禁飞地区约束条件是:

$$k_2 = W_{\ln \text{NEFZ}} \quad (16)$$

式中, $W_{\ln \text{NEFZ}}$ 是无人机飞进禁飞范围的长度。

1.2.2 基于鲸鱼算法的无人机航迹自主控制多方案求解

无人机航迹自主控制方案面临多方案选择问题,在众多最优方案中必须满足上述约束条件,才可作为最优解输出。可利用鲸鱼算法求最优解。具体求解过程如下:

设置每个鲸鱼的位置都代表一个无人机飞行航迹的可行解。猎物被鲸鱼锁定后,鲸鱼以最快的速度包围猎物,此时鲸鱼的位置更新为 $\vec{Y}(t)$ 。

$$\vec{E} = |\vec{D} \cdot \vec{Y}^*(t) - \vec{Y}(t)| \quad (17)$$

$$\vec{Y}(t+1) = \vec{Y}(t) - \vec{B}\vec{E} \quad (18)$$

式中, \vec{E} 代表包围猎物后猎物和鲸鱼的距离; \vec{D} 、 $\vec{Y}^*(t)$ 依次是系数向量、目前 t 次迭代后鲸鱼个体的最优位置; $\vec{Y}^*(t)$ 是 t 次迭代后,无人机航迹自主控制方案的目前解; \vec{B} 是系数向量; $\vec{Y}(t+1)$ 是 $t+1$ 次迭代后鲸鱼个体的最优位置($t+1$ 次迭代后,无人机航迹自主控制方案的目前解)。

$$\vec{B} = 2\vec{b}s - \vec{b} \quad (19)$$

$$\vec{D} = 2\vec{s} \quad (20)$$

式中, \vec{b} 、 \vec{s} 是随机数,前者属于收敛因子,迭代次数增多时, \vec{b} 从 2 变成 0,后者属于 $0 \sim 1$ 之间的随机向量。基于收缩包围机制中,鲸鱼结合鲸鱼群目前最优位置更新自己位置,变化 \vec{B} 、 \vec{D} 的数值能够保证鲸鱼在猎物邻域搜索,不会随意游行, \vec{b} 数值变小可以执行收缩包围行动^[14,15]。

鲸鱼狩猎时采取螺旋运动行为,此时存在:

$$\vec{E}' = |\vec{Y}^*(t) - \vec{Y}(t)| \quad (21)$$

$$\vec{Y}(t+1) = \vec{E}' \times e^{c\omega} \times \cos(2\pi\tau\omega) + \vec{Y}^*(t) \quad (22)$$

式中, $\vec{Y}(t+1)$ 是螺旋运动后鲸鱼的位置; \vec{E}' 是目前鲸鱼和猎物之间的距离; c 、 ω 依次是描述螺旋形状的常数、 $-1 \sim 1$ 之间随机数。鲸鱼在狩猎时,会多次收缩包围圈,以螺旋运行模式在猎

物旁边游行。

如果随机值 \vec{B} 的数值大于 1,鲸鱼选择向着随机猎物游动;如果随机值 \vec{B} 的数值小于 -1 ,鲸鱼选择向着最优猎物游动。注意 \vec{B} 是一个 D 维的向量,所以 \vec{B} 的模小于 1 时,即 $|\vec{B}| < 1$ 时,鲸鱼向着最优猎物游动,种群远离猎物,随机搜索更合适的猎物,则:

$$E = |\vec{D} \cdot Y_{\text{rand}}(t) - \vec{Y}(t)| \quad (23)$$

$$\vec{Y}(t+1) = Y_{\text{rand}}(t) - \vec{B} \cdot E \quad (24)$$

式中, $Y_{\text{rand}}(t)$ 是随机搜索猎物后鲸鱼位置; E 是随机搜索猎物后鲸鱼位置与猎物位置的距离。由此可以看出,在包围猎物的过程中,鲸鱼算法的搜索模式为在距最优猎物较近的周围搜索,即鲸鱼算法最后迭代的最优解表达式如下:

$$G = \left| \sum_t X_{\text{best}}(t) - Y_{\text{rand}}(t)E \right| \quad (25)$$

式中, $X_{\text{best}}(t)$ 是当前最优的鲸鱼位置。

则基于鲸鱼算法的无人机航迹自主控制方案求解步骤是:

(1)设置鱼群规模(无人机航迹自主控制方案的可行解数量)、迭代次数最大值、目前迭代次数、螺旋形状常数,将鱼群初始位置执行初始化。

(2)运算目前各个代表航迹自主控制方案可行解的鲸鱼个体适应度(即为飞行航线距离与高度的代价函数)并排序,代价最小的鲸鱼就是最优鲸鱼个体,其代表最符合式(1)、式(2)条件的无人机航迹自主控制方案。

(3)如果目前迭代次数不是最大次数,需再次求解无人机航迹自主控制方案,更新参数 \vec{b} 、 \vec{B} 、 \vec{D} 、 ω 。

(4)如果 \vec{B} 的绝对值小于 1,便使用式(17)、式(18)更新目前鲸鱼位置;如果 \vec{B} 的数值大于 1,或者小于 -1 ,便使用式(23)、式(24)更新目前鲸鱼位置。

(5)若迭代次数为最大值,再次运算各个鲸鱼个体的适应度,适应度最小的鲸鱼是最优鲸鱼个体,输出此鲸鱼个体在整个狩猎过程的位置信息,即代表无人机航迹自主控制时的最优飞行航线。若迭代次数不是最大值,便返回到步骤(3)循环操作。

2 实验分析

为测试本文技术的使用效果,设定无人机作业

区域 $N = [0, 500] \times [0, 500] \times [0, 2.0]$ km, 此区域中存在多处静态威胁因素, 每个威胁中心点位置和威胁半径信息如表 1 所示。

表 1 作业区域威胁信息

威胁因素	位置/km	垂直方向最大威胁半径/km
防空火炮 a	(365,400)	10
防空火炮 b	(300,300)	10
防空导弹 c	(200,200)	10
防空导弹 d	(300,100)	50
防空雷达 e	(400,300)	30
防空雷达 f	(300,250)	30
禁飞区 g	(200,300)	50

设置无人机的起点与终点的横坐标、纵坐标依次是(100km, 100 km)、(400 km, 400 km), 飞行高度最大值依次是 0. 10 km、3. 0 km, 飞行速度是 250 m/s。选取的无人机与监控界面如图 3、图 4 所示:



(a) 无人机选取

机身长度	6.67 m
机翼翼展	9 m
机身高度	1.11 m
机翼面积	4.66 m ²
最大起飞质量	400 kg
最大载荷	100 kg
最大起飞海拔高度	5000 m
纯电动版满载最大航程	300 km
混动版满载最大航程	1000 km

(b) 参数设置

图 3 无人机选取与监控系统界面



图 4 无人机监控页面

本文设计无人机控制模块, 设计并实现了与节点相兼容的无线传感器网络节点, 节点是基于低功耗微处理器芯片 ATMEGA128L, 射频部分采用 Chipcon 公司的 CC2420 芯片如图 5 所示。

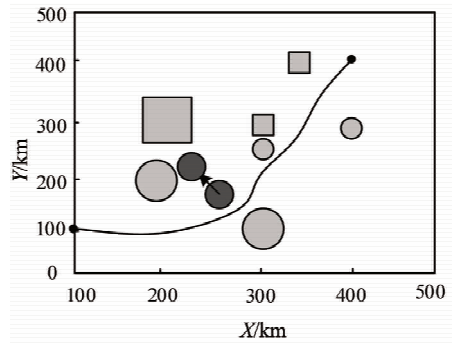
本文技术使用后, 无人机航迹自主控制效果如图 6 所示。

由图 6 可知: 本文技术使用后, 无人机能够按照本文技术规划的无人机飞行航线完成自主飞行

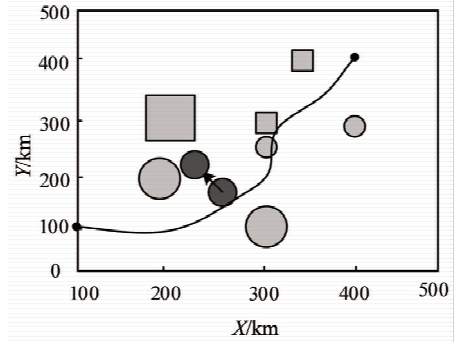
控制, 安全地从起点飞行至终点, 且飞行距离较短, 由此证明本文技术对无人机航迹自主控制存在可用价值。

上文实验是在具有静态威胁因素的环境测试本文技术使用效果, 接下来, 在静态威胁因素的基础之上, 设置无人机作业区域中存在动态威胁因素, 此动态威胁因素的起点坐标是 (150 km, 150 km)。将本文方法与文献[4]方法和文献[5]方

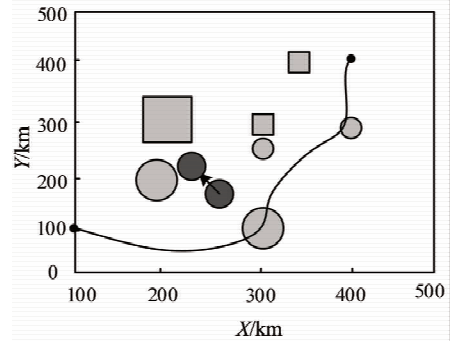
法进行对比,则三种方法使用后,无人机在作业过程中,航迹自主控制效果如图7所示。图7中,黑色圈形即为动态威胁因素,箭头代表此威胁因素的变化方向。



(a)本文方法



(b)文献[4]方法



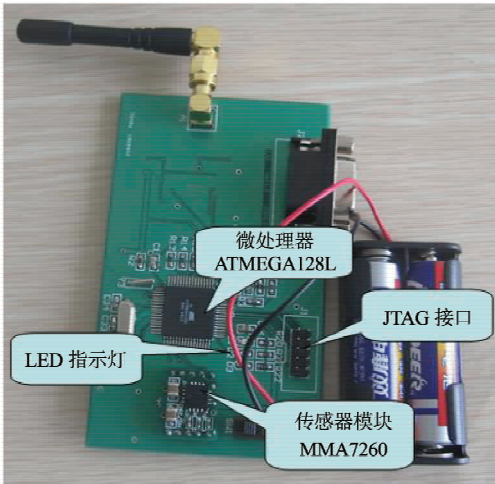
(c)文献[5]方法

图7 动态威胁因素下无人机航迹自主控制效果

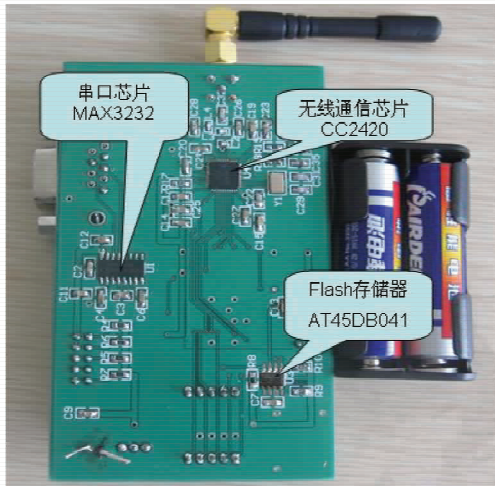
由图7可知:两种文献方法无法按照规划飞行航线完成自主飞行,而本文技术使用后,无人机能够按照技术规划的无人机飞行航线与静态、动态威胁因素都不存在碰撞情况,完成自主飞行控制,安全地从起点飞行至终点。

在上文所设置的两种工况(静态威胁、动态威胁)中,分析本文技术使用后,无人机在自主控制飞行航迹时转弯角速率、爬升角速率的变化。结果如图8、图9所示。

由图8、图9可知:本文技术使用后,无人机在存在静态威胁因素、动态威胁因素的工况飞行作业时,不管是爬升角还是转弯角,都不存在异常变化,表示本文为无人机设计的航迹自主控制方案质量较好。



(a)模块正面



(b)模块背面

图5 控制模块

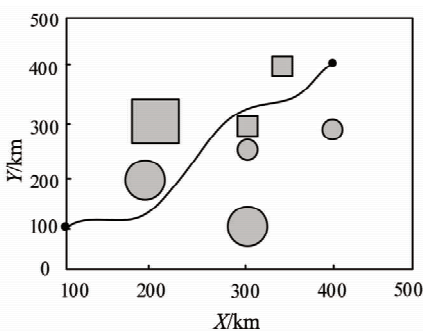


图6 静态威胁因素下无人机航迹自主控制效果

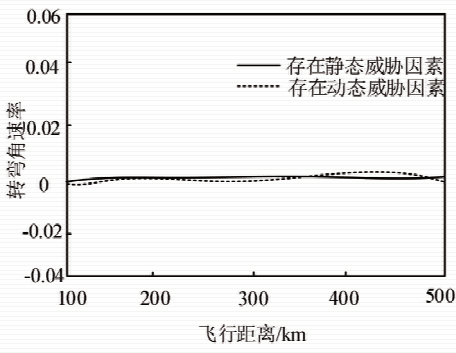


图 8 转弯角速率变化

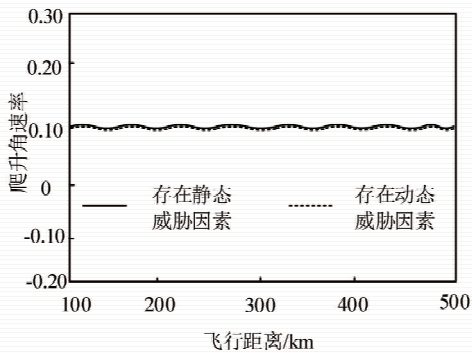


图 9 爬升角速率变化

在无人机飞行速度和拍摄角度不变的条件下,无人机拍摄采集的信息精确度与其飞行高度有关,分析本文技术使用前无人机飞行高度变化对比结果。为了保证地面分辨率足够大,确定无人机的最佳飞行高度,在指定拍摄角度垂直向下时,最佳飞行高度为 $H = fGR/\alpha$, 其中, H 为航拍高度, f 为航拍相机的焦距, 已知为 120 mm; GR 为地面分辨率, 已知为 10 cm; α 为像元大小, 已知为 0.012 mm。经求解, 确定无人机的最佳飞行高度为 1 km, 通过上文中传感器模块采集无人机的飞行高度信息, 令无人机在 1 km 高度下进行定高飞行, 采集得到无人机自主控制飞行时的高度结果如图 10 所示。

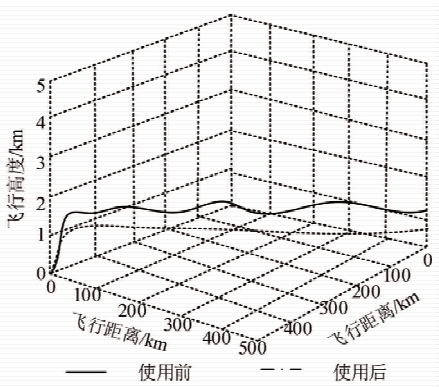
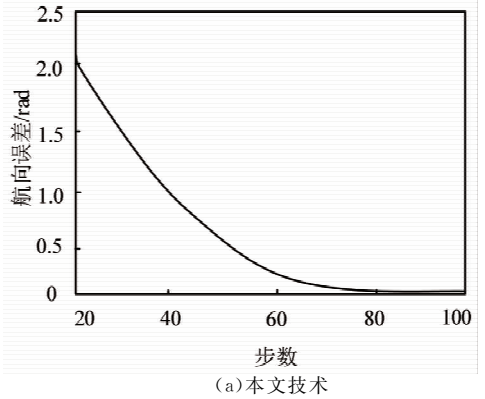
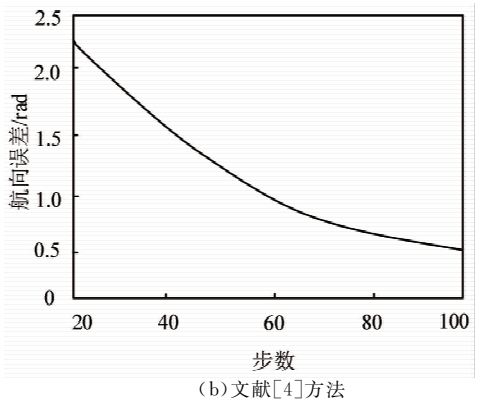


图 10 无人机飞行高度变化

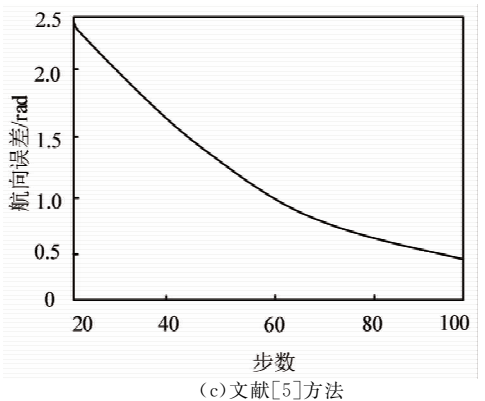
由图 10 可知:本文技术使用前,无人机飞行高度上下波动幅度大。相比之下,本文技术使用后,无人机按照本文技术规划的无人机飞行航线飞行时,飞行高度控制效果好,其飞行高度围绕设定值上下波动小。以上述内容作为初始条件,将本文方法与文献[4]方法和文献[5]方法进行对比,验证本文技术的航向误差收敛性,具体结果如图 11 所示。



(a)本文技术



(b)文献[4]方法



(c)文献[5]方法

图 11 航向误差收敛结果

由图 11 可知,随着步数的增大,用鲸鱼算法对 UAV 的航向误差进行校正所需要的时间也在不断缩短,也就是说, UAV 的航向将会快速地向所需要的矢量场方向会聚。在步数为 100 时,文献 [4]方法和文献[5]方法的航向误差仍在 0.5 rad

以上,而本文技术的航向误差已接近于0,表明本文技术的航向误差较小,设计方法在寻优过程中控制效果较好。这是因为本文方法在面临多个最优方案条件下,构建基于鲸鱼算法的无人机航迹选择模型,以无人机飞行航线代价最小为目的,使用鲸鱼算法求解无人机航迹自主控制方案。

3 结 论

针对无人机航迹自主控制模块优化设计问题进行研究,设计了一种无人机航迹自主控制模块。此技术充分利用位置服务技术的优势,在无人机航迹自主控制方案的设计中,能够实时、准确定位无人机位置信息,结合无人机目的地位置合理设计无人机航迹自主控制方案。经过测试,无人机使用本文技术设计的模块后,能够自主控制航迹,与静态、动态威胁因素都不存在碰撞情况,安全抵达目的地,本文技术可作为无人机航迹控制的参考工具。

参考文献

- [1] 王东,范叶满,薛金儒,等. 基于 GNSS 与视觉融合的山地果园无人机航迹控制[J]. 农业机械学报,2019,50(4):20-28.
- [2] 王晓海,孟秀云,李传旭. 基于 MPC 的无人机航迹跟踪控制器设计[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(1):191-198.
- [3] 王彪,唐超颖,姚振楠. 基于串级 LADRC 设计的旋翼无人机航迹跟踪控制[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(6):1358-1365.
- [4] 彭皓月,秦小林,侯屿,等. 多无人机航迹规划的自适应 B 样条算法[J]. 计算机工程与应用,2020,56(9):260-266.
- [5] 宋宏川,詹浩,夏露,等. 基于四元数和动态逆的无人机精确航迹控制[J]. 西北工业大学学报,2020,38(4):705-714.
- [6] 陈方正,郝绍杰. 动态威胁环境下单无人机测向定位航迹优化算法[J]. 国防科技大学学报,2021,43(5):137-143.
- [7] 张佳龙,闫建国,肖冰,等. 无人机编队协同追踪控制律和编队信息架构[J]. 西安交通大学学报,2019,53(6):134-141.
- [8] 马肇祥,朱庆伟,张俊,等. 蚁群优化算法的无人机室内航迹规划[J]. 西安科技大学学报,2022,42(2):307-316.
- [9] 王少奇,马东立,杨穆清,等. 高空太阳能无人机三维航迹优化[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(5):936-943.
- [10] 李文广,胡永江,庞强伟,等. 基于改进遗传算法的多无人机协同侦察航迹规划[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(2):248-255.
- [11] 钱洲元,雷明. 面向无人机航迹规划的自适应乌贼算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(10):37-46.
- [12] 冉剑,佟佳慧. 基于在线仿真的无人机飞控系统智能校正技术[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):795-800.
- [13] 李翰,张洪海,许卫卫,等. 物流无人机路径规划及评估方法研究[J]. 信息技术,2020(1):1-6.
- [14] 柯春艳,安思. 无人机全局路径规划算法研究[J]. 信息技术,2019(5):33-35,40.
- [15] 钱宇,祝祯祯. 基于改进动态规划的无人机搜寻航迹规划研究[J]. 计算机仿真,2021,38(1):32-36,75.