

# 无人机低空滑翔抗攻击突防控制律优化设计

陆兴华,明 仲,邱子琪,曾凌锋  
(广东工业大学华立学院,广东 广州 511325)

**摘 要:**为了提高无人机的低空滑翔抗攻击突防和控制能力,提出一种基于快速模型预测的无人机低空滑翔抗攻击突防控制技术。采用融合传感识别技术进行无人机的姿态和位置参数信息采集,分析无人机的低空滑翔控制的物理环境参数模型,构建无人机飞行轨迹地图模型,使用标准卡尔曼滤波器进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息的融合处理,根据信息融合结果进行控制指令设计。采用动态基元轨迹跟踪方法,得到无人机低空突防控制的滑模面,在有限 Morrey 空间内采用串联弹性驱动控制方法求得在控制约束参量分布模型的最优解。根据无人机低空突防段的初始位姿参数进行快速模型预测和飞行轨迹跟踪,实现低空滑翔抗攻击突防控制。仿真结果表明,采用该方法进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制的精度较高,无人机的姿态参数的自适应调节性能较好。

**关键词:**无人机;低空滑翔;抗攻击;控制律;标准卡尔曼滤波器

**中图分类号:**TP273;TN911

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2020)02-0183-05

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2020.02.035

## Optimal Design of Anti-attack Penetration Control Law for UAV Gliding at Low Altitude

LU Xing-hua, MING Zhong, QIU Zi-qi, ZENG Ling-feng  
(Huali College Guangdong University of Technology, Guangzhou 511325, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-attack penetration and control ability of unmanned aerial vehicle (UAV), a low-altitude gliding anti-attack penetration control technique based on fast model prediction is proposed. The attitude and position parameters of UAV are collected by fusion sensor recognition technology. The physical environment parameter model of UAV's low-altitude gliding control is analyzed, and the UAV flight trajectory map model is constructed. The standard Kalman filter is used to fuse the control information of anti-attack penetration control of UAV gliding at low altitude, and the control instruction is designed according to the result of information fusion. The sliding mode surface of the low altitude penetration control of UAV is obtained by using the dynamic primitive trajectory tracking method. The optimal solution of the distributed model of control constraint parameters is obtained by using the series elastic drive control method in finite Morrey space. According to the initial position and attitude parameters of the low altitude penetration section of the UAV, the fast model prediction and flight trajectory tracking are carried out to realize the anti-attack penetration control of the low-altitude glider. The simulation shows that the precision of anti-attack penetration control of UAV is higher and the adaptive adjustment performance of UAV attitude parameters is better.

**Key words:** UAV; low altitude glide; anti-attack; control law; standard Kalman filter

## 0 引 言

无人机是利用遥控和程序指令进行飞行指令传输和导航的飞行器,随着无人机控制技术的成熟,无人机的飞行稳定性越来越高,在军事领域,无人机可以实现全天候全地域的低空侦察和军事打击。无人机在低空滑翔飞行中,容易受到地方的防空武器攻击,需要对无

人机低空滑翔段进行抗攻击控制,提高无人机的生存能力<sup>[1]</sup>。

无人机在低空滑翔过程中,容易受到地面和控制的干扰和拦截,结合小扰动抑制方法进行无人机滑翔抗攻击突防控制。传统方法中,对无人机低空滑翔抗攻击突防控制方法主要有模糊控制、积分控制、PID 控

收稿日期:2019-02-14

修回日期:2019-06-20

网络出版时间:2019-09-25

基金项目:2018年“攀登计划”广东大学生科技创新培育专项资金立项项目(pdjh2019b0633)

作者简介:陆兴华(1981-),男,硕士,副教授,通讯作者,研究方向为嵌入式技术、无人机飞行稳定性控制方法、机器人运动控制方法;明 仲(1997-),男,研究方向为无人机通讯系统、计算机控制方法。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190925.1521.036.html>

制方法等<sup>[2-3]</sup>,采用严格反馈控制方法进行无人机的末端位姿修正,实现突防控制,提高无人机的飞行控制能力。文献[4]中提出一种基于 PID 神经网络控制的无人机低空滑翔抗攻击突防控制,进行姿态参数调节,提高控制过程的鲁棒性,但该方法进行飞行控制的抗小扰动性不好;文献[5]中提出一种基于比例-积分控制器的无人机低空传感定位控制方法,通过纠偏量自适应反馈调节方法提高无人机的自动定位效果,提高姿态修正能力,但该方法进行无人机低空突防控制的鲁棒性不好,姿态参数修正的准确性不高。

针对上述问题,文中提出一种基于快速模型预测的无人机低空滑翔抗攻击突防控制技术。首先采用融合传感识别技术进行无人机的姿态和位置参数信息采集,分析无人机的低空滑翔控制的物理环境参数模型,然后构建无人机飞行轨迹地图模型,使用标准卡尔曼滤波器进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息的融合处理,根据信息融合结果进行控制指令设计,根据无人机低空突防段的初始位姿参数进行快速模型预测和飞行轨迹跟踪,实现低空滑翔抗攻击突防控制。最后进行仿真实验分析,展示了该方法在提高无人机低空滑翔抗攻击突防控制能力方面的优越性能。

## 1 模型建立和约束参量分析

### 1.1 无人机低空滑翔抗攻击突防控制模型建立

采用融合传感识别技术进行无人机的姿态和位置参数信息采集,分析无人机的低空滑翔控制的物理环境参数模型,构建无人机低空突防滑翔控制的轨迹分布地图<sup>[6]</sup>,得到无人机低空滑翔抗攻击突防控制的轨迹跟踪分布模型,如图 1 所示。

根据图 1 的轨迹跟踪分布模型,求解无人机平动空间位置的动力学传导函数  $H_i(\cdot) = \sum_{r=1}^N H_i(r)$ ,根据无人机低空突防段的初始位姿参数进行无人机飞行轨迹跟踪,当平衡点的最大 Lyapunov 函数满足:

$$C_o(x^*) < 0 \quad (1)$$

$$p_i(t) = \begin{cases} \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} e_i(0)^{(k)} t^k + \sum_{j=0}^n \left( \sum_{l=0}^n \frac{a_{ij}}{T^{j-l+n+1}} e_i(0)^{(l)} \right) \cdot t^{j+n+1} & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $a_{ij}$  为动态运动基元的时滞参量。

在凸优化条件下,采用动态基元轨迹跟踪方法,得到无人机低空突防控制的滑模面方程:

$$\dot{\sigma}(X, t) = \dot{C}E - \dot{C}P(t) = C \cdot [\dot{e}^T \dot{e}^T \dots e^{(n)T}]^T -$$

$$C \cdot [p(t)^T \dot{p}(t)^T \dots P^{(n)}(t)^T]^T =$$

$$C_n[e^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] =$$

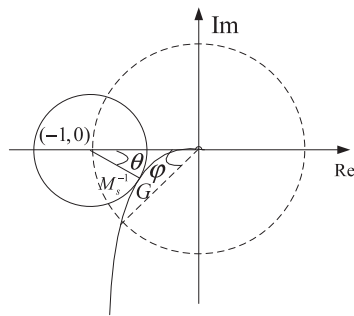


图 1 无人机低空滑翔抗攻击突防控制的轨迹跟踪分布模型

将无人机低空突防的飞行轨迹跟踪问题转换为多目标优化问题<sup>[7]</sup>,求得无人机的逆运动学模型的最小特征为:

$$\Delta E = -\eta \left[ \left( \frac{\partial E}{\partial \omega} \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial b} \right)^2 \right] \quad (2)$$

设无人机处于  $180^\circ$  经线两侧轨迹的矢量分布集  $Q$  为  $R^m$  处的任意  $q$  点的集合,表示无人机传感减速器转动惯量,矢量模型为  $d_1, d_2, \dots, d_q$ 。如果  $C_o(x^*) = 0$ ,则空间位置纠偏误差满足:

$$Y(P, Q, \beta) = Y[\text{red}(P, Q, \beta), Q, \beta] \quad (3)$$

无人机飞行的向心力与科氏力项的反馈调节函数为:

$$M_s = \max_{0 \leq \omega < \infty} \left| \frac{1}{1 + C_2(j\omega)P(j\omega)} \right| \quad (4)$$

令  $F$  为重力项和柔性元件的二元控制函数,  $\omega$  为自适应调节系数,采用最小二自由度寻优进行突防轨迹的起始值与目标值的最优轨迹搜索,提高无人机低空滑翔抗攻击能力<sup>[8]</sup>。

### 1.2 无人机飞行轨迹跟踪的控制约束参量分析

在分析无人机的定位物理环境参数模型的基础上,构建无人机低空滑翔抗攻击规划的 GPS 轨迹地图<sup>[9]</sup>,无人机低空滑翔抗攻击突防控制的闭环传递函数  $H_2$  和  $H_3$  共同标记为  $x$ ,以阻尼力矩参量为约束指标进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制约束参量的自适应寻优<sup>[10]</sup>,根据无人机的当前位置,计算出无人机的运动状态空间估计无迹卡尔曼滤波函数为:

$$\begin{aligned} C_n[x_1^{(n)} - x_{1d}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] &= \\ C_n[\dot{x}_n - \dot{x}_{1d}^{(n)} - \dot{p}^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[\dot{e}^{(k)} - \dot{p}^{(k)}(t)] &= \\ C_n[f(X, t) + \Delta f(X, t) + b(X, t)u + d(t) - x_{1d}^{(n)} - & \\ p(t)^{(n)}] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] & \end{aligned} \quad (6)$$

取有限状态空间中的时滞函数:

$$\begin{cases} W_{ik}(d) = \frac{IDF_1}{IDF_{const}} \times a(H_{ac}) \\ IDF_1 = tf_{ik}(d) \times \log\left(\frac{N}{n_k} + 0.01\right) \\ IDF_{const} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (tf_{ik}(d))^2 \times \left[\log\left(\frac{N}{n_k} + 0.01\right)\right]^2} \end{cases} \quad (7)$$

在有限 Morrey 空间内采用串联弹性驱动控制方法求得在控制约束参量分布模型  $I \times IR^4$  上的最优解, 且  $\alpha, \beta \in R$ 。此外, 采用大增益模糊控制方法, 得到电机端惯量控制的约束不等式:

$$\begin{aligned} \|u\|_{L_{\alpha}^{10}(I \times IR^4)} &\leq 2\eta \\ \|\nabla\|^{\frac{5}{4}} u\|_{S_{\frac{1}{4}}} + \|\nabla\|^{\frac{1}{4}} u_t\|_{S_{\frac{1}{4}}} &< \infty \end{aligned} \quad (8)$$

结合连杆端动力学模型进行时滞二自由度控制<sup>[11]</sup>, 得到反馈线性化控制的多状态形式描述为  $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, \dots, x_n = y^{(n-1)}$ , 则有限 Morrey 空间无人机飞行的低空滑翔抗攻击控制约束参量模型描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(X, t) + \Delta f(X, t) + d(t) + b(X, t)u \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $X = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T = [x_1^T, \dot{x}_1^T, \dots, x_1^{(n-1)T}]^T$ , 控制约束算子  $w(t)(u_0, u_1) = \cos(t|\nabla|)u_0 + \frac{\sin(t|\nabla|)}{|\nabla|}u_1$ , 构建无人机飞行轨迹地图模型, 使用标准卡尔曼滤波器进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息的融合处理。

## 2 控制律优化设计

### 2.1 无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息融合处理

在构建无人机的低空滑翔控制的物理环境参数模型的基础上, 进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制律的优化设计。文中提出一种基于快速模型预测的无人机低空滑翔抗攻击突防控制技术, 采用无迹卡尔曼滤

$$\begin{aligned} \dot{e}_v &= \frac{1}{Cm} [I_{SM}^2 - I_L^2 - I_{Na}^2 - I_K^2 - I_T^2 - I_{syn}^2 - I_{SM}^1 + I_L^1 + I_{Na}^1 + I_K^1 + I_T^1 + I_{syn}^1] + u = f(x_1, x_2) + u \\ \dot{e}_h &= \frac{h_{2\infty} - h_2}{\tau_{h_2}} - \frac{h_{1\infty} - h_1}{\tau_{h_1}} = T_h(V_{Th}^2)(h(V_{Th}^2) - h_2) - T_h(V_{Th}^1)(h(V_{Th}^1) - h_1) = \\ &T_h(V_{Th}^2)h(V_{Th}^2) - T_h(V_{Th}^2)h_2 - T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1) + T_h(V_{Th}^1)h_1 = T_h(V_{Th}^1, e_v)h(V_{Th}^1, e_v) - \\ &T_h(V_{Th}^1, e_v)h_2 - T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1) + T_h(V_{Th}^1)h_1 - T_h(V_{Th}^1, e_v)h_1 + T_h(V_{Th}^1, e_v)h_1 = \\ &T_h(V_{Th}^1, e_v)h(V_{Th}^1, e_v) - T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1) - T_h(V_{Th}^1, e_v)e_h - [T_h(V_{Th}^1, e_v) - T_h(V_{Th}^1)]h_1 \\ \dot{e}_w &= \varphi \{ T_w(V_{Th}^1, e_v)w(V_{Th}^1, e_v) - T_w(V_{Th}^1)w(V_{Th}^1) - T_w(V_{Th}^1, e_v)e_w - [T_w(V_{Th}^1, e_v) - T_w(V_{Th}^1)]w_1 \} \end{aligned} \quad (15)$$

波计算无人机的空间位姿参量  $e_{sl}$ , 根据解特征向量  $X = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T = [x_1^T, \dot{x}_1^T, \dots, x_1^{(n-1)T}]^T$  分布特性, 计算 GPS 轨迹地图在  $x$  方向上和  $y$  方向上的速度, 得到飞行轨迹跟踪项  $X_d = [x_{1d}^T, x_{2d}^T, \dots, x_{nd}^T]^T = [x_{1d}^T, \dot{x}_{1d}^T, \dots, x_{1d}^{(n-1)T}]^T$  的误差向量为:

$$E = X - X_d = [e^T, \dot{e}^T, \dots, e^{(n-1)T}]^T \quad (10)$$

其中,  $e = x_1 - x_{1d} = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ 。

那么在卡尔曼增益调节下, 无人机低空滑翔抗攻击控制的洛朗级数展开为:

$$\sigma(X, t) = CE - CP(t) \quad (11)$$

其中, 矩阵  $C \in R^{n \times m}$ , 且微分方程的测度  $C_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$  都为正常数; 偏航角的矢量为  $P(t) = [p(t)^T, \dot{p}(t)^T, \dots, p^{(n-1)}(t)^T]^T$ , 令  $p(t) = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t)]^T$ , 在 Terminal 滑模面得到偏航系统状态空间解向量为:

$$\begin{aligned} \sigma(X, 0) &= E(0) - CP(0) = \\ C \{ [e(0)^T \dot{e}(0)^T \dots e(0)^{(n-1)T}]^T - \\ [p(0)^T \dot{p}(0)^T \dots p^{(n-1)}(0)^T]^T \} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

在姿态转移条件下, 无人机滑翔动力学平衡点为:

$$w(t)(u_0, u_1) = \cos(t|\nabla|)u_0 + \frac{\sin(t|\nabla|)}{|\nabla|}u_1 \quad (13)$$

求得线性自抗扰的偏航控制的稀疏矩阵  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)^T \in GF(2^n)^m$ , 在收敛性条件下得到线性自抗扰控制约束项为  $n = 1, 2, 3, \dots, x \in [0, 1], \mu \in [0, 4]$ 。

使用标准卡尔曼滤波器进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息的融合处理<sup>[12]</sup>, 即  $x_1 = [V_{Th}^1, h_{Th}^1, w_{Th}^1]^T, x_2 = [V_{Th}^2, h_{Th}^2, w_{Th}^2]^T$ , 有  $\Phi(B) \subset B$ , 得到质心转动的动力学调节误差为:

$$e = x_2 - x_1 \quad (14)$$

其中,  $e = [e_v, e_h, e_w]^T$ , 由此得到无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息融合误差输出为:

根据上述分析, 实现无人机低空滑翔抗攻击突防

控制信息融合处理, 结合 Kalman 滤波算法进行飞行姿

态参数调节,提供无人机的抗攻击控制能力<sup>[13]</sup>。

2.2 控制律及稳定性分析

根据信息融合结果进行控制指令设计,根据无人机低空突防段的初始位姿参数构建姿态参量的快速预测模型为:

$$f(x_1,x_2)=\frac{1}{Cm}[I_{SM}^2-I_L^2-I_{Na}^2-I_K^2-I_T^2-I_{syn}^2-I_{SM}^1+I_L^1+I_{Na}^1+I_K^1+I_T^1+I_{syn}^1]$$
$$T_h(V_{Th})=\frac{1}{\tau_h(V_{Th})}$$
$$T_w(V_{Th})=\frac{1}{\tau_w(V_{Th})}$$

(16)

如果 $f(x_1,x_2)$  已知,考虑到飞行器的小角度运动,采用线性预测模型得到飞行姿态参数角解算的唯一解为:

$$u^*=-k_c e_v-f(x_1,x_2)$$

(17)

其中, $k_c$  为机体坐标系下的控制律输出增益,在有限时间域内,以偏航角速度为约束指标参量,得到控制误差满足:

$$\dot{e}_v=-K_c e_v$$
$$\dot{e}_h=T_h(V_{Th}^1,e_v)h(V_{Th}^1,e_v)-T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1)-T_h(V_{Th}^1,e_v)e_h-[T_h(V_{Th}^1,e_v)-T_h(V_{Th}^1)]h_1$$
$$\dot{e}_w=\varphi\{T_w(V_{Th}^1,e_v)w(V_{Th}^1,e_v)-T_w(V_{Th}^1)w(V_{Th}^1)-$$
$$J=\begin{bmatrix}-3.970 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.008 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & -3.8 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 200.76 \\ 0 & 0 & 49.25 & 0\end{bmatrix}$$

根据 Lyapunov 稳定性原理,得到输出的周期解的特征值全部落在凸优化平面上,说明设计的基于快速模型预测的无人机低空滑翔抗攻击突防控制律是稳定收敛的<sup>[15]</sup>。

3 仿真实验分析

为了测试该方法在实现无人机低空滑翔抗攻击突防控制中的应用性能,进行了仿真实验。实验采用 Matlab 设计,对无人机飞行参数数据采集传感器为 LSM30300,取无力矩驱动控制控制参数 $q=4$ , $b_2=b_{-2}=1$ , $b_1=b_{-1}=2$ , $b_0=0$ ,设定无人机低空滑翔的高度为 100 m,无人机飞行纵向运动速度 220 m/s,直航段的偏航角为 $\psi=0.35$  rad/s,自适应调节参数 $\varepsilon_1=0.25$ ,对无人机低空滑翔拦截的分布方位角分别为 $10^\circ$ 和 $30^\circ$ ,其他仿真参数设定见表 1。

根据上述仿真环境和参数设定,进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制,得到无人机的偏航角速率,如图 2 所示。

$$T_w(V_{Th}^1,e_v)e_w-[T_w(V_{Th}^1,e_v)-T_w(V_{Th}^1)]w_1\}$$

(18)

若设 $e_v=0$ ,结合偏航角的估计值构建无人机低空突防的一阶离散控制系统<sup>[14]</sup>,得 $p_i(t)$ ( $i=1,2,3$ ),控制增益的表达式如下:

$$p_i(t)=e_i(0)+\dot{e}_i(0)t+[\frac{a_{00}}{T^2}e_i(0)+\frac{a_{01}}{T}\dot{e}_i(0)]t^2+[\frac{a_{10}}{T^3}e_i(0)+\frac{a_{11}}{T^2}\dot{e}_i(0)]t^3$$

(19)

基于 Lipschitz 连续正则的泛函,初始位姿参数模型预测值为:

$$\dot{e}_h=T_h(V_{Th}^1,e_v)h(V_{Th}^1,e_v)-T_h(V_{Th}^1)h(V_{Th}^1)-T_h(V_{Th}^1,e_v)e_h-[T_h(V_{Th}^1,e_v)-T_h(V_{Th}^1)]h_1$$
$$\dot{e}_w=\varphi\{T_w(V_{Th}^1,e_v)w(V_{Th}^1,e_v)-T_w(V_{Th}^1)w(V_{Th}^1)-T_w(V_{Th}^1,e_v)e_w-[T_w(V_{Th}^1,e_v)-T_w(V_{Th}^1)]w_1\}$$
$$C_m\frac{dv_{Th}^1}{dt}=-I_L^1-I_{Na}^1-I_K^1-I_T^1-I_{syn}^1+I_{SM}^1$$
$$\frac{dh_1}{dt}=\frac{(h_{1\infty}(v_{Th}^1)-h_1)}{\tau_h(v_{Th}^1)}$$
$$\frac{dw_1}{dt}=\frac{(w_{1\infty}(v_{Th}^1)-w_1)}{\tau_w(v_{Th}^1)}$$

(20)

计算上述方程组的周期解,得到低空滑翔抗攻击突防控制的雅克比矩阵为:

$$J=\begin{bmatrix}0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.008 & 9\end{bmatrix}$$

(21)

表 1 仿真参数设定

参数名称	取值
转动惯量	1.23 KN. m
相关动力学参数	12 000 N · m/rad
期望偏航角	0.021 rad/s
控制器的状态向量	0.443 N · m/(rad/s)
偏航力矩	16 KN
驱动器位置阶跃响应	0.37

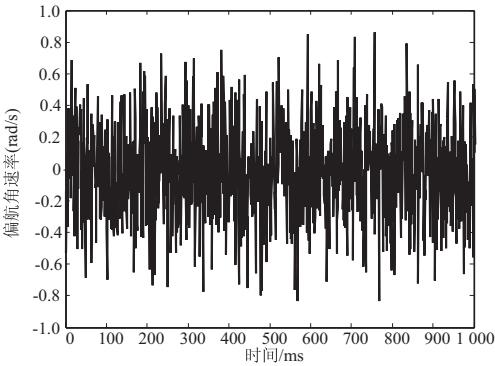


图 2 偏航角速率



以图2采集的数据为测试对象,构建无人机飞行轨迹地图模型,使用标准卡尔曼滤波器进行无人机低空滑翔抗攻击突防控制信息的融合处理,实现无人机低空抗攻击突防控制,得到最优的偏航角和俯仰角解算结果,如图3所示。

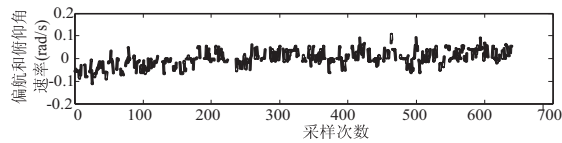


图3 最优的偏航角和俯仰角解算结果

根据姿态参数解算结果实现无人机的位姿参数快速预测,实现飞行轨迹优化跟踪设计,得到轨迹跟踪结果,如图4所示。

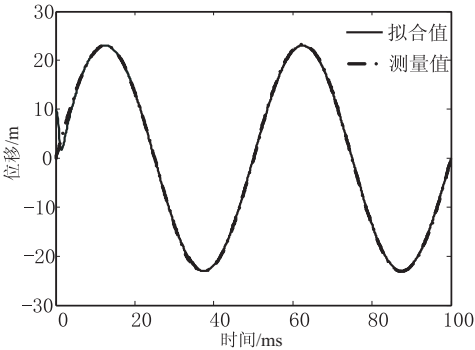


图4 轨迹跟踪结果

分析图4得知,该方法具有很好的无人机低空突防段轨迹跟踪性能,参数拟合性较好,实现了低空滑翔抗攻击突防控制。以最小均方根误差为测试指标分析控制性能,得到的对比结果见表2。分析表2得知,该方法进行无人机控制的姿态参量解算的均方根误差较低,控制精度较高。

表2 最小均方根误差

迭代次数	文中方法	文献[3]	文献[4]
100	0.023	0.065	0.078
200	0.017	0.048	0.067
300	0.005	0.032	0.055
400	0.001	0.025	0.031

4 结束语

无人机在低空滑翔飞行中,容易受到地方的防空武器攻击,需要对无人机低空滑翔段进行抗攻击控制。文中研究了一种基于快速模型预测的无人机低空滑翔抗攻击突防控制模型,进行控制律的优化设计。考虑到飞行器的小角度运动,采用线性预测模型得到飞行姿态参数角解算结果,结合偏航角的估计值构建无人机低空突防的一阶离散控制系统,采用 Lyapunov 稳定

性原理进行控制律稳定性分析。该方法解决了无人机低空滑翔中的抗攻击突防控制问题,提高了控制稳定性和轨迹跟踪的准确性,姿态参数解算结果准确,提高了飞行抗攻击能力和无人机的生存能力。

参考文献:

[1] 刘 炜,陆兴华. 飞行失衡条件下的无人机惯导鲁棒性控制研究[J]. 计算机与数字工程,2016,44(12):2380-2385.

[2] SHI R,ZHANG X,TIAN Y, et al. A CPG-based control method for the rolling locomotion of a desert spider[C]//2016 IEEE workshop on advanced robotics and its social impacts (ARSO). Shanghai:IEEE,2016:243-248.

[3] TUNC L T,SHAW J. Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,84(5-8):817-830.

[4] 郭 宪,马书根,李 斌,等. 基于动力学与控制统一模型的蛇形机器人速度跟踪控制方法研究[J]. 自动化学报,2015,41(11):1847-1856.

[5] 陈光荣,王军政,汪首坤,等. 基于主被动负载的负载独立口双阀节能控制系统研究[J]. 北京理工大学学报,2016,36(10):1053-1058.

[6] 王 华,康荣杰,王兴坚,等. 软体弯曲驱动器设计与建模[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(5):1053-1060.

[7] 刘 倩,谭 文,李东海. 一种多变量自抗扰控制结构的设计研究[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2014,41(6):97-103.

[8] 翁永鹏,高宪文,刘昕明. 非仿射非线性离散系统的数据驱动二阶滑模解耦控制[J]. 控制理论与应用,2014,31(3):309-318.

[9] OFODILE N A,TURNER M C. Anti-windup design for input-coupled double integrator systems with application to quadrotor UAV's[J]. European Journal of Control,2017,38:22-31.

[10] 张笑笑,储昭碧,董学平. 基于滑动平均的并联 Buck 变换器均流控制[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(10):177-182.

[11] 兰庆庆,肖本贤. 基于网格的密度峰值聚类算法的 RFID 定位[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(10):73-78.

[12] 包 飞,刘 扬,马颖亮,等. 船载雷达方位转盘不水平度自动化检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(9):36-41.

[13] 黄 敏,马飞扬,刘广哲,等. 应用于飞机测试的 EtherCAT 测试系统实时性测试及分析[J]. 电子测量技术,2018,41(20):93-97.

[14] 陆兴华. 姿态融合滤波的无人机抗干扰控制算法[J]. 传感器与微系统,2016,35(7):116-119.

[15] 陆兴华. 基于波束空间二维谱峰搜索的无人机控制算法[J]. 计算机技术与发展,2017,27(12):52-56.