

面向无人机自主防碰撞的认知博弈制导控制

茹常剑^{1†}, 魏瑞轩¹, 郭庆¹, 张立鹏²

(1. 空军工程大学 无人机运用工程系, 陕西 西安 710038; 2. 空军西安飞行学院 理训系, 陕西 西安 710306)

摘要: 针对非隔离空域中的无人机碰撞规避问题, 提出一种基于认知博弈制导的无人机自主防碰撞方法. 首先, 描述了非隔离空域中无人机自主防碰撞控制问题. 其次, 建立了无人机与入侵机的运动学模型, 并构建了无人机的认知安全域, 将无人机碰撞规避问题转化为涉及两方的博弈问题. 然后, 提出了制导策略集的求解方法. 最后, 仿真结果验证了所提方法的有效性.

关键词: 无人机; 自主防碰撞; 认知安全域; 微分博弈; 制导控制

中图分类号: V279 **文献标识码:** A

Guidance control of cognitive game for unmanned aerial vehicle autonomous collision avoidance

RU Chang-jian^{1†}, WEI Rui-xuan¹, GUO Qing¹, ZHANG Li-peng²

(1. The Department of UAV Application and Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;

2. Department of Theory and Training, Xi'an Flight College of the Air Force, Xi'an Shaanxi 710306, China)

Abstract: For the problem of unmanned aerial vehicle (UAV) collision avoidance in non-segregated airspace, a novel UAV autonomous collision avoidance control method based on guidance of cognitive game was proposed. First, UAV collision avoidance control problem in non-segregated airspace was described. Secondly, kinematics model of a UAV and the invasion vehicle was built. Also, cognitive safety region for a UAV was established. Thus, UAV collision avoidance problem was changed into a game problem involving two parties. Then, solving method for the set of guidance policy was proposed. Finally, the simulation results have verified effectiveness of the proposed method.

Key words: unmanned aerial vehicle; autonomous collision avoidance; cognitive safety region; differential game; guidance control

1 引言(Introduction)

在飞行时间、频次急剧增加的情况下, 无人机在非隔离空域运行, 安全性受到公众质疑, 影响了无人机在全空域运行的进程, 如何安全协同飞行成为一个极具挑战性的问题^[1-3]. 无人机自主防碰撞是保证多无人机之间或无人机与有人机间安全飞行的首要问题^[4].

目前, 国内外学者针对该问题已经进行了大量的研究. 一些学者提出诸如势场法、几何法和整数优化等方法, 来解决无人机的防碰撞问题. 例如, 文献[5]提出采用球面对称函数构建人工势场导航, 引导多架无人机无碰撞飞行. 文献[6]提出一种安全性障碍清除过程用于防碰撞系统, 定义防碰撞机动中从飞机到障碍之间的最小距离作为无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)防碰撞系统的标准. 文献[7]采用解析微分几何法研究一机对多机碰撞问题, 该方法以能量作为选择

最优策略的指标. 文献[8]从线性规划方面考虑, 把多机碰撞模型化为一个混合整数规划(mixed-integer linear programming, MLP)问题, 在一般几何构造法上建立碰撞避免约束并把它们公式化为线性约束条件, 设计了一些防碰撞控制律或防撞系统. 上述方法的缺陷在于容易陷入局部极小值, 同时也不能很好地处理无人机的各类动态约束. 为此, 又有一些学者引入了模型预测控制(model predictive control, MPC)方法, 该方法的基本思想是滚动优化. 例如, 文献[9]提出了基于Receding Horizon控制结构的分散控制算法, 通过速度和加速度约束来保证飞机的紧急机动以实现碰撞避免. 文献[10]提出一种分布式模型预测控制方法用于实现一组UAV的碰撞规避. 文献[11]针对多个移动车辆的障碍规避问题, 提出一种基于模型的分布式模型预测控制方法, 通过执行分布式协同算法来解决冲突. 文献[12]针对陌生三维环境下无人机分布式

协同控制问题,使用了预测控制方法,无人机依靠预测控制算法来计算最优控制指令,从而引导无人机规避碰撞.模型预测控制方法虽然求解较为精确,但求解时间较长,不能保证实时性.

因此,针对非隔离空域中的无人机碰撞规避问题,迫切需要提出一种新的控制方法.鉴于此,本文在描述了非隔离空域中无人机自主防碰撞控制问题的基础上,通过建立无人机与入侵机的运动学模型以及无人机的认知安全域,将该问题转化为涉及无人机和入侵机两方的博弈模型,并提出制导控制策略集的求解方法.最后,通过仿真实验来验证所提方法的可行性.

2 问题描述(Problem statement)

无人机自主防碰撞规避过程可分为4个阶段:1)防碰撞预规划与决策阶段;2)发现碰撞阶段;3)自主规避碰撞阶段;4)防碰撞路径自主跟踪控制阶段.如图1所示.

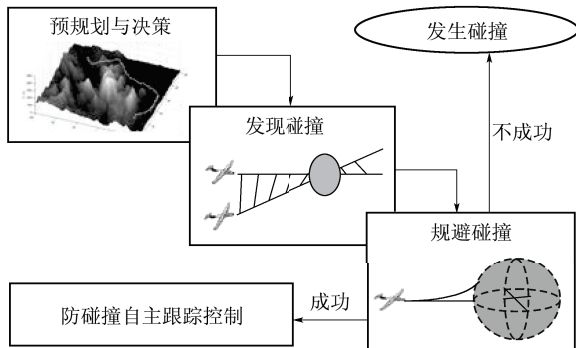


图1 无人机自主防碰撞过程

Fig. 1 The process of UAV autonomous collision avoidance

防碰撞预规划与决策阶段主要在无人机起飞前,针对各种已知障碍物进行预处理,为每一无人机预规划出一条避撞、可飞的参考路径.

发现碰撞阶段主要针对无人机在起飞后,运用在线预测方法发现各种可能的碰撞障碍物,目的是确定障碍物种类,以便决定采用何种防碰撞方法来解决碰撞.

自主规避碰撞阶段是在发现碰撞之后,采用与之相应的自主规避方法进行规避,目的是运用恰当的规避导引或规避机动来防止即将发生的碰撞,从而自主解决碰撞冲突.

从上述分析可看出,无人机自主防碰撞需要解决3个关键问题:1)入侵机的状态估计;2)两机间潜在的冲突预测;3)装载自主防碰撞功能的无人机及时采取相应规避方法.这里假设已获得入侵机的估计状态,主要研究碰撞预测与规避方法.

3 碰撞问题的数学建模(Mathematical model of collision avoidance)

3.1 无人机的运动学模型(UAV kinematic model)

假设在检测到入侵机之前,UAV是准定常的巡航飞行状态.这里,所考虑的碰撞规避问题要求UAV在较短的时间内做一些机动以规避碰撞,因此可以使用质点模型来建立无人机运动学方程,可以写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{h} \\ \dot{V} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \gamma \cos \psi \\ V \cos \gamma \sin \psi \\ V \sin \gamma \\ -\frac{C_D S \rho}{2m} V^2 - g \sin \gamma + \frac{1}{m} T \\ \frac{C_L S \rho}{2m} V^2 \sin \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中:\$(x, y)\$表示UAV的水平位置,\$\rho\$表示空气密度,\$h\$表示UAV的高度,\$\psi\$表示航向角,\$S\$表示机翼面积,\$V\$表示真空度,\$C_L\$和\$C_D\$分别表示升力系数和阻力系数,\$w = (w_1, w_2, w_3)\$表示诸如风等因素带来的不确定性.控制量是推力\$T\$,滚转角\$\phi\$和航迹倾斜角\$\gamma\$,由制导系统解算.使用这些输入代替控制舵面位置是一种简化,这样可以更好地调整系统.

3.2 入侵机的运动学模型(Kinematic model of intruder vehicle)

这里对入侵机也使用简化模型.入侵机模型也要求检测系统能够辨识这些模型的参数.由于所考虑的碰撞规避问题要求UAV在较短的时间内做机动以规避碰撞,因此只要观测到的轨迹仍然保持在期望轨迹可接受的范围之内,那么在给定的预测时域内,使用简化模型就是合理的.这里使用的入侵机模型如下所示.

稳态飞行:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V} \cos \hat{\psi} \\ \hat{V} \sin \hat{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

匀速转弯:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V} \cos \psi \\ \hat{V} \sin \psi \\ \frac{\hat{V}}{R} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

爬升或下降:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_x \cos \psi \\ \hat{V}_x \sin \psi \\ \hat{V}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中\$v_1, v_2\$和\$v_3\$为有界输入,代表测量中的不确定性.如果感知函数给定,那么误差模型与之相匹配,其它

飞行器的模型应该尽量减小这种不确定对无人机感知性能的影响。

3.3 认知安全域的构建(Establishing cognitive safe region)

无人机自主防碰撞控制包括碰撞规避和分离保证两部分, 即保持入侵机位于一个规定的包围UAV的区域外部。为了安全起见, 假设只有无人机机动以规避碰撞, 将上述区域定义为无人机的安全区域, 安全目标是保证没有其他飞机穿透该区域。下面给出安全域的精确数学表达。

令 $z(t) \in \mathbb{R}^d$ 表示在任何时刻 $t > 0$ 两个相冲突无人机的状态向量。假设可以通过一个微分方程描述其变化规律:

$$\begin{cases} \dot{z}(s) = f(z(s), s, \alpha(s), \beta(s)), \forall s \in [0, t], \\ z(0) = z_0, \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\alpha(\cdot)$ 表示 UAV 的控制量, $\beta(\cdot)$ 表示模型中所考虑的一些不确定性。

由式(1)可知, 其变化规律依赖于不同种类的两个控制向量 $\alpha(\cdot)$ 和 $\beta(\cdot)$ 。设 $\mathcal{A}$ 和 $\mathcal{B}$ 分别是 $\mathbb{R}^m$ 和 $\mathbb{R}^p$ 的两个非空的紧子集。设 $\mathbf{A} := \{\alpha : (0, t) \rightarrow \mathcal{A}\}$ 和 $\mathbf{B} := \{\beta : (0, t) \rightarrow \mathcal{B}\}$ 。对于每个 $z_0 \in \mathbb{R}^d$ 和 $(\alpha, \beta) \in \mathbf{A} \times \mathbf{B}$, 用 $z = z_{z_0}^{\alpha, \beta}$ 表示相关轨迹, 该轨迹被定义为式(1)。

令 $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^d$ 是某个开集, 称之为“碰撞区域”。该集合中所有的相对位置等价于碰撞。该集合的精确定义将取决于动力学状态空间的选择。这里, 碰撞区域 $\mathcal{O}$ 被视为是一个障碍, 那么它的补集 $\mathcal{K} = \mathbb{R}^d \setminus \mathcal{O}$ 就表示状态约束的集合。

不同的安全区域定义如下:

1) 集合 W_1 : 被定义为初始位置的子集, 使得对于任何控制策略, UAV 都不能保证避免碰撞。

2) 集合 $W_2(t_f)$: 被定义为 $\mathbb{R}^d \setminus W_1$ 中所有初始状态的集合, 使得如果没有机动, 就会存在这样的风险, 即系统在 t_f 之前达到区域 W_1 。

3.4 碰撞规避问题的博弈论模型(Game model of collision avoidance problem)

为了便于分析既有控制又有扰动系统的安全性问题, 可使用反自然博弈中最坏情况法^[13]。扰动被看作控制对手并破坏安全性。针对自主防碰撞控制, 考虑一个涉及两方的博弈问题, 一方是 UAV, 另一方是入侵机。此处, 入侵机与 UAV 之间相对位置的力学模型为

$$\dot{y} = f(y(t), \alpha(t), \beta(t)), \quad (6)$$

其中: y 表示状态变量, α 表示 UAV 的控制量, 而 β 表示不确定性, 它起着控制第 2 个博弈者的作用。

同时, 式(6)满足下列条件:

1) 对于每个 $(x, x', a, b) \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d \times \mathcal{A} \times \mathcal{B}$, 存在 $L_f > 0$, 使得 $|f(x, a, b) - f(x', a, b)| \leq L_f |x - x'|$ 。其中, L_f 是 Lipschitz 常量。

2) 对于每个 $y \in \mathbb{R}^d$ 和 $b \in \mathcal{B}$, $f(y, \mathcal{A}, b)$ 是 $\mathbb{R}^d$ 的一个凸集。

4 制导控制策略集的求解(Solving the set of guidance and control strategy)

4.1 制导策略集 W_1 (Guidance strategy set W_1)

由第 3.3 节、第 3.4 节可知, 碰撞规避问题被表述为停留在一个给定闭集 $\mathcal{K} = \mathbb{R}^d \setminus \mathcal{O}$ 的问题, 自主防碰撞问题被转化为涉及两方的博弈框架。此时集合 W_1 能被博弈的最坏情况所描述, 这时第 1 方博弈者 (UAV) 想要避免碰撞区域 $\mathcal{O}$, 或相当于想使系统保持在安全区域 $\mathcal{K}$ (约束集合), 使用自身输入, 而第 2 方博弈者尝试引导系统远离 $\mathcal{K}$ (通过自身输入 β)。定义博弈者 1 (UAV) 的非预期策略集为

$$\Gamma := \{\alpha : \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{A}, \forall s \in [0, \infty], (\beta(\theta) = \tilde{\beta}(\theta), \forall \theta \in [0, s]) \Rightarrow (\alpha[\beta](\theta) = \alpha[\tilde{\beta}](\theta), \forall \theta \in [0, s])\}.$$

然后, 将 UAV 控制律选择限制在集合 Γ , 并定义博弈者 1 (UAV) 的胜利域。

博弈者 1 的胜利域: 所有初始位置 z_0 的集合 $\mathcal{V}_1(\mathcal{K})$, 使得这里存在一个非预期的策略 $a \in \Gamma$ 使得对于所有的 $t \in [0, +\infty)$, 所有对应轨迹 $z_0^{\alpha[\beta], \beta}(t)$ 的容许控制 $\beta \in \mathbf{B}$ 避免碰撞集合 $\mathcal{O}$:

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_1(\mathcal{K}) = \{z_0 \in \mathcal{K} | \exists a \in \Gamma, \forall \beta(\cdot) \in \mathbf{B}, \\ \forall t \geq 0, z_0^{\alpha[\beta], \beta}(t) \in \mathcal{K}\}. \end{aligned}$$

根据该定义可知

$$W_1 = \mathbb{R}^d \setminus \mathcal{V}_1(\mathcal{K}), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W_2(t_f) = \{z_0 \in \mathbb{R}^d, \exists \beta(\cdot) \in \mathbf{B}, \exists s \in [0, t_f], \\ \text{s.t. } z_0^{\alpha_0, \beta}(s) \in W_1\}, \end{aligned} \quad (8)$$

根据集合 W_1 的定义可知, 对于任何控制策略, UAV 都不能保证避免碰撞, 因此集合 W_1 是“最坏情况”的集合。它能由涉及两方成员博弈问题的代价函数来表示, 这里成员 1 (UAV) 使用其控制策略, 成员 2 (入侵机) 使用不确定性作为输入。

考虑 Lipschitz 连续函数 $g : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, 使得 $g(x) \leq 0 \Leftrightarrow x \in \mathcal{K}$, 以及任意的 $\lambda > L_f$, 控制问题是

$$\vartheta^{\text{unc}}(x) := \min_{a \in \Gamma} \max_{\beta \in \mathbf{B}} \left\{ \max_{\theta \in [0, +\infty]} (e^{-\lambda \theta} g(y_x^{a[\beta], \beta}(\theta))) \right\}, \quad (9)$$

其中 $\max_{\theta \in [0, +\infty]} (e^{-\lambda \theta} g(y_x^{a[\beta], \beta}(\theta)))$ 起惩罚作用, 即如果 $y_x^{a[\beta], \beta}$ 违反了状态约束, 就需要进行支付。

定理 1 令 ϑ^{unc} 是式(29)所定义的代价函数, 则有

$$W_1 = \{x \in \mathbb{R}^d, \vartheta^{\text{unc}}(x) > 0\},$$

且 ϑ^{unc} 是如下Hamilton-Isaac方程唯一连续粘性解:

$$\min(\lambda \vartheta^{\text{unc}} + H^{\text{unc}}(x, \nabla \vartheta^{\text{unc}}(x)), \vartheta^{\text{unc}}(x) - g(x)) = 0,$$

其中 $H^{\text{unc}}(x, p) = \max_{a \in \mathcal{A}} \min_{b \in \mathcal{B}} (-f(x, a, b) \cdot p)$.

根据此定理可知, 集合 W_1 可通过计算一个代价函数 ϑ^{unc} 的近似来获得. 那么, 定义如下的集值映射:

$$F(x, \beta) = \begin{cases} \bigcup_{\alpha \in \mathcal{A}} f(x, \alpha, \beta), & x \in \mathcal{K}, \\ \text{Co}[\{0\} \cup \bigcup_{\alpha \in \mathcal{A}} f(x, \alpha, \beta)], & \text{其他}, \end{cases} \quad (10)$$

以及它的欧拉近似:

$$G_\rho(x, \beta) = x + \rho F(x, \beta) + \varepsilon(\rho)B, \quad (11)$$

其中: ρ 是某个时间步长, B 是 $\mathbb{R}^d$ 中一个单位球, $\varepsilon(\rho)$ 是一个常量, 保证算法的收敛性.

综上可知, 集合 W_1 的计算过程如下:

- 1) 对于 $k = 0$, $K_0 = \mathcal{K}$;
- 2) 对于 $k \geq 1$, 计算

$$K_{n+1} = \{x \in K_n | \forall \beta \in G_\rho(\alpha, \beta) \cap K_n \neq \emptyset\}.$$

4.2 制导策略集 W_2 (Guidance strategy set W_2)

由第3.3节可知, 对于 $t_f > 0$, 集合 $W_2(t_f)$ 中任意初始位置开始, 如果不采取任何机动, 就会到达危险区域 W_1 . 这里, 控制变量是 $\alpha \equiv 0$ 且系统动态特性为 $f(x, 0, \beta) =: f_1(x, \beta)$, 系统仅由不确定性变量 $\beta \in \mathcal{B}$. 那么, 根据目标集合 W_1 , 集合 $W_2(t_f)$ 能够被描述为动态特性 f_1 下的捕获盆地. 这个捕获盆地也可通过水平集方法来计算^[14].

4.3 制导指令的生成(Generating the guidance command)

此处, 考虑无人机真实机动性的延迟, 基于无人机边界限制来生成防碰撞制导指令, 并作为防碰撞的输出, 即

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \frac{1}{N}(\phi_{\text{com}} - \phi), \\ \dot{\theta} = \frac{1}{M}(\theta_{\text{com}} - \theta), \end{cases} \quad (12)$$

其中 N 和 M 是时间常数.

- 1) 水平机动.

根据速度 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{V}^d$ 计算两者间的水平视线角, 定义每架无人机的视线倾斜角为

$$\lambda = \text{sgn}[(\mathbf{V}_H \times \mathbf{V}_H^d)_Z] \arccos\left(\frac{\mathbf{V}_H \times \mathbf{V}_H^d}{\mathbf{V}_H}\right), \quad (13)$$

其中脚标 H 表示水平分量. 通过建立视线倾斜角可用滚转角作为输入. 假设每架无人机有一个最大滚转角

为 ϕ_{max} . 根据最大滚转角, 可计算出1 s内最大纵向倾角改变

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{g}{|\mathbf{V}_H|}. \quad (14)$$

此时, 水平机动逻辑如表1所示.

表1 水平机动选择

Table 1 Lateral maneuver selection

视线倾斜角范围	滚转指令
$\lambda < -\gamma_{\text{max}}$	$\phi_{\text{com}} = -\phi_{\text{max}}$
$-\gamma_{\text{max}} \leq \lambda \leq \gamma_{\text{max}}$	$\phi_{\text{com}} = \frac{\lambda}{\gamma_{\text{max}}} \times \phi_{\text{max}}$
$\lambda > \gamma_{\text{max}}$	$\phi_{\text{com}} = \phi_{\text{max}}$

- 2) 垂直机动.

根据每架无人机的改变速度向量 $\mathbf{V}^d$, 可获得所需的俯仰角. 所需的俯仰角 θ_{req} 可表示为

$$\theta_{\text{req}} = \arctan \frac{\mathbf{V}_V^d}{\mathbf{V}_H^d}. \quad (15)$$

在垂直机动中, 通过所需的俯仰角, 设置公式合适的时间常数 M . 垂直机动逻辑如表2所示.

表2 垂直机动选择

Table 2 Vertical maneuver selection

视线倾斜角范围	滚转指令
$0 \leq \theta_{\text{req}} < 15^\circ$	1
$15^\circ \leq \theta_{\text{req}} < 30^\circ$	2
$30^\circ \leq \theta_{\text{req}} < 45^\circ$	3
$ \theta_{\text{req}} > 45^\circ$	4

5 仿真分析(Simulation analysis)

为了验证所提自主防碰撞控制方法的有效性, 进行如下两个场景的实验. 采用MATLAB的Simulink工具箱搭建仿真环境, 所有的计算在一台CPU为英特尔酷睿i5, 主频为2.8 Ghz, Windows操作系统的电脑上执行. 仿真中将飞控的处理周期设为20 ms.

场景1 采用两架UAV进行验证, 其中UAV1直线飞行, UAV2具有自主防碰撞功能的制导系统. 同时, 将所提方法与常用的模型预测控制方法(MPC)进行对比. 两架无人机(UAV1, UAV2)的初始位置、速度与目标位置的信息如表3所示.

表3 双机初始信息

Table 3 Initial information of two vehicles

初始位置/m	目标位置/m	初始速度/(m·s ⁻¹)
UAV1 (2000, 10, 100)	(-4000, 4000, 1500)	(-35, 25, 12)
UAV2 (0, 10, 100)	(5000, 4000, 1500)	(30, 27, 12)

在飞行过程中, 如果两架UAV不采取任何规避动作, 将会出现碰撞危险. 由于UAV2具有自主防碰撞功

能, 因此它会执行一些规避动作防止两机相撞, 所得到的仿真曲线如图2-5所示。

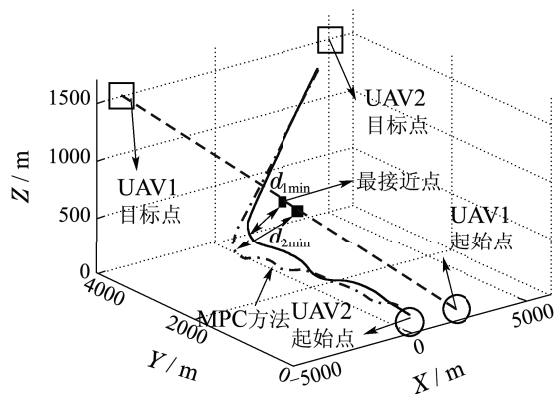


图 2 双机轨迹

Fig. 2 Trajectories of two vehicles

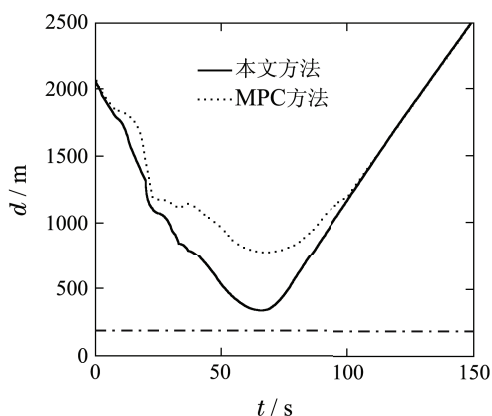


图 3 双机相对距离

Fig. 3 Relative distance between two vehicles

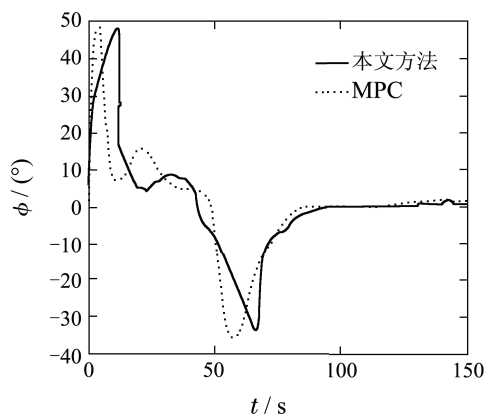


图 4 UAV2滚转角指令

Fig. 4 Roll angle command of UAV2

综合分析, 根据图2可知, 两架UAV的飞行轨迹没有出现交叉, 可见无人机在飞行过程没有发生碰撞. 在图3中, 点划线和点线表示理想间隔距离, 实线表示实际间隔距离, 可见实际间隔距离总大于理想间隔距离, 说明飞行过程没有发生碰撞, 但MPC方法所得的

两机间隔明显大于本文的方法. 从图4和图5可以看出本文方法所得的滚转角指令和倾斜角指令均在限制范围之内, 而MPC方法所得倾斜角指令超出了限制. 这是由于MPC方法所需的求解时间较长, UAV2必须进行较大的机动才能避免碰撞.

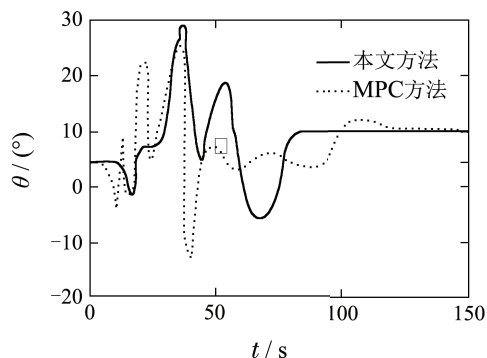


图 5 UAV2倾斜角指令

Fig. 5 Pitch angle command of UAV2

场景 2 采用两架UAV和一架有人机(manned plane)进行仿真, 主要验证两架UAV协作完成碰撞规避, 以及UAV与有人机之间的防碰撞控制. 这里, 两架UAV均装载具有自主防碰撞功能的制导系统. 3架飞机的初始位置、速度与目标位置的信息如表4所示, 得到的仿真结果如图6-8所示.

表 4 初始信息

Table 4 Initial information

初始位置/m	目标位置/m	初始速度/(m·s ⁻¹)
UAV1 (0, 1000, 1000)	(2000, -1500, 1000)	(30, -30, 0)
UAV2 (0, -1000, 100)	(2000, 1500, 1000)	(30, 30, 0)

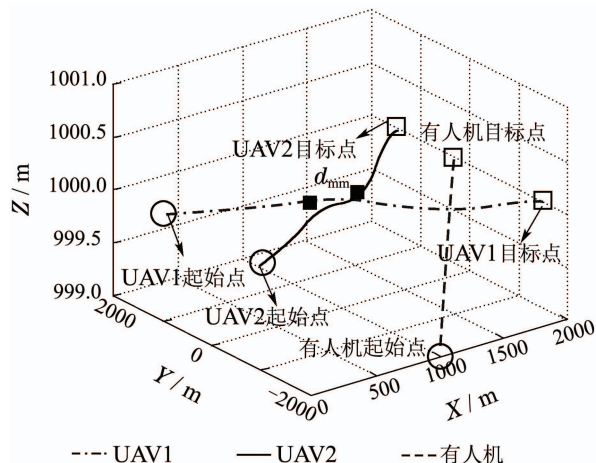


图 6 三机轨迹

Fig. 6 Trajectories of three vehicles

从图6可以看出, 两架UAV的飞行轨迹没有出现交叉, 可见两架UAV在飞行过程没有发生碰撞. 同时, 从

该图中还可以看出UAV2和有人机也没有发生碰撞。这是由于UAV1和UAV2均有自主防碰撞功能,会执行规避动作防止相撞。从图7—8可以看出,UAV1和UAV2滚转角指令均在物理限制范围内。

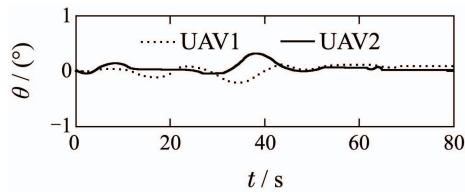


图7 双机俯仰角

Fig. 7 Pitch angle of two vehicles

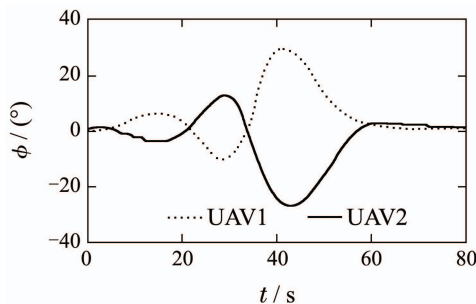


图8 UAV2滚转角

Fig. 8 Roll angle of UAV2

综上所述,本文基于认知博弈的制导控制律方法可以有效地解决无人机的自主防碰撞问题。

6 结论(Conclusions)

为确保无人机在非隔离空域安全飞行,提出一种基于认知博弈制导的防碰撞控制方法。该方法通过构建无人机的认知安全域,将防碰撞问题转化为无人机与入侵机的两方博弈,从而获得规避碰撞的制导策略。仿真表明所提的控制方法能够使无人机实现自主规避碰撞。下一步工作将是基于所提的方法设计无人机自主防碰撞控制器,并应用到实际的小型无人机上,验证所提算法的实际应用效果。

参考文献(References):

- [1] ZEITLIN A D. Issues and tradeoffs in sense and avoid for unmanned aircraft [C] // *Proceedings of the 4th Annual Systems Conference*. San Diego: IEEE, 2010: 61 – 65.
- [2] LAI C K, WHIDBORNE J F. Real-time Trajectory Generation for Collision Avoidance with Obstacle Uncertainty [C] // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Portland, Oregon: AIAA, 2011, 8: 1 – 20.
- [3] DALAMAGKIDIS K. *On Integrating Unmanned Aircraft Systems Into the National Airspace System: Issues, Challenges, Operational Restrictions, Certification and Recommendations* [M]. Netherlands: Springer Netherlands, 2009.
- [4] 蔡志浩, 杨丽曼, 王英勋, 等. 无人机全空域飞行影响因素分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 175 – 179.
(CAI Zhihao, YANG Liman, WANG Yingxun, et al. Analysis for whole airspace flight key factors of unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(2): 175 – 179.)
- [5] CHOU F Y, YANG C Y, YANG J S. Support vector machine based artificial potential field for autonomous guided vehicle [C] // *Proceedings of the 4th International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. Hefei: SPIE, 2008: 71304J.1 – 71304J.6.
- [6] SRIKANTHAKUMAR S, LIU C, CHEN W. Optimization-based safety analysis of obstacle avoidance systems for unmanned aerial vehicles [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65(1/4): 219 – 231.
- [7] HU J, PRANDINI M, NILIM A, et al. Optimal coordinated maneuvers for three dimensional aircraft conflict resolution [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2002, 25(5): 888 – 900.
- [8] LUCIA P, ERIC M F, ANTONIO B. Conflict resolution problems for air traffic management system solved with mixed integer programming [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2002, 3(1): 1756 – 1766.
- [9] BORRELLI F, KEVICZKY T, BALAS G J. Collision-free UAV formation flight using decentralized optimization and invariant sets [C] // *The 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Nassau: IEEE, 2004, 1: 1099 – 1104.
- [10] RICHARDS A, HOW J. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs [C] // *The 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Nassau: IEEE, 2004, 4: 4286 – 4291.
- [11] HOJJAT A I, BRANDON W G, ZHANG Y. Rule-based cooperative collision avoidance using decentralized model predictive control [C] // *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. Missouri: AIAA, 2011, 3: 1 – 14.
- [12] BOIVIN E, DESNIENS A, GAGNON E. UAV collision avoidance using cooperative prediction control [C] // *The 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Center*. Ajaccio: IEEE, 2008: 682 – 688.
- [13] MIGUEL A. Game theoretical approach for reliable enhanced indexation [J]. *Decision Analysis*, 2012, 9(2): 146 – 155.
- [14] BOKANOWSKI O, FORCADEL N, ZIDANI H. Reachability and minimal times for state constrained nonlinear problems without any controllability assumption [J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2010, 48(7): 4292 – 4316.

作者简介:

茹常剑 (1986–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为无人机协同控制及其安全性问题、认知控制, E-mail: ruchangjian@126.com;

魏瑞轩 (1968–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为多无人机协同控制, E-mail: rxwei369@sohu.com;

郭庆 (1981–), 男, 讲师, 博士, 目前研究方向为多无人机协同控制, E-mail: guoqing1981@163.com;

张立鹏 (1986–), 男, 讲师, 目前研究方向为多无人机协同控制, E-mail: zhang121860@163.com.