doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2014.01.021

# 面向不确定性环境的多无人机协同防碰撞

周 欢, 魏瑞轩, 崔军辉, 茹常剑, 关旭宁
(空军工程大学航空航天工程学院,西安 710038)

**摘 要**:随着无人机碰撞事故的增加,防碰撞已成为多无人机共空域飞行亟待解决的问题。首先,进行多无人机协同防碰撞体系结构设计,然后,提出一种新的模型预测控制方法:应用扩展卡尔曼滤波预测不确定性环境空间的障碍物和目标轨迹,无人机通过机间通信实现环境信息共享,基于模型预测控制方法进行多无人机协同防碰撞制导决策。仿真结果表明所提方法的有效性,同时协同机制的效果明显。

**关键词**:多无人机;协同防碰撞;信息共享;扩展卡尔曼滤波;模型预测控制
**中图分类号**:V249 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-637X(2014)01-0091-06

# Multi-UAV Cooperative Collision Avoidance Against Uncertain Environment

ZHOU Huan, WEI Rui-xuan, CUI Jun-hui, RU Chang-jian, GUAN Xu-ning
(Engineering Colege of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract**: With the increasing of collision accidents among Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), the collision avoidance has become a critical problem in free flight airspace of multi-UAV. Firstly, a multi-UAV cooperative collision avoidance system was designed, and then a novel model predictive control method (MPC) was presented. In the method, Extended Kalman Filter (EKF) was used to predict trajectories of obstacles and target in uncertain environment, the environment information was shared among UAVs by inter-UAV communication, and multi-UAV cooperative collision avoidance guidance strategies were made based on MPC. The simulation results demonstrate the validity of the method and the obvious effect of cooperation mechanism.

**Key words**: multi-UAV; cooperative collision avoidance; information share; EKF; MPC

## 0 引言

多无人机共空域执行任务已成为无人机发展的重要趋势。伴随着无人机的广泛应用,其频频出现撞损、坠毁等安全事故,特别是在飞行器密度较高和不确定环境中,无人机与无人机、无人机与有人机共空域飞行所面临的碰撞冲突已成为影响多无人机协同作战使用的突出问题。因此,无人机对于防碰撞以及冲突消解系统的需求变得非常急切[1-3]。

从当前对无人机防碰撞研究的进展来看,国内多以单机防碰撞为主,文献[4]构建了无人机自主防碰撞系统的框架,并提出有效的自主防碰撞控制策略和方法;在多机防碰撞方面,文献[5-6]分析了多机飞行碰撞的复杂性,采用建立 Voronoi 多边形的方法解决防碰撞问题,但其仅限于二维平面;人工势场法是解决多机防碰撞的一个较为有效的方法,文献[7-10]提出扁平函数、球面对称函数和超二次曲面函数等函数关系,并以此构建势场导航,引导无人机无碰撞飞行,但是人工势场法的最大缺陷在于不能考虑无人机自身动态约束。

模型预测控制在解决操作变量和被控变量维数很高或都需要满足物理约束、控制指标经常变化等问题时具有突出的优势[11]。引入模型预测控制算法到多无人机防碰撞问题中,可以很好地处理无人机各类动态约束。文献[12-13]利用几何相切实现了二维环境中非线性约束条件下的障碍避撞;文献[14]采用分布式模型预测控制解决了三维环境中的多无人机防碰撞问题,但前提是障碍物已知。本文考虑多无人机在未知空域追踪同一目标,首先进行多无人机协同防碰撞总体设计,提出一种新的模型预测控制方法,将障碍物与目标轨迹

**收稿日期**:2013-03-11 **修回日期**:2013-03-26
**作者简介**:周 欢(1989—),男,湖南邵阳人,硕士生,研究方向为无人飞行器作战系统与技术。

预测算法融入到无人机模型预测控制方法中。通过扩展卡尔曼滤波对障碍物和目标轨迹进行预测,在此基础上计算无人机的碰撞概率,基于模型预测控制形成防碰撞决策,同时,多架无人机通过机间通信进行信息共享,并利用预测轨迹信息处理机间防碰撞,最终实现多无人机在三维不确定环境的协同避撞和同时到达。

## 1 多无人机协同防碰撞体系结构

### 1.1 单无人机自主防碰撞系统

无人机自主防碰撞系统将涉及到无人机自主防碰撞体系结构、航迹规划、自主导航、目标识别与估计、碰撞预测、自主避撞策略与控制方法、航迹跟踪等许多关键技术。本文提出的单无人机自主防碰撞系统如图1所示。

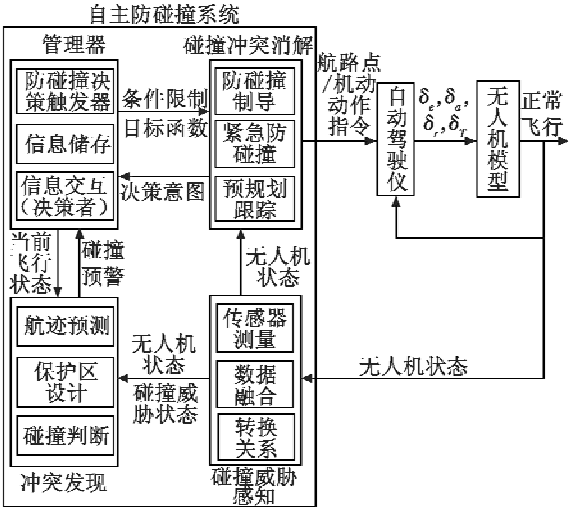


图1 单机自主防碰撞系统结构

Fig. 1 Collision avoidance system configuration of single UAV

对于单无人机而言,防碰撞系统核心的功能为自主感知、碰撞预测和自主规避。

1)自主感知。

UAV利用机载摄像机、雷达、红外探测器等传感器对任务空域的环境信息进行测量,通过与知识库的信息进行匹配分析,实现对未知环境和态势的感知。在本文中,障碍物与目标均为椭圆形状物体。对目标的感知由地面指控站完成,并通过通讯链路传递给每架无人机,无人机自身携带的载荷为一部CCD相机,其探测范围为$R_s$,实现对障碍物的感知。

2)碰撞预测。

碰撞预测是通过机载和地面监视设备对无人机在空域中的位置、高度和速度等信息进行计算,利用它们的飞行计划与当前时刻的航行诸元来预测它们未来时刻的位置,判断航空器之间的间隔是否小于规定的安全值,从而实现碰撞冲突的预测、告警功能,其主要涉及无人机信息获取与目标估计。

3)自主规避。

无人机一旦通过自主碰撞预测到碰撞冲突后,马上通过决策方法采取相应的碰撞规避机动,并发出恰当的规避导引或机动指令,使飞控系统能够按照指令操纵飞机自主飞行,摆脱潜在威胁。

### 1.2 多无人机协同防碰撞体系结构

关于多无人机团队协议的研究主要集中于分布式的协同决策,并且取得了许多成果,特别是在信息收集任务领域[15]。在多机防碰撞问题上,协同的途径是机间通信,目的是使多机实现无碰撞飞行的总体决策最优。多无人机分布式协同防碰撞体系结构如图2所示。

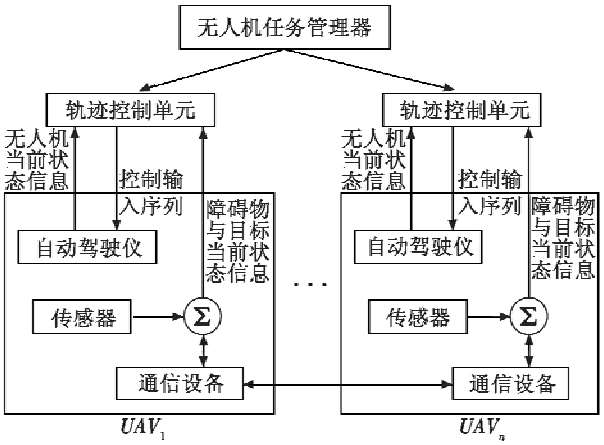


图2 多机分布式协同防碰撞体系结构

Fig. 2 Distributed cooperative collision avoidance system of multiple UAVs

1)无人机机间通信。

无人机获得障碍物和目标的信息后,能够与处于其通信距离内的无人机进行共享,实现对环境的协同感知[16]。多无人机机间通信示意如图3所示。

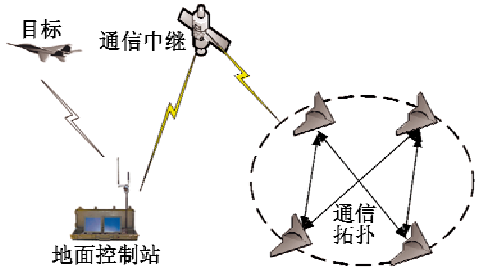


图3 多无人机分布式通信结构

Fig. 3 Distributed communication configuration of multiple UAVs

2)多机防碰撞系统协同机制。

多无人机协同防碰撞与单机自主防碰撞系统的最大区别在于,无人机可以通过机间通信实现对环境更为全面的感知,以指导无人机的协同防碰撞制导决策,实现决策行为总体优化。

## 2 基于模型预测控制的多无人机协同防碰撞控制算法

### 2.1 协同防碰撞控制器

本文提出基于模型预测控制(滚动优化)的多无人机协同防碰撞算法:利用扩展卡尔曼滤波预测障碍物和目标轨迹,在此基础上建立性能指标函数,并求解无人机的控制输入序列,最终得到无人机的无碰撞飞行轨迹。基于模型预测控制的协同防碰撞控制器如图 4 所示。

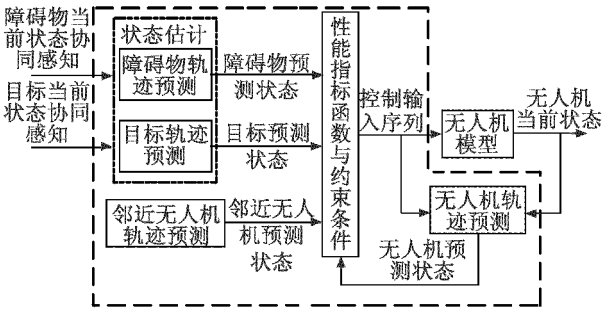


图 4　基于模型预测控制的协同防碰撞控制器

Fig. 4　Cooperative collision avoidance controller based on MPC

### 2.2 障碍物与目标状态估计

无人机发现障碍物或目标后,对其动态特征 $G(z)$ 进行鉴别,通过扩展卡尔曼滤波方法预测障碍物或目标的飞行轨迹。

1)状态估计。

$$x(k+1)=\boldsymbol{A}[x(k)]+w(k) \tag{1}$$

$$y(k)=\boldsymbol{B}[x(k)]+v(k) \tag{2}$$

状态变量 $x(k)=[u_s(k),u_\Psi(k),u_z(k)]$,其中 $u_s(k)$、$u_\Psi(k)$、$u_z(k)$ 分别为采样时刻障碍物或目标的输入速度、航向角和高度点集;矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表示下一采样时刻与当前时刻的转换关系,矩阵 $\boldsymbol{B}$ 表示输入与输出之间的关系;$w(k)$、$v(k)$ 为模型变量;输出 $y(k)=[a(k),b(k),c(k)]$,为采样时刻无人机感知障碍物或目标的坐标量。

在每一个采样时刻,设无人机感知第 $j$ 个障碍物或者目标的信息分别为:障碍物位置 $P^s_{\mathrm{obj}}(k)=[x^s_{\mathrm{obj}}(k),y^s_{\mathrm{obj}}(k),z^s_{\mathrm{obj}}(k)]$,目标位置 $P^s_{\mathrm{t}}(k)=[x^s_{\mathrm{t}}(k),y^s_{\mathrm{t}}(k),z^s_{\mathrm{t}}(k)]$,障碍物三轴向尺寸 $q^s_{\mathrm{obj}}(k)=[a^s_{\mathrm{obj}}(k),b^s_{\mathrm{obj}}(k),c^s_{\mathrm{obj}}(k)]$,障碍物欧拉角 $r^s_{\mathrm{obj}}(k)=[\phi^s_{\mathrm{obj}}(k),\psi^s_{\mathrm{obj}}(k),\theta^s_{\mathrm{obj}}(k)]$,目标欧拉角 $r^s_{\mathrm{t}}(k)=[\phi^s_{\mathrm{t}}(k),\psi^s_{\mathrm{t}}(k),\theta^s_{\mathrm{t}}(k)]$。

定义预测时域为 $h_{pi}$,控制时域为 $h_{ci}$,则基于扩展卡尔曼滤波得到障碍物或目标的预测轨迹分别为

$$\begin{cases}\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+1{:}k+h_{pi}\,|k)=f_1[P_{\mathrm{obj}}(k),w(k+1{:}k+h_{pi}\,|k)]\\ \hat{P}_{\mathrm{t}}(k+1{:}k+h_{pi}\,|k)=f_1[P_{\mathrm{t}}(k),w(k+1{:}k+h_{pi}\,|k)]\end{cases}。 \tag{3}$$

### 2.3 无人机与轨迹预测模型

1)无人机运动模型。

本文建立的无人机运动模型为

$$\Delta\boldsymbol{x}_i(k+1)=A_i\Delta x(k)+B_i\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k) \tag{4}$$

$$\Delta\boldsymbol{y}_i(k)=C_i\Delta x(k)+D_i\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k) \tag{5}$$

式中:$k$ 为当前采样时刻;$\Delta=1-z^{-1}$;$\boldsymbol{x}_i(k)$ 为状态矢量;$\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k)$ 为控制指令矢量。

操纵输入矢量

$$\boldsymbol{u}_{vi}(k)=[u_{svi}(k),u_{\Psi vi}(k),u_{zvi}(k)]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中,$u_{svi}(k)$、$u_{\Psi vi}(k)$、$u_{zvi}(k)$ 分别为采样时刻输入到无人机自动驾驶仪的速度、航向角和高度点集。

输出矢量

$$\boldsymbol{y}_i(k)=[y_{si}(k),y_{\Psi i}(k),y_{zi}(k)]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中,$u_{si}(k)$、$u_{\Psi i}(k)$、$u_{zi}(k)$ 分别为 $k$ 时刻无人机的速度、航向角和高度。则第 $i$ 架无人机 $k$ 时刻的位置为

$$\boldsymbol{P}_{vi}(k)=\begin{bmatrix}p_{vxi}(k)\\ p_{vyi}(k)\\ p_{vzi}(k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}p_{vxi}(k-1)+Ty_{si}(k)\cos[y_{\Psi i}(k)]\\ p_{vyi}(k-1)+Ty_{si}(k)\sin[y_{\Psi i}(k)]\\ y_{vzi}(k)\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中,$T$ 为采样周期。

2)无人机轨迹预测。

基于模型预测控制算法,在时间 $\tau\in[1,h_{pi}]$ 内,控制指令矢量为

$$\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k{:}k+h_{pi}\,|k)=[\Delta u_{vi}(k),\Delta u_{vi}(k+1),\cdots,\Delta u_{vi}(k+h_{pi})]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

则无人机轨迹预测为

$$\hat{P}_{vi}(k+1{:}k+h_{pi}\,|k)=f_2[\boldsymbol{P}_{vi}(k),\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k{:}k+h_{pi}\,|k)]。 \tag{10}$$

### 2.4 协同防碰撞性能指标函数与约束条件

协同防碰撞必须在无人机及时发现未知障碍和信息交互的基础上,保证每架无人机均不与障碍物发生碰撞,并尽快接近目标,同时对控制指令 $\Delta\boldsymbol{u}_{vi}(k)$ 进行惩罚,设其权重分别为 $J_{\mathrm{o}}$、$J_{\mathrm{t}}$、$J_{\mathrm{u}}$。

1)与障碍物防碰撞。

首先定义高斯概率密度函数[17-19]为

$$f_{\mathrm{obj},\tau}(P)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3\,|\sigma^2_{\mathrm{obj}}(k+\tau\,|k)|}}\times\exp\Big\{-\frac{1}{2}[\boldsymbol{P}-\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+\tau\,|k)]^{\mathrm{T}}\sigma^2_{\mathrm{obj}}(k+\tau\,|k)^{-1}\times[\boldsymbol{P}-\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+\tau\,|k)]\Big\} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{P}=[x,y,z]$,表示坐标系中任意矢量。

坐标系中任一点落在第 $j$ 个障碍物中的概率为

$$g_{\mathrm{obj},\tau}[\boldsymbol{P}-\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+\tau|k)]=\begin{cases}1, & [\boldsymbol{P}-\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+\tau|k)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{obj}}Q_{\mathrm{obj}}\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}_{\mathrm{obj}}\cdot[\boldsymbol{P}-\hat{P}_{\mathrm{obj}}(k+\tau|k)]\leqslant 1\\ 0, & \text{否则}\end{cases} \tag{12}$$

$$p_{j,\tau}(\boldsymbol{P}) = \int_{\mathrm{obj},\tau} f_{\mathrm{obj},\tau}(\hat{P}_{\mathrm{obj},\tau}) g_{\mathrm{obj},\tau}(\boldsymbol{P} - \hat{P}_{\mathrm{obj},\tau}) \mathrm{d}\hat{P}_{\mathrm{obj},\tau} = f_{\mathrm{obj},\tau}(\boldsymbol{P}) \cdot g_{\mathrm{obj},\tau}(\boldsymbol{P}) \tag{13}$$

则利用无人机与已感知的障碍物在预测时域 $h_{pi}$ 中碰撞概率来描述 $J_o(k)$。

$$J_o(k) = \xi_{ob} \sum_{\tau=1}^{h_{pi}} p(e_\tau) \tag{14}$$

式中：$\xi_{ob}$ 为权衡常数；$e_\tau$ 表示在预测时刻 $k+\tau$ 发生碰撞事件；

$$p(e_\tau) = \begin{cases} m_\tau, & \tau = 1 \\ m_\tau \prod_{n=1}^{\tau-1} [1 - p(e_n)], & \text{否则} \end{cases}; \tag{15}$$

$$m_\tau = \sum_{j \in M} \{ p_{j,\tau}(\boldsymbol{P}) \prod_{k \in N} [1 - p_{k,\tau}(\boldsymbol{P})] \} \Big|_{P = \hat{P}_{v(k+\tau/k)}}。 \tag{16}$$

2）靠近目标。

在无人机追踪动态目标的过程中，应尽量减少油耗，即尽快接近目标点，令

$$J_{t1}(k) = \sum_{\tau=1}^{h_{pi}} \xi_t(\tau) \left\| \hat{P}_v(k+\tau|k) - \hat{P}_t(k+\tau|k) \right\|_2 \tag{17}$$

式中，$\xi_t(\tau)$ 为权衡常数。

为提高多无人机完成任务的效率，各架无人机到达目标的时间差应较小，最好做到同时到达。令

$$J_{t2}(k) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \sum_{\tau=1}^{h_{pi}} \left| \left\| \hat{P}_{vi}(k+\tau|k) - \hat{P}_t(k+\tau|k) \right\|_2 - \left\| \hat{P}_{vj}(k+\tau|k) - \hat{P}_t(k+\tau|k) \right\|_2 \right| \tag{18}$$

则 $J_t(k)$ 可以表示为

$$J_t(k) = aJ_{t1}(k) + bJ_{t2}(k) \tag{19}$$

式中，$a$，$b$ 分别为权衡常数。

3）惩罚控制指令输入。

$$J_u(k) = \Delta \boldsymbol{u}_{vi}(k+1:k+h_{ci}|k)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Lambda} \Delta \boldsymbol{u}_{vi}(k+1:k+h_{ci}|k) \tag{20}$$

式中，$\boldsymbol{\Lambda}$ 为一个 $3h_{ci} \times 3h_{ci}$ 的对角矩阵，表示自动驾驶仪控制指令输入增量的权重。

根据无人机本身动态约束条件、机间防碰撞约束以及性能指标，无人机协同防碰撞问题描述如下，采用模型预测滚动优化进行求解。

$$\min J_i(k) = \operatorname{argmin}\{ J_o(k) + J_t(k) + J_u(k) \} \tag{21}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Delta u_{vi}^{\min} \leqslant \Delta \boldsymbol{u}_{vi}(k+1:k+h_{ci}|k) \leqslant \Delta u_{vi}^{\max} \\ u_{vi}^{\min} \leqslant \boldsymbol{u}_{vi}(k+1:k+h_{ci}|k) \leqslant u_{vi}^{\max} \\ \hat{P}_{vi}(k+\tau|k) \boldsymbol{R}_{vi} Q_{vi} \boldsymbol{R}_{vi}^{\mathrm{T}} \hat{P}_{vi}(k+\tau|k) \leqslant 0 \\ \bigcap_{\tau=1}^{h_{pi}} \hat{\Omega} \hat{P}_{vi}(k+\tau|k) \cap \bigcap_{\tau=1}^{h_{pi}} \hat{\Omega} \hat{P}_{vi}(k+\tau|k), i,j \in (1,2,\cdots,n_v) \\ p_{j,\tau}[\hat{P}_{vi}(k+\tau|k)] \leqslant p_{j,\tau}^{\max} \end{cases}$$

## 3 仿真分析

分别对多无人机协同防碰撞和无协同防碰撞（即单机自主防碰撞）进行仿真，并对比分析。仿真初始化结果如下：$h_{pi} = 10$ s，$h_{ci} = 4$ s，$T = 6$ s，$R_s = 50$ m；无人机初始位置为 $\begin{cases} \boldsymbol{P}_{v1}(0) = [-1500\ 50\ 500]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{P}_{v2}(0) = [-1500\ 270\ 500]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{P}_{v3}(0) = [-1500\ 480\ 500]^{\mathrm{T}} \end{cases}$；无人机初始控制输入点集为 $\boldsymbol{u}_{v1}(0) = \boldsymbol{u}_{v2}(0) = \boldsymbol{u}_{v3}(0) = [36\ \mathrm{km/h}\ 0°\ 500\ \mathrm{m}]$；权衡常数为 $\xi_{ob} = 400$，$\xi_t(\tau) = 1$，$a = b = 0.5$；对角矩阵的对角元素在控制时域相同，为 $\boldsymbol{\lambda} = [1\times10^{-3}\quad 1\times10^{-2}\quad 1\times10^{-4}]^{\mathrm{T}}$；约束限制为 $p_{j,\tau}^{\max} = 0.2$，$\Delta u_{vi}^{\max} = [20\ \mathrm{km/h}\quad 15°\quad 12\ \mathrm{m}]$，$\Delta u_{vi}^{\min} = [-20\ \mathrm{km/h}\quad -15°\quad -10\ \mathrm{m}]$，$u_{vi}^{\max} = [40\ \mathrm{km/h}\ 180°\ 1000\ \mathrm{m}]$，$u_{vi}^{\min} = [10\ \mathrm{km/h}\quad -180°\quad 200\ \mathrm{m}]$。

无人机首先感知到目标信息并开始追踪目标，在飞行过程中探测障碍物信息，并生成防碰撞策略。多无人机协同防碰撞仿真如图5所示。

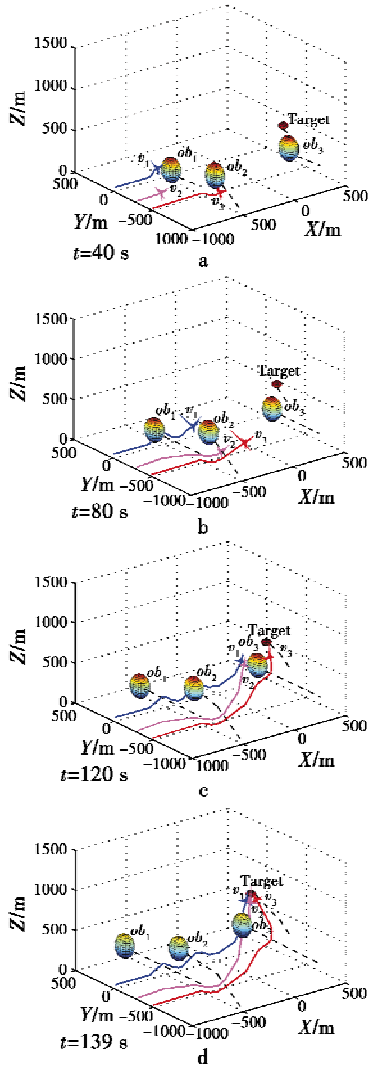


图5 多无人机协同防碰撞飞行轨迹

Fig. 5 Cooperative collision avoidance flight path of multiple UAVs

图中：虚线代表障碍物和目标点的飞行轨迹；实线代表无人机的飞行轨迹；$v_1$ 为无人机 1；$v_2$ 为无人机 2；$ob_1$ 为障碍物 1；$ob_2$ 为障碍物 2；$ob_3$ 为障碍物 3；Target 为目标。$v_1$ 和 $v_3$ 在 30 s 分别发现了 $ob_1$ 和 $ob_2$ 进行信息共享，$v_2$ 在 50 s 提前采取措施以规避 $ob_2$，$v_1$ 在 64 s 提前采取措施规避 $ob_2$；$v_3$ 在 108 s 最先发现 $ob_3$，并将其信息共享给 $v_1$ 和 $v_2$，$v_1$ 和 $v_2$ 提前采取措施以规避 $ob_3$，并使得最终 3 架无人机同时追踪到目标。

多无人机无协同防碰撞仿真如图 6 所示。

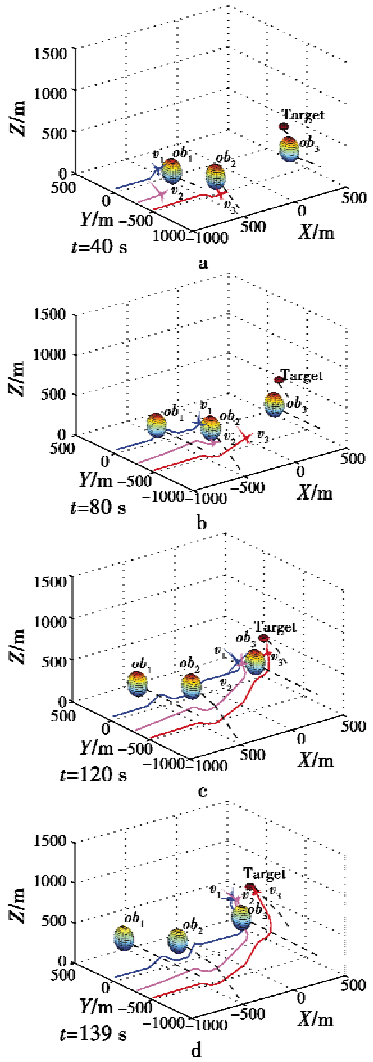


图 6　多无人机无协同防碰撞飞行轨迹

Fig. 6　Non-cooperative collision avoidance flight path of multiple UAVs

机间没有进行信息共享，因此 $v_2$ 和 $v_1$ 在发现 $ob_2$ 后均需急转弯才能规避，在 108 s 时刻，$v_1$ 和 $v_2$ 均需急转弯以规避 $ob_3$，导致飞行航迹增加，最终 3 架无人机未能同时追踪到目标，且完成任务时间延长。

预设单架无人机的最大性能指标值 $J_{max}$，$J_i/J_{max}$ 表示第 $i$ 架无人机在飞行过程中所对应的性能指标 $J_i$ 与 $J_{max}$ 的比值，则图 5、图 6 中无人机协同和无协同防碰撞过程中所对应的 $J_i/J_{max}$ 变化曲线如图 7 所示。无人机 $i$ 在飞行过程中，随着与目标之间距离的减小，$J_i/J_{max}$ 总体呈下降趋势，追踪到目标时，$J_i/J_{max}=0$，当 $J_1/J_{max}=J_2/J_{max}=J_3/J_{max}=0$ 时，表示多无人机完成所执行的任务。

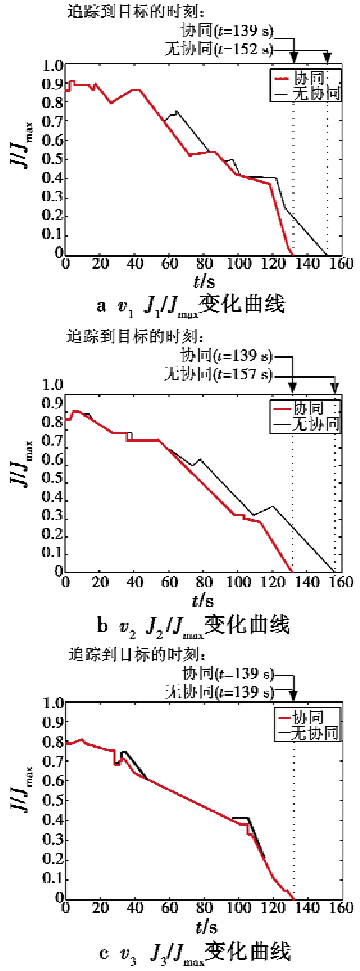


图 7　仿真过程防碰撞性能指标变化曲线

Fig. 7　Changing of collision avoidance characteristics index in simulation

由图 7 可知，协同不仅缩短了无人机执行任务所用时间，优化了无人机的性能指标，而且可以保证编队中的无人机同时追踪到目标，提高了任务的完成效率。将图 5、图 6 与图 7 仿真结果进行对比分析可知，本文采用的无人机编队协同防碰撞控制方法可实现对环境的认知，处理不确定问题，同时有效地完成无人机编队的协同防碰撞。

## 4　结论

本文提出一种新的模型预测控制算法解决多无人机防碰撞问题。运用扩展卡尔曼滤波预测不确定环境的运动障碍物或目标，然后基于模型预测控制解算无人机的输入点集，并生成最优制导决策。主要结论有：

1）分析单架无人机自主防碰撞系统，在此基础上建立多无人机分布式协同防碰撞控制体系结构；2）利用扩展卡尔曼滤波方法预测运动障碍物或目标轨迹，有效处理了环境不确定性问题；3）相比单机自主防碰撞，无人机协同基础上的模型预测算法能实现多无人机防碰撞总体决策优化。

后续可以考虑完善卡尔曼滤波结构和算法以处理传感器失效带来的探测误差；同时，如何处理无人机实际飞行过程中的机间通信延迟将是下一步研究的重点。

## 参考文献


[1] LZADI H A, GORDON B W, ZHANG Y M. Rule-based cooperative collision avoidance using decentralized model predictive control [J]. AIAA Infotech @ Aerospace, St. Louis, Missouri, 2011, doi:10.2514/6.2011-1610.

[2] RICHARDS A, HOW J. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs[C]//The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004:4286-4291.

[3] KEVICZKY T, VANEK B, BORRELLI F, et al. Hybrid decentralized receding horizon control of vehicle formations[C]// Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006:3358-3363.

[4] 李霞. 无人机自主防碰撞方法研究[D]. 西安：空军工程大学，2011.
LI X. Research on UAV autonomous collision avoidance methods[D]. Xi'an: Air force Engineering University, 2011.

[5] FULTON N L. Airspace design: Towards a rigorous specification of conflict complexity based on computational geometry[J]. Aeronautical Journal, 1999, 103(1):75-84.

[6] DOWEK G, MUNOZ C. Conflict detection and resolution for 1, 2, …, $n$ aircraft[C]//Proceedings of the 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2007, doi:10.2514/6.2007-7737.

[7] LEE L F. Decentralized motion planning within an Artificial Potential Framework (APF) for cooperative payload transport by multi-robot collectives [D]. Buffalo, New York, 2004.

[8] CHOU F Y, YANG C Y, YANG J S. Support vector machine based artificial potential field for autonomous guided vehicle [J]. Proceedings of the 4th International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2008:71304J. 1-71304J. 6.

[9] HELBLE H, CAMERON S. 3-D path planning and target trajectory prediction for the Oxford aerial tracking system [J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007:1042-1048.

[10] MASSOUD A A. Managing the dynamics of a harmonic potential field-guided robotic in a cluttered environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 488-496.

[11] 李国勇. 智能预测控制及其 Matlab 实现[M]. 2 版. 北京：电子工业出版社，2010.
LI G Y. Intelligent predictive control and matlab realization[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[12] GAGNON E, RABBATH C A, LAUZON M. Heading and position receding horizon control for trajectory generation [C]//American Control Conference, 2005:134-139.

[13] GAGNON E, RABBATH C A, LAUZON M. Receding horizons with heading constraints for collision avoidance [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, San Francisco, California, 2005, doi: 10. 2514/6, 2005- 6369.

[14] BOIVIN E, DESBIENS A, GAGNON E. UAV collision avoidance using cooperative prediction control[C]//The 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2008:682-688.

[15] GAN S K, FITCH R, SUKKARIEH S. Real-time decentralized search with inter-agent collision avoidance [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2012:504-510.

[16] 周炜，魏瑞轩，董志兴. 基于层次分解策略无人机编队避障方法[J]. 系统工程与电子技术，2009, 31(5): 1152-1157.
ZHOU W, WEI R X, DONG Z X. UAV formation obstacles avoidance methods based on hierarchical decomposition[J]. Journal of Systems Enfineering and Electronics, 2009, 31(5):1152-1157.

[17] GOODWIN G C, SIN K S. Adaptive filtering prediction and control[M]. New York: Dover Publications Com, 2013.

[18] MAYBECK P S. Stochastic models, estimation, and control[M]. New York: Academic Press, 1982.

[19] 李霞，魏瑞轩，郭庆. 多无人机系统任务管理研究[J]. 电光与控制，2011, 18(1):5-9.
LI X, WEI R X, GUO Q. Research on multi-UAV system mission management [J]. Electronic Optics & Control, 2011, 18(1):5-9.