

无人机自动防撞冲突检测与优化控制方法

许云红¹, 周锐¹, 夏洁¹, 陈哨东²

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 研究了无人机防撞冲突检测与威胁级别评估方法, 建立了航向角控制、速度控制、高度控制以及航向角与速度组合控制等多种不同的防撞控制策略; 建立了自动防撞多目标代价函数模型以及多目标最优决策方法。仿真结果证明了该方法的有效性和较好的实用性。

关键词: 无人机; 自动防撞; 威胁评估; 最优决策

中图分类号: V324 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)01-0001-06

Conflict Detection and Optimal Control for UAVs in Automatic Avoiding of Dynamic Obstacles

XU Yun-hong¹, ZHOU Rui¹, XIA Jie¹, CHEN Shao-dong²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics Astronautics,

Beijing 100191, China; 2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)

Abstract: A method for conflict detection of collision avoidance and assessment of collision threat levels are presented in this paper. The principle of collision avoidance was introduced firstly. In order to obtain an effective result, different strategies for collision avoidance were established, based respectively on heading control, velocity control, height control and the combination of heading and velocity. The models of multi-objective cost function and the methods of optimal decision-making for automatic collision avoidance were also established. The simulation results demonstrated the effectiveness and practicability of the proposed methods.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle(UAV); collision avoidance; threat assessment; optimal decision-making

0 引言

自动防撞是提高无人机自主性和安全性的关键技术之一, 并得到广泛的研究。人工势场法早期被应用于机器人的碰撞规避问题^[1]; 文献[2]采用马尔科夫决策过程实现对入侵飞机的防撞决策; 文献[3]基于最优控制理论研究了无人机的防撞逃避机动问题; 文献[4]提出一种增加视线转率的方法来规避潜在的碰撞, 防撞之后 UAV 按照 Dubins 路径继续前往目标点; 文献[5]基于概率模型预测三维空间的碰撞概率级别, 然后通过改变姿态角进行防撞; 文献[6]通过优化

多约束的线性规划模型, 并结合姿态角变化, 实现 UAV 的防撞; 文献[7]提出一种基于集合交集的防撞方法, 并通过极小化风险函数得到防撞轨迹, 但没有考虑动态防撞问题; 文献[8]对单纯基于航向角和速度控制的策略进行了研究; 文献[9]用最小化代价函数的方法解算可飞路径, 将防撞作为其中的约束条件; 文献[10]采用安全圆的概念建立飞机防撞预测和防撞策略的算法和框架。

本文建立一种同时考虑航向和速度控制的动态障碍自动防撞方法, 建立多目标代价函数, 实现自动防撞多目标优化控制。

1 自动防撞系统原理

1.1 原理和无人机质点模型

自动防撞系统通过机载传感器(如雷达)获得周围环境的信息, 实现碰撞冲突检测与消解。当机载传

收稿日期: 2013-03-04

修回日期: 2013-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(60975073, 61175109); 航空科学基金(2011ZC13001)

作者简介: 许云红(1989—), 女, 山东临沂人, 硕士生, 研究方向为导航制导与控制。

感器探测到周围有其他运动障碍物,并且可能造成冲突时,无人机将采取机动回避策略,由此可能偏离规划的航线。当 UAV 回避完毕应当迅速返回原规划的航线。UAV 的飞行模式可以对应分为 3 种:跟踪模式、回避模式和返回模式,如图 1 所示。

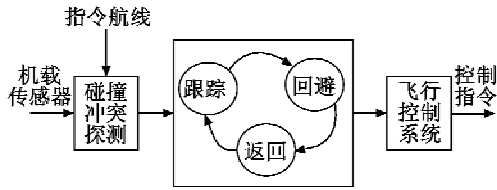


图1 自主防撞系统原理

Fig.1 The principle of automatic collision avoidance

考虑质点形式的 UAV 运动学模型

$$\begin{cases} \dot{x} = V_H \cos \varphi \\ \dot{y} = V_H \sin \varphi \\ \dot{z} = V_V \\ \dot{\varphi} = \frac{g \tan \gamma}{V_H} \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ 为航向角; g 为重力加速度; γ 为倾斜角; V_H, V_V 分别为水平和垂直方向的速度。当预测到碰撞冲突发生时,UAV 通过控制其航向角和速度来实现自主防撞,但具体采用何种防撞控制策略以及控制量的大小,则依赖于影响防撞决策的关键因素和碰撞威胁等级。

1.2 安全圆与防撞坐标系

设 UAV 存在一个安全半径为 R 的安全圆,当障碍物相对 UAV 的运动轨迹与安全圆相交则认为碰撞冲突发生。探测半径为 R_s 的机载雷达对周围环境进行周期性扫描,可得到障碍物相对于 UAV 的序列离散位置坐标,并据此进行冲突检测,如图 2 所示。

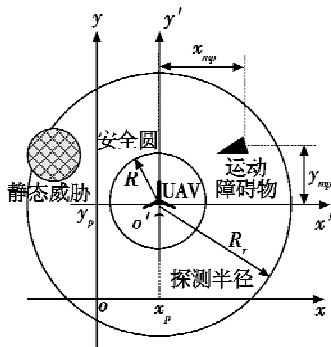


图2 安全圆、传感器探测及坐标系

Fig.2 Safe circle and sensor detection area in absolute and relative coordinate system

设 xoy 为绝对坐标系, $x'o'y'$ 为防撞坐标系(本机为原点的相对坐标系),UAV 在当前位置 (x_p, y_p) 探测到障碍物在防撞坐标系中相对本机的位置坐标为

(x_{mp}, y_{mp}) 。

2 碰撞威胁等级评估

2.1 影响防撞决策的关键因素

1) UAV 发现障碍物时的相对距离 d 。

由于 UAV 机载传感器在不同的探测范围内发现障碍物的概率是不同的,假设发现障碍物时本机和障碍物之间的距离为 d ,且在距离本机距离为 d 处发现障碍物的概率是 p , p 随着 d 的减小而增大。 d 比较大时,无人机防撞时间充足,因此可以采用相对较小的机动,反之则需要采用较大的机动。

2) UAV 距障碍物的最接近距离 d_r 。

采用防撞坐标系,UAV 与障碍物之间的最接近点即为预测的障碍物相对轨迹到 UAV 安全圆圆心的最近距离。利用障碍物当前点 (x_m, y_m) 与预测曲线最先进入 UAV 安全圆的交点 (x_s, y_s) 形成直线方程为 $Ax + By + C = 0$,由于 UAV 位于防撞坐标系的原点,则 UAV 到上述直线的最短距离 d_{\min} 为

$$d_{\min} = \frac{|Ax'_0 + By'_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (2)$$

用 d_{\min} 近似障碍物到 UAV 的最近距离 d_r 。

2.2 碰撞威胁等级

当障碍物的预测运动轨迹与 UAV 安全圆有交点时,可通过改变无人机的航向角来达到避撞的目的。

航向角改变量 $\Delta\varphi$ 的大小与 UAV 发现障碍物时的距离 d 以及障碍物运动轨迹与 UAV 之间的最接近距离 d_r 有关。 d 较大时或者 d_r 较大时采用较小的 $\Delta\varphi$,在碰撞规避的同时尽可能小地偏离原飞行航线。为此,需要根据影响防撞决策的关键因素给出防撞威胁等级,进而确定合适的避撞控制量的大小。

防撞威胁等级如表 1 所示。

表1 碰撞威胁等级划分

Table 1 Levels of collision threat

d_r	d	等级
$d_r > R$		0
$\frac{R}{2} < d_r \leq R$	$d > 3R$	1
	$2R < d \leq 3R$	2
	$d < 2R$	3
$d_r \leq \frac{R}{2}$	$d > 3R$	2
	$2R < d \leq 3R$	3
	$d < 2R$	4

3 自主防撞控制策略

3.1 航向角控制策略

当障碍物的预测轨迹与 UAV 安全圆有相交点时,则通过改变 UAV 的航向角来达到避撞的目的。航向

角改变量 $\Delta\varphi$ 的大小与初次探测到障碍物时的距离 d 以及 UAV 到障碍物预测轨迹的最接近距离 d_r 有关。 d 较大时或者 d_r 较大时也采用较小的航向角改变值, 以减小航向角机动量, 即

$$\Delta\varphi = f(d, d_r) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \varphi \leq \varphi_{\max}$$

根据碰撞威胁等级可以给出航向角控制策略。

将障碍物在防撞坐标系中的方位角记为 α , 障碍物预测轨迹与 UAV 安全圆最近交点的方位角记为 β , 其范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 各象限情况如图 3 和图 4 所示。

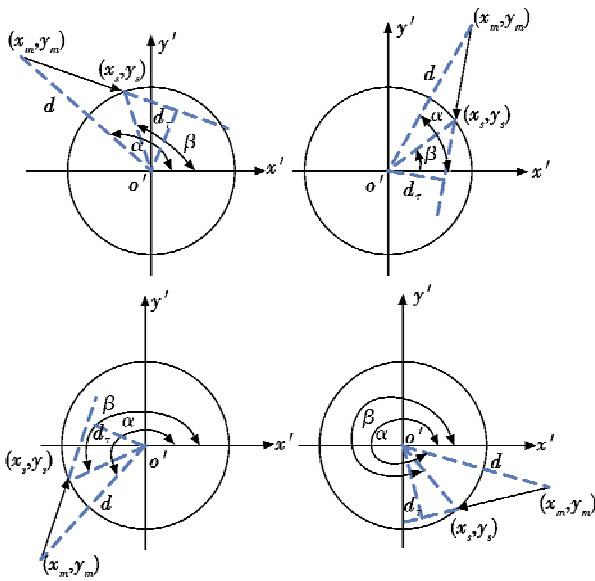


图 3 夹角 $\beta < \alpha$, 障碍物相对轨迹应该左偏

Fig. 3 The relative trajectory of obstacle should turn left when $\beta < \alpha$

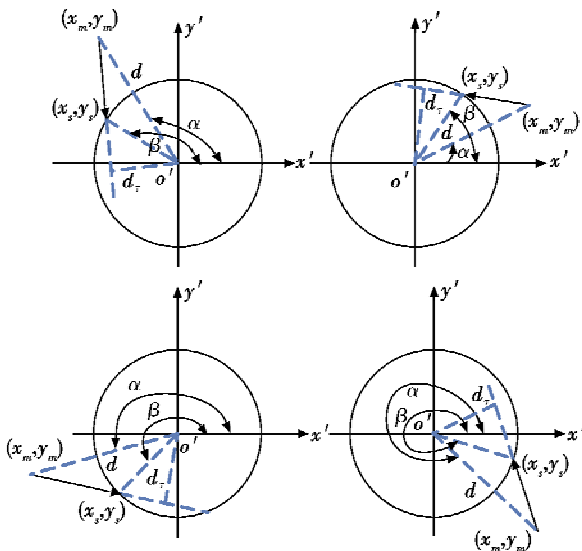


图 4 若夹角 $\beta > \alpha$, 障碍物相对轨迹应该右偏

Fig. 4 The relative trajectory of obstacle should turn right when $\beta > \alpha$

由图 3、图 4 可得如下结论:

1) 若夹角 $\beta < \alpha$ (图 3 所示), 说明原点在障碍物相对轨迹的右前方, 决策的结果是应当使障碍物相对轨迹左偏;

2) 若夹角 $\beta > \alpha$ (图 4 所示), 说明原点在障碍物相对轨迹的左前方, 决策的结果是应当使障碍物相对轨迹右偏。

3.2 速度控制策略

当检测到碰撞威胁时, 还可通过改变速度来达到防撞的目的。速度改变量 Δv 也与初次探测到障碍物时的距离 d 以及 UAV 到障碍物预测轨迹的最接近距离 d_r 有关。

$$\Delta v = g(d, d_r) \quad (4)$$

$$\text{s. t. } v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$$

根据碰撞威胁等级给出防撞速度控制策略。

图 5 为几种典型 UAV 和障碍物运动轨迹示意图。

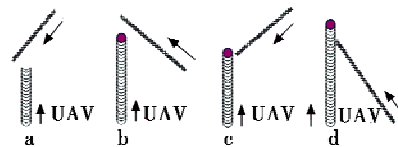


图 5 几种典型的相对运动示意图

Fig. 5 Relative motions of UAV and obstacles

通过对冲突机理的分析可得:

1) 若本机的轨迹向前的推进线与障碍物的运动轨迹相交 (如图 5a、图 5b 所示), 则本机运动趋势慢于障碍物运动趋势;

2) 若障碍物的运动轨迹向前的推进线与本机的轨迹相交 (如图 5c、图 5d 所示), 则本机运动趋势快于障碍物运动趋势。

由此, 速度调节中需要考虑的首要问题就是检测在时间推进线上, UAV 与障碍物轨迹交点对应于各自到达交点的运行时间先后的问题。图 6 为对应图 5c 中的 UAV 以及运动障碍物到轨迹交点的时间推进图。

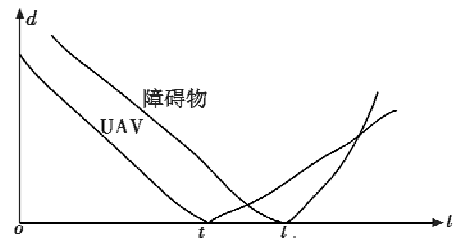


图 6 UAV 及障碍物到轨迹交点的时间推进图

Fig. 6 The durations of UAV and obstacle from their current positions to the intersection

图 6 中: t_{sa} 为本机到交点的时间; t_{so} 为运动障碍物到交点的时间; $t_{soa} = t_{so} - t_{sa}$, 为本机与障碍物在交点的

时间间隔。显然, t_{obs} 越小, 则二者冲突的机会就越大, UAV 需要改变的速度量级就越大; t_{obs} 越大, 则二者冲突的机会就越小, UAV 需要改变的速度量级就越小。

3.3 高度控制策略

由于无人机是在三维坐标系中运动, 因此, 它具有陆地车辆所没有的通过高度控制来达到防撞目的的优势。当检测到威胁时, 可以通过控制升降舵控制飞机的高度, 使得无人机和障碍物在高度上保持一定的距离 dh , 且 $dh \geq R$ 。高度的改变量与初次探测到障碍物时的距离 d 以及 UAV 到障碍物预测轨迹的最接近距离 d_r 有关。

$$\Delta h = z(d, d_r) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$$

式中: $z(\cdot)$ 为 d, d_r 的函数; h_{\min}, h_{\max} 分别为 h 的上下界。根据碰撞威胁等级给出防撞高度控制策略。

图7所示为无人机系统进行高度控制的原理。

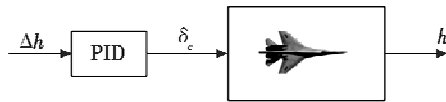


图7 无人机高度控制原理

Fig.7 The principle of height control of UAV

采用PID来控制升降舵的角度, 从而达到控制高度的目的。

$$\delta_c = L_e \Delta h + L_i \Delta \dot{h} + L_f \int \Delta h \quad (6)$$

式中: δ_c 为升降舵的控制指令; L_e, L_i, L_f 分别为比例微分积分项的系数。

图8所示为无人机进行高度控制的两种情况。

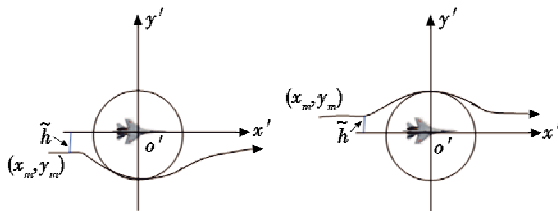


图8 无人机和障碍物进行高度控制防撞的两种情况

Fig.8 Two situations of collision avoidance with height control

选择增加或降低高度防撞均要依据预测交点时刻, 无人机和障碍物的相对高度差 \tilde{h} , 若是无人机高度大, 则选择增加高度防撞策略; 否则, 选择降低高度防撞策略。

3.4 防撞控制策略集合

由于速度改变范围有局限性, 那么单纯改变速度并不能达到完全防撞的目的, 同时, 单纯改变航向角会导致防撞时间过长, 因此, 综合两种方法, 先改变速度, 再改变航向角会得到更好的效果。

定义防撞控制策略集合 $\omega_i \in U$, 如表2所示。

表2 防撞控制策略集合

Table 2 Strategies of collision avoidance

防撞策略	代表意义
ω_1	向左或者向右改变航向角 φ
ω_2	减小或者加快速度 v
ω_3	增加或者减小高度 h
ω_4	向左改变航向角 φ , 同时减小速度 v
ω_5	向右改变航向角 φ , 同时减小速度 v
ω_6	向左改变航向角 φ , 同时加快速度 v
ω_7	向右改变航向角 φ , 同时加快速度 v

4 防撞控制策略的多目标优化

4.1 优化目标

防撞控制策略的选择不仅要考虑防撞效果, 还要考虑避碰所需要的时间、控制策略的复杂性、对预定任务的影响等因素, 因此, 需要对防撞控制策略进行优化。

1) 时间代价。

在风险函数建立过程中, 考虑防撞的时间代价。UAV_i 表示当前研究的无人机, 开始防撞的时刻为 t_{in} , UAV 防撞完毕回到跟踪原航线的时刻为 t_{out} , 则防撞所用的时间为

$$\Delta t_i = t_{out} - t_{in} \quad (7)$$

2) 冲突矩阵。

设共有 n 架 UAV, UAV_i 表示本机, 建立 UAV_i 轨迹与其他 UAV (障碍物) 轨迹相交的矩阵, 定义为冲突矩阵 $A = \{a_{ij}\}$, 则 $a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{UAV}_i \text{ 与 } \text{UAV}_j \text{ 相交} \\ 0, & \text{UAV}_i \text{ 与 } \text{UAV}_j \text{ 不相交} \end{cases}$ 。

初始阶段, 冲突矩阵 R 中所有元素都为 0, 在飞行过程中, 若 UAV_i 的机载探测设备发现潜在威胁, 如 UAV_j 可能会进入其安全圆, 则冲突矩阵中对应的元素更新为 1, 需采取相应的防撞策略。采取防撞策略后, UAV_i 与其他 UAV 也有相撞的可能性, 若潜在相撞, 则也要改变冲突矩阵中的相应元素为 1。与 UAV_i 有潜在相撞威胁的 UAV 总和为

$$J_A = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (8)$$

3) 防撞效果。

若 UAV_i 的机载探测设备发现潜在威胁, 例如 UAV_j 的预测轨迹与其安全圆有交点, 防撞效果用 UAV_i 和 UAV_j 的距离 d_{ij} 来表示, R 为 UAV_i 的安全圆半径, 则 $\begin{cases} d_{ij} \geq R, & \text{UAV}_i \text{ 与 } \text{UAV}_j \text{ 完全防撞} \\ d_{ij} < R, & \text{UAV}_i \text{ 与 } \text{UAV}_j \text{ 不完全防撞} \end{cases}$ 。

4) 控制复杂性。

假设只改变航向和只改变速度的操作复杂性 c_i 是一样的, 那么组合控制策略中的复杂性就是单纯策略的 2 倍, 则 $\begin{cases} c_i = C, & \text{采用单纯策略} \\ c_i = 2C, & \text{采用组合策略} \end{cases}$, 其中, C 为表示

操作复杂性的常数。

4.2 多目标代价函数

综合考虑上述几个因素,防撞多目标代价函数为

$$J(\omega_i) = w_1 \Delta t_i + w_2 \sum_{i=1}^n a_{ij} + w_3 (d_{ij} - R) + w_4 c_i \quad (9)$$

式中: w_i 为权值; ω_i 为碰撞控制策略,如表 2 所示。

UAV 的控制输入为航向角、速度或者两者的组合,则可以通过寻找一系列控制输入 $u^{opt}(t)$,使得代价函数 J 最小,因此有

$$u^{opt}(t) = \min_{u \in U} J \quad (10)$$

采用滚动时域优化方法对上式求解,可获得无人机最优航路。

5 仿真结果与分析

仿真使用小型无人机的质点模型,控制输入为航向角和速度改变值。设 UAV 安全圆半径 R 为 2 km,机载传感器探测半径 R_s 为 10 km,航向角 $\Delta\varphi$ 在 $-\pi/3 \sim \pi/3$ 变化,速度 v 范围为 40 ~ 100 m/s。无人机的初始速度 v 为 60 m/s,仿真一次代表无人机前进 1 s,此仿真共进行 600 次。UAV₁ 探测到障碍物,并预测其运动航迹,检测到障碍物与 UAV₁ 有相撞的威胁,图 9a 是绝对运动轨迹,图 9b 是在相撞坐标系中的轨迹,可见障碍物预测运动轨迹与 UAV 安全圆相交。

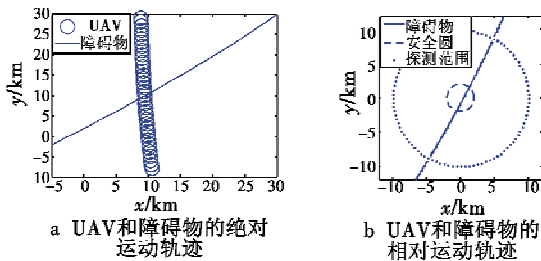


图 9 UAV 和障碍物的绝对和相对运动轨迹

Fig. 9 Absolute and relative trajectories of UAV and obstacle

图 10 和图 11 分别是仅改变航向角或速度的防撞结果;图 12 表示仅改变高度的三维防撞结果;图 13 则先改变 UAV 速度然后再改变航向角防撞结果,两种策略的比较结果在表 3 中显示。

表 3 单一策略和组合策略的比较结果

Table 3 Comparison of using one strategy and combined strategies

控制策略	防撞开始,航向角 改变量/rad	速度改变 量/(m·s ⁻¹)	防撞过程 CPU 时间/s
仅改变航向角	0.54138	20	3.3281
改变速度和 航向角	0.3925	12	2.6875

由图 10 ~ 图 13 可以看出,混合策略能够完全防撞并且指标函数的值较大,机动复杂性和时间代价要小。

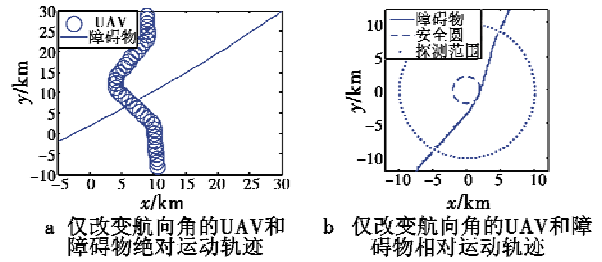


图 10 仅改变航向角的 UAV 和障碍物绝对和相对运动轨迹

Fig. 10 Absolute and relative trajectories of UAV and obstacle after altering path angle of UAV

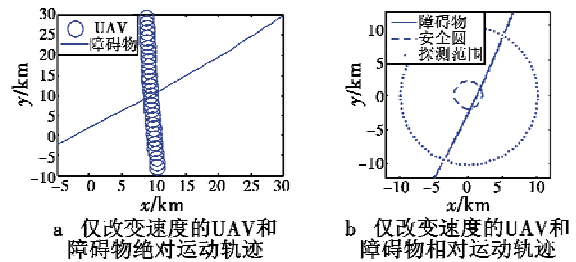


图 11 仅改变速度的 UAV 和障碍物绝对和相对运动轨迹

Fig. 11 Absolute and relative trajectories of UAV and obstacle after altering velocity of UAV

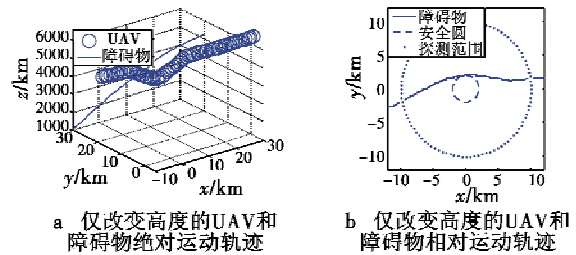


图 12 仅改变高度的 UAV 和障碍物的绝对和相对运动轨迹

Fig. 12 Absolute and relative trajectories of UAV and obstacle after altering height of UAV

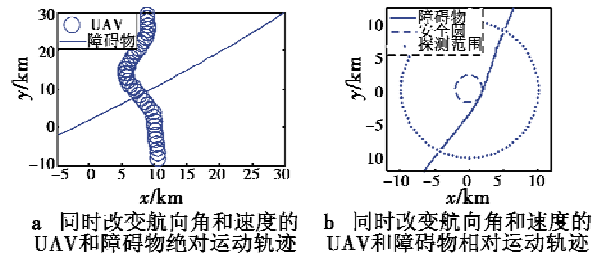


图 13 同时改变航向角和速度的 UAV 和障碍物绝对和相对运动轨迹

Fig. 13 Absolute and relative trajectories of UAV and obstacle after using combined strategies of collision avoidance

6 结束语

本文建立了航向角控制、速度控制以及航向角与速度组合控制等多种不同的防撞控制策略,并建立了考虑多种因素的多目标优化防撞控制方法,可实现不

同任务和约束情况下的防撞最优决策。研究了防撞过程中的多无人机协同控制问题。本文防撞控制方法简单、有效、实用。

参 考 文 献

- [1] KHATIB O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(1):43-53.
- [2] TEMIZER S, KOCHENDERFER M, KAELBLING L, et al. Collision avoidance for unmanned aircraft using Markov decision processes [J]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010, doi:10.2514/6.2010-8040.
- [3] 彭良福, 林云松. 空中自动防撞系统最优逃避机动的确定[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(11):1575-1579. PENG L F, LIN Y S. Determination of optimal escape maneuver for automatic air collision avoidance system [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(11):1575-1579.
- [4] MANATHARA J G, CHOSE D. Reactive collision avoidance of multiple realistic UAVs[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2011, 83(6):388-396.
- [5] KIM K Y, PARK J W, TAHK M J. UAV collision avoidance using probabilistic method in 3-D[C]//International Conference on Control, Automation and Systems, IEEE, 2007: 826-829.
- [6] 李霞, 张际海, 谢文俊, 等. 无人机自主防撞方法研究[J]. 飞行力学, 2011, 29(6):48-51. LI X, ZHANG J H, XIE W J, et al. Research on autonomic collision avoidance method for UAV [J]. Flight Dynamics, 2011, 29(6):48-51.
- [7] ALBAKER B M, RAHIM N A. Autonomous unmanned aircraft collision avoidance system based on geometric intersection[J]. International Journal of the Physical Sciences, 2011, 6(3):391-401.
- [8] 夏洁. 战术飞行管理系统关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学自动化学院, 2003:23-26. XIA J. Research on core technology for tactical flight management system [D]. Beijing: Institute of Automation, Beihang University, 2003:23-26.
- [9] SZCZERBA R J, GALKOWSKI P, GLICKSTEIN I S. A mission adaptable route planner for intelligent guidance/navigation systems [C]//The 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1998, doi:10.2514/6.1998-1012.
- [10] HARPER K A, MULGUND S S, GUARINO S L, et al. Air traffic controller agent model for free flight [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 1999, doi:10.2514/6.1999-3987.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。