

控制与决策

Control and Decision

基于观测优化的双机协同控制与避障

史浩然, 卢发兴, 王航宇, 许俊飞

引用本文:

史浩然, 卢发兴, 王航宇, 等. 基于观测优化的双机协同控制与避障[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 593–604.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1168>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于凸面体圆弧航路的无人机自主避障算法

Autonomous obstacle avoidance algorithm designed for UAV based on convex circular trajectory

控制与决策. 2021, 36(3): 653–660 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0768>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

分布式无人机的时变编队非线性控制设计

Time-varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

大规模固定翼无人机集群编队控制方法

Formation control of large-scale fixed-wing unmanned aerial vehicle swarms

控制与决策. 2021, 36(9): 2063–2073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0076>

输入受限的多旋翼无人机轨迹跟踪鲁棒正定不变集设计

Design of robust positively invariant set for trajectory tracking of multi-rotor UAV with input saturation

控制与决策. 2021, 36(4): 857–866 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0880>

基于观测优化的双机协同控制与避障

史浩然, 卢发兴[†], 王航宇, 许俊飞

(海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 为实现不确定环境下无人机对远程超视距目标的精确指示, 考虑空中移动和静止障碍物, 提出基于观测优化的双机协同控制与避障算法, 从而增加测量信息, 减小目标状态估计的不确定度. 以费舍尔信息矩阵 (FIM) 表征所获取的目标信息, 理论推导出三维空间中双机最优观测的指标函数, 并设计无人机协同控制律, 得到优化的无人机观测航迹, 增强无人机协同估计目标位置的能力. 采用基于相对速度空间的避障算法, 同时考虑转弯角速度和传感器探测距离限制的因素, 提出保持观测优化的避障策略, 并设计避障控制律, 实现对静止和移动障碍物的规避. 最后, 通过仿真实验验证所提控制方法的有效性和实用性, 仿真结果表明, 所提出的控制算法能够引导无人机处于优化的观测位置, 同时完成对移动和静止障碍物的规避.

关键词: 无人机; 协同控制; 费舍尔信息矩阵; 最优观测配置; 避障; 目标跟踪

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1168

引用格式: 史浩然, 卢发兴, 王航宇, 等. 基于观测优化的双机协同控制与避障[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 593-604.

Cooperative control and collision avoidance for two UAVs based on optimization of observation

SHI Hao-ran, LU Fa-xing[†], WANG Hang-yu, XU Jun-fei

(College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To realize the accurate indication of the over-the-horizon target by UAVs in an uncertain environment with movement and static obstacles, a cooperative control algorithm is proposed for two UAVs based on optimization of observation, to increase measurement information and reduce the uncertainty of target state estimation. The cooperative control algorithm is designed to obtain optimized tracking of UAVs and enhance the ability of cooperative estimation to the target position according to the index function of optimal observation by two UAVs in three-dimensional space which is deduced theoretically based on the Fisher information matrix (FIM) that represents obtained information of the target. A collision avoidance strategy is proposed to keep optimization of observation based on the relative velocity space with considering the limitations of the turning angle rate and the sensor detection distance, and the obstacle avoidance control algorithm is designed to avoid static and moving obstacles. Simulation experiments verify the effectiveness and practicability of the proposed control method. The simulation results show that the control algorithm can guide the UAV to the optimal observation position, and at the same time complete the avoidance of moving and stationary obstacles.

Keywords: UAV; cooperative control; FIM; configuration of optimal observation; collision avoidance; target tracking

0 引言

由于超高速武器具有射程远、动能大、成本低的优点, 以及电磁发射技术的日益成熟等因素, 极大地促进了超高速制导武器的研究. 精确目标指示技术是决定超高速武器能否对超视距目标进行精确实时打击的关键技术, 无人机由于其传感器多样、行动隐蔽、成本可控、无需人员前出等特点, 具备为超高速武器提供远程精确目标指示的潜力. 但是, 随着无人机的广泛应用, 未来空域将日趋密集, 呈现无人机、有

人机空域共享的复杂空中交通态势, 无人机面临不确定的飞行环境^[1].

为保证在不确定环境下无人机能够更好地观测到目标状态信息, 需要解决两方面问题: 1) 优化无人机观测航迹, 获得对目标更好的观测; 2) 无人机能够自主决策避开威胁目标.

问题 1) 又可以细分为无人机观测配置以及无人机航迹控制两个子问题. 在无人机观测配置方面, 国内外学者做了大量研究工作, 文献 [2] 研究了二维和

收稿日期: 2020-08-20; 录用日期: 2020-11-23.

责任编辑: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: lfx1974@163.com.

三维空间中仅角度、仅距离、接收信号强度下的多传感器配置问题;文献[3]研究了双无人机配置下的协同定位问题;文献[4]给出了二维条件下基于测角、测距信息的FIM行列式,并研究了多机观测的配置问题;文献[5]分析了三维空间中纯方位被动定位中多传感器相对目标的几何位置最优配置,并进行了理论推导.但上述工作只考虑了二维空间中传感器配置问题,或者是在三维空间中基于仅角度或者仅距离信息的传感器配置问题,并没有考虑三维空间中基于角度信息和距离信息的传感器配置问题.

在无人机航迹控制方面,文献[6-7]采用李雅普诺夫导航矢量场控制多机对静止和运动目标保持距离跟踪;文献[8-9]通过控制无人机在圆上的相位获取最优观测效果并实现稳定跟踪;文献[10]基于滚动时域控制的方式实现了多机协同最优目标跟踪;文献[11]提出了一种次优反馈制导律,在保证传感器接近目标的同时,控制传感器与目标视线保持 90° ;文献[12]提出了一种由趋近与盘旋两阶段组成的双机跟踪最优控制律;文献[13]介绍了用于协作目标跟踪的移动传感器网络耦合分布估计和运动控制的理论框架.以上工作要么控制无人机绕目标做盘旋运动(显然这对于超视距目标是不现实的),要么控制无人机趋近目标运动,但是没有考虑到不确定环境下如何保持观测优化的问题.

在无人机自主决策避障方面,文献[14]利用遗传算法实现静止与运动环境下的规避路径规划,通过可变染色体长度实现最小碰撞威胁和最小路径消耗;文献[15]采用模型预测控制和粒子群优化算法控制无人机在执行侦察任务时的静态和移动威胁规避.然而,这些基于优化的方法计算量大,需要启发式地选择终止准则来保证收敛时间,因此很难应用于实时操作.文献[16]利用人工势场法确定自动避开目标地理区域以外目标的无人机飞行路线,并通过防止由动态变化的空中交通造成的偶然碰撞来实时更新无人机的路线;文献[17]采用避碰势场函数完成对静止障碍物的避障,但是势场方法存在局部极小值、目标不可达等问题^[18];文献[19]基于速度障碍圆弧法提出了一种动态不确定环境下无人机自主避障算法;文献[20]提出了一种基于几何的无人机编队飞行避碰策略.这种“感知并避免”方法具有较低的计算需求和较短的响应时间等优点,因此利于实时实现.

总体而言,国内外学者在无人机观测航迹优化和自主避障方面取得了卓有成效的研究成果,但是普遍存在着没有考虑三维空间中基于角度信息和距离信

息的传感器配置问题,而且在避障时没有考虑到保持观测优化位置的问题.在上述问题的推动下,本文首先分析三维空间中双机最优观测配置,设计出双机趋近超视距目标的协同控制算法,然后采用几何避障模型,提出保持观测优化的避碰策略,在完成对动态障碍物规避的同时仍能保持观测优化,从而使得无人机能够在不确定环境中获得更好的观测数据,增加测量信息,减小目标状态估计的不确定度,达到对超视距目标精确指示的目的.

1 观测航迹优化

本节以费舍尔信息矩阵(FIM)表征所获取的目标信息^[21],研究双无人机与目标的相对位置关系,得到使FIM行列式最大化的无人机配置,通过设计无人机的观测航迹,使无人机处于更好的相对观测位置,从而获取目标更多的观测信息.

1.1 最优观测配置

以双机观测为例,在三维空间中,目标位置为 $T(x_t, y_t, z_t)$,无人机1的位置为 $U_1(x_1, y_1, z_1)$,无人机2的位置为 $U_2(x_2, y_2, z_2)$,无人机与目标之间的视线夹角为 θ_{12} ,图1为三维空间中双无人机对目标定位的示意图.

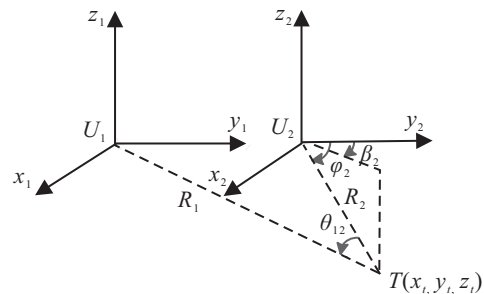


图1 双无人机对目标定位

图1中: β_2 表示无人机2观测目标的方位角, φ_2 表示无人机2观测目标的俯仰角.

在三维空间中,目标在 k 时刻的状态表示为 $\mathbf{X}_k = [x_t, y_t, z_t]^T$,无人机的状态为 $\mathbf{U}_k = (x_u, y_u, z_u)^T$,则无人机与目标的相对向量为 $\mathbf{r}_k = [r_x, r_y, r_z]^T_k$,雷达观测到的目标信息为

$$\mathbf{h}(\mathbf{X}_k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ \beta(k) \\ \varphi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{r_x}{r_y}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}\right) \end{bmatrix}_k \quad (1)$$

其中: $r(k)$ 、 $\beta(k)$ 、 $\varphi(k)$ 分别表示无人机在 k 时刻对目标的观测距离、观测方位角和观测俯仰角.

观测函数的雅克比矩阵表示为

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}} & \frac{r_y}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}} & \frac{r_z}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}} \\ \frac{r_y}{r_x^2 + r_y^2} & \frac{-r_x}{r_x^2 + r_y^2} & 0 \\ \frac{-r_x r_z}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 \sqrt{r_x^2 + r_y^2}} & \frac{-r_x r_z}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 \sqrt{r_x^2 + r_y^2}} & \frac{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_r \\ \mathbf{H}_\beta \\ \mathbf{H}_\varphi \end{bmatrix}_k \quad (2)$$

无人机*i*的观测误差矩阵为

$$\mathbf{R}_i = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varphi^2). \quad (3)$$

其中: σ_r^2 、 σ_β^2 、 σ_φ^2 分别表示雷达距离、方位角、俯仰角测量方差。

假设目标的运动函数为 $\mathbf{X}_{k+1} = f(\mathbf{X}_k) + \mathbf{w}_k$, 则该观测系统的FIM^[22]为

$$\mathbf{J}_k = [\Phi_{k,k-1}^T]^{-1} \mathbf{J}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^{-1} + \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H}_k, \quad (4)$$

其中 $\Phi_{k,k-1} = \nabla_{\mathbf{X}_k} f(\mathbf{X}_k)$ 表示目标状态转移函数的雅可比矩阵。

在最优观测配置中, 只考虑目标的当前位置, 假定目标当前位置固定, 得到*N*架无人机观测单目标

时, FIM可以表示为

$$\mathbf{J}_N = \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i^T \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{H}_i = \sum_{i=1}^N [\mathbf{H}_r^T, \mathbf{H}_\beta^T, \mathbf{H}_\varphi^T]_i \mathbf{R}_i^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_r \\ \mathbf{H}_\beta \\ \mathbf{H}_\varphi \end{bmatrix}_i \quad (5)$$

其中:*i*表示第*i*架无人机, \mathbf{H}_i 表示第*i*架无人机观测函数的雅可比矩阵。

假设 $\sigma^2 = \sigma_r^2 = \sigma_\beta^2 \cos^2 \varphi_1 = \sigma^2$, 结合式(2)和(5), 当双无人机观测单目标时, FIM可以表示为 $\mathbf{F}(T) = \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_2^T$, 其中

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_1 \sin \beta_1}{\sigma} & \frac{\cos \beta_1}{\sigma R_1} & -\frac{\sin \beta_1 \sin \varphi_1}{\sigma R_1} & \frac{\cos \varphi_2 \sin \beta_2}{\sigma} & \frac{\cos \beta_2}{\sigma R_2} & -\frac{\sin \beta_2 \sin \varphi_2}{\sigma R_2} \\ \frac{\cos \varphi_1 \cos \beta_1}{\sigma} & -\frac{\sin \beta_1}{\sigma R_1} & -\frac{\cos \beta_1 \sin \varphi_1}{\sigma R_1} & \frac{\cos \varphi_2 \cos \beta_2}{\sigma} & -\frac{\sin \beta_2}{\sigma R_2} & -\frac{\cos \beta_2 \sin \varphi_2}{\sigma R_2} \\ \frac{\sin \varphi_1}{\sigma} & 0 & \frac{\cos \varphi_1}{\sigma R_1} & \frac{\sin \varphi_2}{\sigma} & 0 & \frac{\cos \varphi_2}{\sigma R_2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

采用柯西-比内公式, $\det(\mathbf{F}(T))$ 由下列1)~7)部分组成:

1) $\sum_{S_1} \det(\mathbf{D}_1) \cdot \det(\mathbf{D}_1^T)$.

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_i \sin \beta_i}{\sigma_r} & \frac{\cos \beta_j}{\sigma R_j} & -\frac{\sin \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\cos \varphi_i \cos \beta_i}{\sigma_r} & -\frac{\sin \beta_j}{\sigma R_j} & -\frac{\cos \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\sin \varphi_i}{\sigma_r} & 0 & \frac{\cos \varphi_k}{\sigma R_k} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

① $i = j = k$ 时, 即*i*、*j*、*k*列来自同一架无人机的观测, 这部分 d_{11} 为

$$d_{11} = \sum_{S_{11}} \frac{1}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_j^4}, \quad (8)$$

其是 $S_{11} = \{(i, j, k) | 1 \leq i = j = k \leq 2\}$.

② $i = j \neq k$ 时, 即*i*、*j*列来自同一架无人机的观测, *k*列来自另一架无人机观测, 这部分 d_{12} 为

$$d_{12} =$$

$$\sum_{S_{12}} \frac{[\sin \varphi_i \sin \varphi_k \cos(\beta_i - \beta_k) + \cos \varphi_i \cos \varphi_k]^2}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_i^2 R_k^2}, \quad (9)$$

其中 $S_{12} = \{(i, j, k) | 1 \leq i = j \neq k \leq 2\}$.

③ $i = k \neq j$ 时, 即*j*、*k*列来自同一架无人机的观测, *i*列来自另一架无人机观测, 这部分 d_{13} 为

$$d_{13} = \sum_{S_{13}} \frac{\cos^2(\beta_i - \beta_j)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_i^2 R_j^2}, \quad (10)$$

其中 $S_{13} = \{(i, j, k) | 1 \leq i = k \neq j \leq 2\}$.

④ $i \neq j = k$ 时, 即*j*、*k*列来自同一架无人机的观测, *i*列来自另一架无人机观测, 这部分 d_{14} 为

$$d_{14} = \sum_{S_{14}} \frac{[\cos \varphi_i \cos \varphi_k \cos(\beta_i - \beta_k) + \sin \varphi_i \sin \varphi_k]^2}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_i^2}, \quad (11)$$

其中 $S_{14} = \{(i, j, k) | 1 \leq i \neq j = k \leq 2\}$.

$S_1 = S_{11} \cup S_{12} \cup S_{13} \cup S_{14}$, 第1)部分(即 $\sum_{S_1} \det(\mathbf{D}_1) \cdot \det(\mathbf{D}_1^T)$)等于式 $d_{11} \sim d_{14}$ 之和。

$$2) \sum_{S_2} \det(\mathbf{D}_2) \cdot \det(\mathbf{D}_2^T).$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_i \sin \beta_i}{\sigma} & \frac{\cos \beta_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \varphi_k \sin \beta_k}{\sigma} \\ \cos \varphi_i \cos \beta_i & \frac{\sin \beta_j}{\sigma R_j} & \cos \varphi_k \cos \beta_k \\ \frac{\sin \varphi_i}{\sigma} & 0 & \frac{\sin \varphi_k}{\sigma} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

① $i = j$, 即 i, j 列来自同一架无人机的观测, 这部分 d_{21} 为

$$d_{21} = \sum_{S_{21}} \frac{[\sin \varphi_j \cos \varphi_k \cos(\beta_j - \beta_k) - \cos \varphi_j \sin \varphi_k]^2}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_j^2}, \quad (13)$$

其中 $S_{21} = \{(j, k) | 1 \leq j < k \leq 2\}$.

② $i = k$, 即 i, j 列来自同一架无人机的观测, 这部分 d_{22} 为

$$d_{22} = \sum_{S_{22}} \frac{[\sin \varphi_j \cos \varphi_i \cos(\beta_i - \beta_j) - \cos \varphi_j \sin \varphi_i]^2}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_j^2}, \quad (14)$$

其中 $S_{22} = \{(i, j) | 1 \leq i < j \leq 2\}$.

$$3) \sum_{S_3} \det(\mathbf{D}_3) \cdot \det(\mathbf{D}_3^T).$$

$$\mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_i \sin \beta_i}{\sigma} & \frac{\cos \beta_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \beta_k}{\sigma R_k} \\ \cos \varphi_i \cos \beta_i & \frac{\sin \beta_j}{\sigma R_j} & \frac{\sin \beta_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\sin \varphi_i}{\sigma} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

与2)分析相同, 3)也分成两部分, 即

$$\sum_{S_3} \det(\mathbf{D}_3) \cdot \det(\mathbf{D}_3^T) = \sum_{S_{31}} \frac{\sin^2 \varphi_j \sin^2(\beta_j - \beta_k)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_j^2 R_k^2} + \sum_{S_{32}} \frac{\sin^2 \varphi_k \sin^2(\beta_j - \beta_k)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_j^2 R_k^2}. \quad (16)$$

其中: $S_{31} = \{(j, k) | 1 \leq j < k \leq 2\}$, $S_{32} = S_{31}$.

$$4) \sum_{S_4} \det(\mathbf{D}_4) \cdot \det(\mathbf{D}_4^T).$$

$$\mathbf{D}_4 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_i \sin \beta_i}{\sigma} & \frac{\sin \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \varphi_k \sin \beta_k}{\sigma} \\ \cos \varphi_i \cos \beta_i & \frac{\cos \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & \cos \varphi_k \cos \beta_k \\ \frac{\sin \varphi_i}{\sigma} & \frac{\cos \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\sin \varphi_k}{\sigma} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

与2)分析相同, 4)也分成两部分, 即

$$\sum_{S_4} \det(\mathbf{D}_4) \cdot \det(\mathbf{D}_4^T) = \sum_{S_{41}} \frac{\cos^2 \varphi_k \sin^2(\beta_j - \beta_k)}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_j^2} + \sum_{S_{42}} \frac{\cos^2 \varphi_i \sin^2(\beta_i - \beta_j)}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_j^2}. \quad (18)$$

其中: $S_{41} = \{(j, k) | 1 \leq j < k \leq 2\}$, $S_{42} = \{(i, j) | 1 \leq i < j \leq 2\}$.

$$5) \sum_{S_5} \det(\mathbf{D}_5) \cdot \det(\mathbf{D}_5^T).$$

$$\mathbf{D}_5 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \varphi_i \sin \beta_i}{\sigma} & \frac{\sin \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\sin \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \cos \varphi_i \cos \beta_i & \frac{\cos \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\sin \varphi_i}{\sigma} & \frac{\cos \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \varphi_k}{\sigma R_k} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

与2)分析相同, 5)也分成两部分, 即

$$\sum_{S_5} \det(\mathbf{D}_5) \cdot \det(\mathbf{D}_5^T) = \sum_{S_{51}} \frac{\cos^2 \varphi_k \sin^2(\beta_j - \beta_k)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_j^2 R_k^2} + \sum_{S_{52}} \frac{\cos^2 \varphi_j \sin^2(\beta_k - \beta_j)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_j^2 R_k^2}. \quad (20)$$

其中: $S_{51} = \{(j, k) | 1 \leq j < k \leq 2\}$, $|S_{51}| = C_N^2$, $S_{52} = S_{51}$.

$$6) \sum_{S_6} \det(\mathbf{D}_6) \cdot \det(\mathbf{D}_6^T).$$

$$\mathbf{D}_6 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta_i}{\sigma R_i} & \frac{\cos \beta_j}{\sigma R_j} & \frac{\sin \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\sin \beta_i}{\sigma R_i} & \frac{\sin \beta_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ 0 & 0 & \frac{\cos \varphi_k}{\sigma R_k} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

与2)分析相同, 6)也分成两部分, 即

$$\sum_{S_6} \det(\mathbf{D}_6) \cdot \det(\mathbf{D}_6^T) = \sum_{S_{61}} \frac{\cos^2 \varphi_i \sin^2(\beta_i - \beta_j)}{\sigma^6 R_i^4 R_j^2} + \sum_{S_{62}} \frac{\cos^2 \varphi_j \sin^2(\beta_i - \beta_j)}{\sigma^6 R_i^2 R_j^4}. \quad (22)$$

其中: $S_{61} = \{(j, k) | 1 \leq i < j \leq 2\}$, $|S_{61}| = C_N^2$, $S_{62} = S_{61}$.

$$7) \sum_{S_7} \det(\mathbf{D}_7) \cdot \det(\mathbf{D}_7^T).$$

$$\mathbf{D}_7 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta_i}{\sigma R_i} & -\frac{\sin \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & -\frac{\sin \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ \frac{\sin \beta_i}{\sigma R_i} & -\frac{\cos \beta_j \sin \varphi_j}{\sigma R_j} & -\frac{\cos \beta_k \sin \varphi_k}{\sigma R_k} \\ 0 & \frac{\cos \varphi_j}{\sigma R_j} & \frac{\cos \varphi_k}{\sigma R_k} \end{bmatrix}.$$

(23)

与2)分析相同,7)也分成两部分,即

$$\sum_{S_7} \det(\mathbf{D}_7) \cdot \det(\mathbf{D}_7^T) =$$

$$\sum_{S_{71}} \frac{[\cos \varphi_j \sin \varphi_k \cos(\beta_j - \beta_k) - \sin \varphi_j \cos \varphi_k]^2}{\sigma^6 R_j^4 R_k^2} +$$

$$\sum_{S_{72}} \frac{[\sin \varphi_j \cos \varphi_k \cos(\beta_j - \beta_k) - \cos \varphi_j \sin \varphi_k]^2}{\sigma^6 R_j^2 R_k^4}.$$

(24)

其中: $S_{71} = \{(j, k) | 1 \leq j < k \leq 2\}, |S_{71}| = C_N^2, S_{72} = S_{71}.$

综上 $S = S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_6 \cup S_7$ 可得

$$\det(\mathbf{J}_2) =$$

$$\frac{1 + [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2]^2}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^4} +$$

$$\frac{1 + [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2]^2}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_2^4} +$$

$$\frac{[\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2]^2}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_1^2} +$$

$$\frac{\cos^2 \varphi_2 \sin^2(\beta_2 - \beta_1)}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_1^2} +$$

$$\frac{[\sin \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos(\beta_1 - \beta_2) - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1]^2}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_2^2} +$$

$$\frac{\cos^2 \varphi_1 \sin^2(\beta_2 - \beta_1)}{\sigma_r^4 \sigma^2 R_2^2} +$$

$$\frac{[\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2)]^2}{\sigma^6 R_1^4 R_2^2} +$$

$$\frac{\cos^2 \varphi_1 \sin^2(\beta_2 - \beta_1)}{\sigma^6 R_1^4 R_2^2} +$$

$$\frac{[\sin \varphi_2 \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \cos(\beta_1 - \beta_2)]^2}{\sigma^6 R_1^2 R_2^4} +$$

$$\frac{\cos^2 \varphi_2 \sin^2(\beta_2 - \beta_1)}{\sigma^6 R_1^2 R_2^4} +$$

$$\frac{2 \sin^2 \varphi_1 \sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^2 R_2^2} + \frac{2 \sin^2 \varphi_2 \sin^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^2 R_2^2} +$$

$$\frac{2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2)}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^2 R_2^2} +$$

$$\frac{2[\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2]^2}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^2 R_2^2}. \quad (25)$$

令 $\mathbf{r}(\varphi_i, \beta_i) = (\cos \varphi_i \sin \beta_i, \cos \varphi_i \cos \beta_i, \sin \varphi_i)$, 则有

$$\cos \theta_{12} = \mathbf{r}(\varphi_1, \beta_1) \cdot \mathbf{r}(\varphi_2, \beta_2) =$$

$$\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_2 - \beta_1) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2, \quad (26)$$

$$[\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 - \sin \varphi_2 \cos \varphi_1 \cos(\beta_2 - \beta_1)]^2 +$$

$$\cos^2 \varphi_1 \sin^2(\beta_2 - \beta_1) =$$

$$1 - [\mathbf{r}(\varphi_1, \beta_1) \cdot \mathbf{r}(\varphi_2, \beta_2)]^2 = 1 - \cos^2 \theta_{12}, \quad (27)$$

$$\sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2) =$$

$$(1 - \cos^2 \varphi_1)(1 - \cos^2 \varphi_2) \cos^2(\beta_1 - \beta_2) =$$

$$(\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2 - 1 +$$

$$\cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2) \cos^2(\beta_1 - \beta_2) =$$

$$\sin^2 \varphi_1 [1 - \sin^2(\beta_1 - \beta_2)] +$$

$$\sin^2 \varphi_2 [1 - \sin^2(\beta_1 - \beta_2)] -$$

$$\cos^2(\beta_1 - \beta_2) + \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2). \quad (28)$$

由式(28)可得

$$\sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2) +$$

$$\sin^2 \varphi_1 \sin^2(\beta_1 - \beta_2) +$$

$$\sin^2 \varphi_2 \sin^2(\beta_1 - \beta_2) + \cos^2(\beta_1 - \beta_2) =$$

$$\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2 + \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 \cos^2(\beta_1 - \beta_2), \quad (29)$$

$$\cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 =$$

$$(1 - \sin^2 \varphi_1)(1 - \sin^2 \varphi_2) =$$

$$1 - \sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2. \quad (30)$$

由式(30)可得

$$\sin^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_2 + \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2 =$$

$$1 + \sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2. \quad (31)$$

将式(26)、(27)、(29)、(31)代入(25),可得

$$\det(\mathbf{J}_2) = \det(\mathbf{F}_2) \det(\mathbf{F}_2^T) =$$

$$\frac{(1 + \cos^2 \theta_{12})}{\sigma_r^2 \sigma^4} \left(\frac{1}{R_1^4} + \frac{1}{R_2^4} \right) +$$

$$\frac{(1 - \cos^2 \theta_{12})}{\sigma_r^4 \sigma^2} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) +$$

$$\frac{(1 - \cos^2 \theta_{12})}{\sigma^6} \left(\frac{1}{R_1^2 R_2^4} + \frac{1}{R_1^4 R_2^2} \right) +$$

$$\frac{2(1 + \cos^2 \theta_{12})}{\sigma_r^2 \sigma^4 R_1^2 R_2^2}. \quad (32)$$

由式(32)可知,对于基于测向测距传感器的双机最优观测配置问题, $R_i = r_{\min} (i \in \{1, 2\})$ 是FIM行列式取极大值的必要条件,当 $R_1 = R_2 = r_{\min}$ 时,有

$$\det(\mathbf{J}_2) = \frac{2}{r_{\min}^6 \sigma_r^4 \sigma^6} [(r_{\min}^2 \sigma^2 + \sigma_r^2)^2 - (r_{\min}^2 \sigma^2 - \sigma_r^2)^2 \cos^2 \theta_{12}]. \quad (33)$$

当 $\cos \theta_{12} = 0$ 时, $\det(\mathbf{J}_2)$ 取得最大值,因此在三维空间中双无人机对目标进行测距测角观测时,两架无人机尽可能靠近目标并保持视线角 $\theta_{12} = \pi/2$, FIM达到最大,目标跟踪误差最小.

1.2 基于观测优化的双无人机协同控制

基于双机最优观测配置分析,设计观测优化的协同控制方法,在三维空间中使无人机与目标之间的夹角接近或保持在 90° ,从而提高目标跟踪的精确度和实时性.针对超视距目标跟踪而言,无人机趋近于目标运动,因此只需设计趋近阶段的控制方法,为达到 90° 的视线夹角,设计无人机的航向角控制^[12]

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_1 + k_1(\theta_{12}) \sin(\theta_{12} - \pi/2), \\ \alpha_2 &= \beta_2 - k_2(\theta_{12}) \sin(\theta_{12} - \pi/2). \end{aligned} \quad (34)$$

根据式(26)可得

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= \\ &\arccos(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) + \sin_1 \sin \varphi_2). \end{aligned} \quad (35)$$

在式(34)中: β_1, β_2 分量引导无人机飞向目标,缩短与目标之间的距离; $\sin(\theta_{12} - \pi/2)$ 分量使得两架无人机与目标之间的视线夹角趋近于 90° ,并通过比例系数 $k_1(\theta_{12}), k_2(\theta_{12})$ 调节二者趋于 90° 的程度,采用距离自适应的趋近控制方法,即

$$\begin{aligned} k_1(\theta_{12}) &= K_1 \cdot |\sin(\theta_{12} - \pi/2)|, \\ k_2(\theta_{12}) &= K_2 \cdot |\sin(\theta_{12} - \pi/2)|. \end{aligned} \quad (36)$$

其中 K_1, K_2 为比例系数,取距离因子 P ,令

$$K_1 = \begin{cases} \frac{P}{D_1}, & \frac{P}{D_1} < 1.21; \\ 1.21, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (37)$$

$$K_2 = \begin{cases} \frac{P}{D_2}, & \frac{P}{D_2} < 1.21; \\ 1.21, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (38)$$

D_1, D_2 分别为两架无人机到探测目标的距离.当距离目标较远时,加大无人机向目标运动方向的控制量,以趋近目标;当距离较近时,加大无人机与目标视线夹角的控制量,以达到最优观测角度.

2 避障控制

无人机在目标跟踪中具有避障能力是至关重要的,有关避障的定义如图2所示.

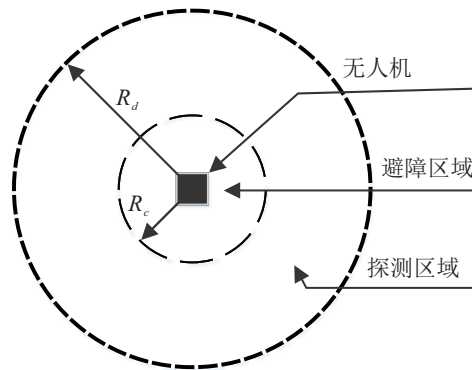


图2 无人机避障探测区域

图2中: R_d 表示无人机探测区域半径; R_c 表示碰撞区域半径,当无人机与障碍物的距离小于 R_c 时,发生碰撞.

2.1 避障算法

采用速度空间中基于相对速度信息的避障策略^[17, 20],达到对动态障碍物的规避.下面讨论无人机在水平面内的避障运动.

假设无人机和障碍物的速度大小是恒定的,而且障碍物的速度方向在一定时间内是不变的,无人机在飞行过程中遇到碰撞半径为 d_c 的障碍物,如图3所示.

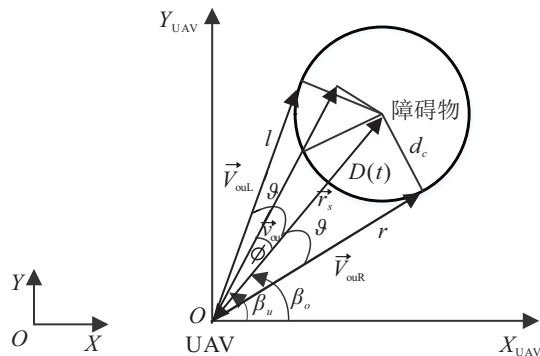


图3 速度空间中无人机避障示意图

在图3中, XOY 为全局空间坐标系,定义以无人机当前时刻为坐标原点,各轴向与全局空间坐标轴一致的局部坐标系为 $X_{UAV}OY_{UAV}$,则在该坐标系下: \vec{v}_{ou} 表示无人机与障碍物的相对速度,相对于 X 轴的夹角为 β_u ; \vec{r}_s 表示无人机与障碍物的视线向量,相对于 X 轴的夹角为 β_o .从无人机当前位置可以得到与碰撞半径所定义的圆相切的两条切线,即切线 l 表示左切线,切线 r 表示右切线,这两条切线分别对应的速度矢量为 $\vec{v}_{ouL}, \vec{v}_{ouR}$.

由图3分析可知,无人机与障碍物发生碰撞的条

件为

$$\beta_o - \vartheta \leq \beta_u \leq \beta_o + \vartheta, \quad (39)$$

其中 ϑ 为切线向量 \vec{l} 和 \vec{r} 相对于视线向量 \vec{r} 的夹角. 因此无人机的避障过程可以通过障碍物相对于无人机的速度与坐标系 X 轴的夹角控制实现. 考虑无人机最优观测条件时, 避障方向应优先使得无人机与目标夹角趋近于 90° .

如图4所示, 无人机1与障碍物的左右切点分别为 (x_L, y_L) , (x_R, y_R) , 无人机2的坐标为 (x_{u2}, y_{u2}) , 目标点的坐标为 (x_t, y_t) , 可以得到障碍物左侧切点、目标和无人机2的夹角 $\theta_{12,L}$, 障碍物右侧切点、目标和无人机2之间的夹角 $\theta_{12,R}$. 则采取的避障策略为

$$\vec{v}_{ou} = \begin{cases} \vec{V}_{ouL}, & \beta_o - \vartheta \leq \beta_u \leq \beta_o + \vartheta, \\ & |\cos \theta_{12,L}| \leq |\cos \theta_{12,R}|; \\ \vec{V}_{ouR}, & \beta_o - \vartheta \leq \beta_u \leq \beta_o + \vartheta, \\ & |\cos \theta_{12,L}| > |\cos \theta_{12,R}|; \\ \vec{V}_{ou}, & \beta_u < \beta_o - \vartheta \text{ or } \beta_u > \beta_o + \vartheta. \end{cases} \quad (40)$$

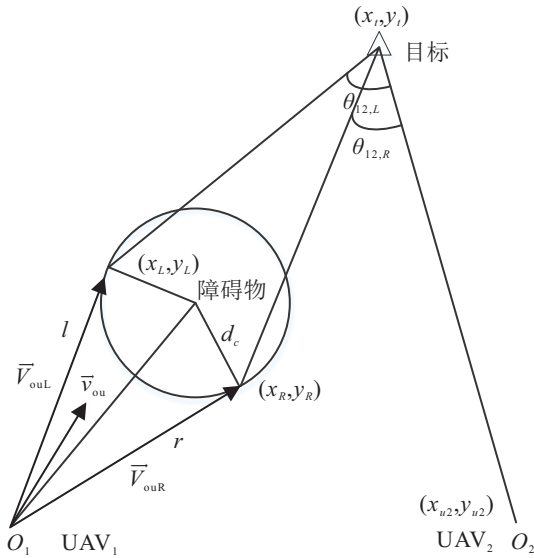


图4 无人机避障方向选择示意图

以上分析了避障方向的问题, 即从障碍物的左侧进行避障还是从障碍物的右侧进行避障. 下面讨论避障角度选取的问题.

图3中 ϕ 为相对速度 \vec{v}_{ou} 与视线矢量 \vec{r}_s 的夹角, 可得到

$$\phi = \begin{cases} \pi/2, & |\vec{r}_s| = 0 \text{ or } |\vec{v}_{ou}| = 0; \\ \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}|} \right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (41)$$

因此可以得到当无人机选择从障碍物左侧避障时, 无人机的左转角度为 $\vartheta - \phi$; 当无人机选择从障碍物右侧避障时, 无人机右转角度为 $\vartheta + \phi$.

采用式(39)判断是否会发生碰撞, 若利用无人机和障碍物的所有信息, 则会增加整个算法的计算量. 为了减少计算量, 采用以下判断准则:

$$\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou} \geq 0, \quad (42)$$

$$D(t) \sin \phi < d_c, \quad (43)$$

其中 $D(t)$ 是无人机与障碍物之间的距离. 若满足以上两个条件, 则需要执行避障动作.

除了需要判断避障动作的开始, 还需要判断避障动作的结束. 当成功避免碰撞时, 相对速度矢量 \vec{v}_{ou} 垂直于视线矢量 \vec{r}_s , 此时 $\phi = \pi/2$, 随后 ϕ 角度变化越来越大, 成为钝角, $\cos \phi < 0$.

$$\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou} = |\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}| \cos \phi. \quad (44)$$

由式(44)可知, 当 $\cos \phi < 0$ 时, $\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou} < 0$, 因此, 当 $\cos \phi < 0$ 时, 避障动作结束.

无人机在水平面内的避障过程分析同样可以运用到无人机在垂直平面内的避障过程.

2.2 转弯角速度受限条件下的避障策略

根据2.1节分析可知, 无人机向左避障时的转弯角度不小于 $\vartheta - \phi$, 假设无人机最大偏航角速度为 $\pm r_{lim}$ ($r_{lim} > 0$), 则无人机在水平面内向左完成避障动作所需的最小时间间隔为

$$T = \frac{\vartheta - \phi}{r_{lim}}. \quad (45)$$

无人机在完成避障动作过程中飞行的最短距离为

$$D_{UAV} = |\vec{v}_{ou}| \cdot T = |\vec{v}_{ou}| \cdot \frac{\vartheta - \phi}{r_{lim}} = |\vec{v}_{ou}| \cdot \frac{\sin^{-1} \left(\frac{d_c}{D(t)} \right) - \left| \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}|} \right) \right|}{r_{lim}}. \quad (46)$$

由图3可知, 无人机到障碍物区域边缘的距离为

$$D = D(t) \cos \phi - \sqrt{d_c^2 - D(t)^2 \sin^2 \phi}. \quad (47)$$

无人机和障碍物不发生碰撞时, 有 $D > D_{UAV}$,

即

$$D(t) \cos \phi - \sqrt{d_c^2 - D(t)^2 \sin^2 \phi} - |\vec{v}_{ou}| \cdot \frac{\sin^{-1} \left(\frac{d_c}{D(t)} \right) - \left| \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}|} \right) \right|}{r_{lim}} > 0. \quad (48)$$

同理,无人机向右避障时的转弯角度不小于 $\vartheta + \phi$,无人机和障碍物不发生碰撞应满足

$$D(t) \cos \phi - \sqrt{d_c^2 - D(t)^2 \sin^2 \phi} - \frac{\sin^{-1} \left(\frac{d_c}{D(t)} \right) + \left| \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}} \right) \right|}{r_{lim}} |\vec{v}_{ou}| > 0. \quad (49)$$

对于垂直面内也有相似的条件

$$D(t) \cos \phi - \sqrt{d_c^2 - D(t)^2 \sin^2 \phi} - \frac{\sin^{-1} \left(\frac{d_c}{D(t)} \right) - \left| \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}} \right) \right|}{q_{lim}} |\vec{v}_{ou}| > 0, \quad (50)$$

$$D(t) \cos \phi - \sqrt{d_c^2 - D(t)^2 \sin^2 \phi} - \frac{\sin^{-1} \left(\frac{d_c}{D(t)} \right) + \left| \cos^{-1} \left(\frac{\vec{r}_s \cdot \vec{v}_{ou}}{|\vec{r}_s| |\vec{v}_{ou}} \right) \right|}{q_{lim}} |\vec{v}_{ou}| > 0, \quad (51)$$

其中 q_{lim} 为无人机的爬升率。

综上,考虑转弯角速度限制因素时,在水平面内保持最优观测避障算法流程如图5所示。

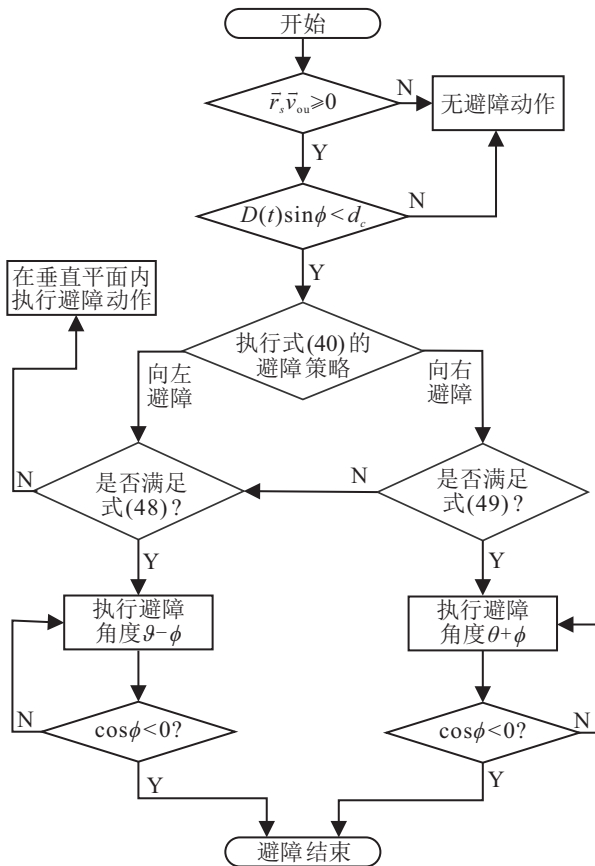


图5 最优观测条件下避障策略

当在水平面内满足限制条件的情况下,无人机既能从障碍物的左侧,又能从障碍物的右侧避障时,选择使得无人机与目标夹角更快趋近于 90° 的方向避障;如果有一侧未能满足避障条件,则只能选择可以避障的方向进行避障。若水平面内不能完成避障操作,则考虑在垂直面内完成避障,垂直面内的避障策略与水平面相同。若水平面和垂直面都不能完成避障动作,则考虑改变无人机的速度完成避障。

2.3 避障控制律设计

无人机在三维空间内的运动模型为

$$\dot{x} = v \cos \gamma \sin \alpha, \quad \dot{y} = v \cos \gamma \cos \alpha, \quad \dot{z} = v \sin \gamma. \quad (52)$$

其中: v 表示无人机的速度; γ 、 α 分别表示飞行倾斜角和航向角。假设可以将闭环飞行器动力学建模为一阶系统,即遵循

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\tau_\gamma} \gamma + \frac{1}{\tau_\gamma} u_\gamma, \quad (53)$$

$$\dot{\alpha} = -\frac{1}{\tau_\alpha} \alpha + \frac{1}{\tau_\alpha} u_\alpha. \quad (54)$$

这里: τ_γ 、 τ_α 表示常数, u_γ 和 u_α 分别表示避障时飞行倾斜角和航向角的控制命令。则可以得到倾斜角和航向角控制命令

$$u_\gamma = \gamma - k_\gamma \tau_\gamma \gamma_e = \gamma - k_\gamma \tau_\gamma (\gamma - \hat{\gamma}), \quad (55)$$

$$u_\alpha = \alpha - k_\alpha \tau_\alpha \alpha_e = \alpha - k_\alpha \tau_\alpha (\alpha - \hat{\alpha}). \quad (56)$$

其中: k_γ 、 k_α 表示大于0的常数, $\hat{\gamma}$ 和 $\hat{\alpha}$ 分别表示期望的倾斜角和航向角。

以下对倾斜角和航向角控制命令进行稳定性分析。

考虑下面的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \gamma_e^2 + \frac{1}{2} \alpha_e^2, \quad (57)$$

则有

$$\dot{V} = \dot{\gamma}_e \gamma_e + \dot{\alpha}_e \alpha_e = \dot{\gamma}_e (\gamma - \hat{\gamma}) + \dot{\alpha}_e (\alpha - \hat{\alpha}). \quad (58)$$

将式(53)~(56)代入(58)可得

$$\dot{V} = \frac{u_\gamma - \gamma}{\tau_\gamma} (\gamma - \hat{\gamma}) + \frac{u_\alpha - \alpha}{\tau_\alpha} (\alpha - \hat{\alpha}) = -k_\gamma (\gamma - \hat{\gamma})^2 - k_\alpha (\alpha - \hat{\alpha})^2 \leq 0. \quad (59)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知, γ 、 α 渐近稳定于 $\hat{\gamma}$ 、 $\hat{\alpha}$ 。

结合上述分析,可得到在不确定环境中双无人机最优观测协同控制算法结构如图6所示。

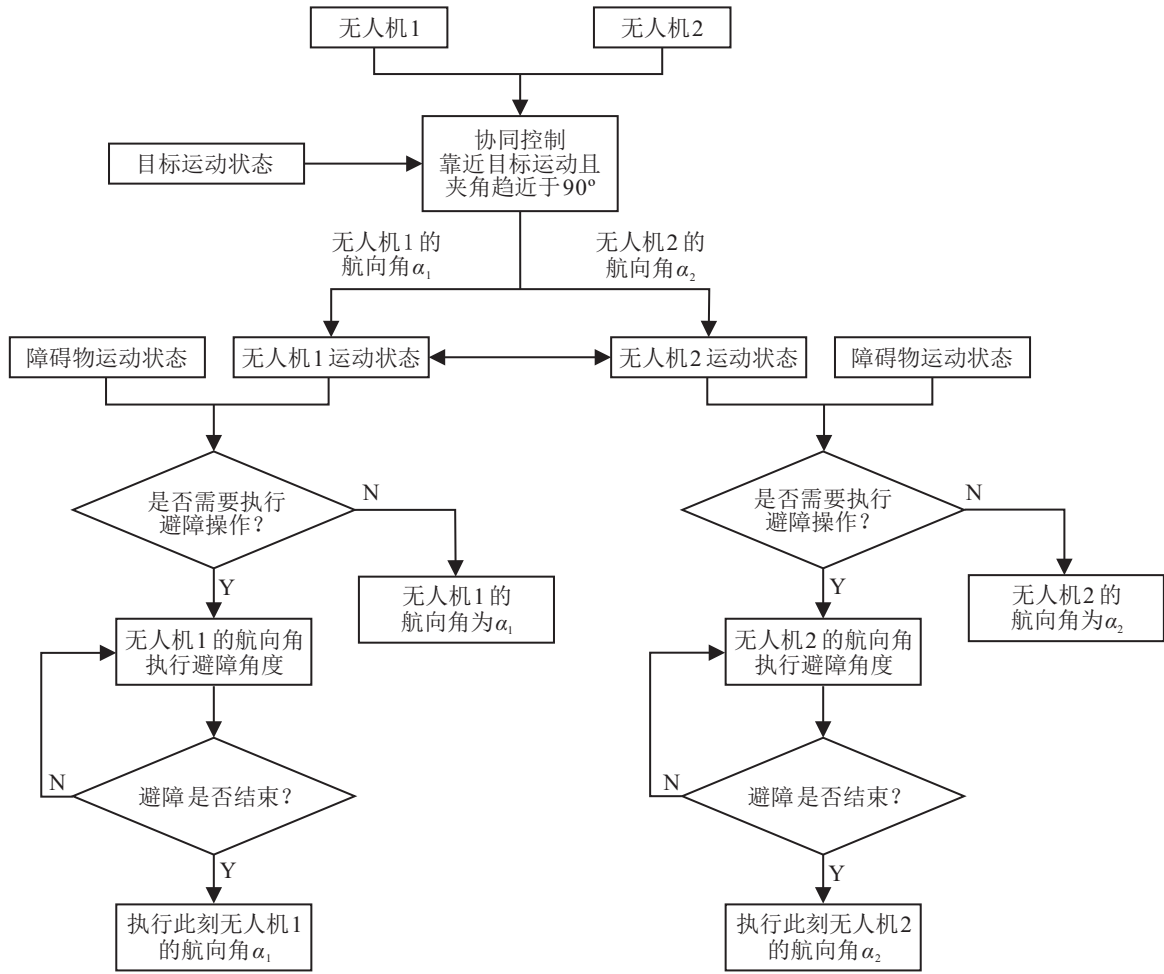


图6 不确定环境中双无人机最优观测协同控制算法

3 仿真实验与结果分析

本节面向双无人机协同跟踪超视距目标的想定,开展数值仿真研究,并在空中设置静止和移动障碍物,验证所提控制方法的有效性. 仿真编程环境为 Matlab 2019b.

目标在水平面内做匀速直线运动,目标初始位置

位于 $(0, 200\ 000, 0)$ m 处,速度为 8 m/s ,方向角为 $\pi/4$,传感器对障碍物的最大探测距离为 15 km .

假设无人机以固定高度恒定速度飞行,无人机初始位置、速度以及性能参数如表1所示,移动障碍物和静止障碍物参数如表2所示. 仿真时长为 $1\ 300\text{ s}$,仿真间隔为 1 s .

表1 无人机初始状态信息与性能约束

序号	初始位置/km	飞行高度/km	飞行速度/(m/s)	最大偏航角速度/(rad/s)
1	(12.5, 50, 5)	5	100	0.6
2	(-12.5, 50, 5)	5	100	0.6

表2 障碍物参数表

名称	初始位置/km	障碍区域半径/km	水平方向速度/(m/s)	垂直方向速度/(m/s)
静止障碍物	(45.5, 100, 5)	5	0	0
移动障碍物	(-30, 150, 5)	2.5	-10	-10

图7给出了不同仿真时刻双无人机协同跟踪运动目标与避障轨迹,在起始时刻双无人机分开一定的角度,随着角度分开的同时无人机趋近目标飞行.

图7中右侧区域为静止障碍物区域,左侧区域为

移动障碍物区域,可以看出无人机1完成了对静止障碍物的规避,无人机2对移动障碍物也完成了规避动作. 图7(h)给出了三维空间中双无人机协同跟踪运动目标与避障轨迹.

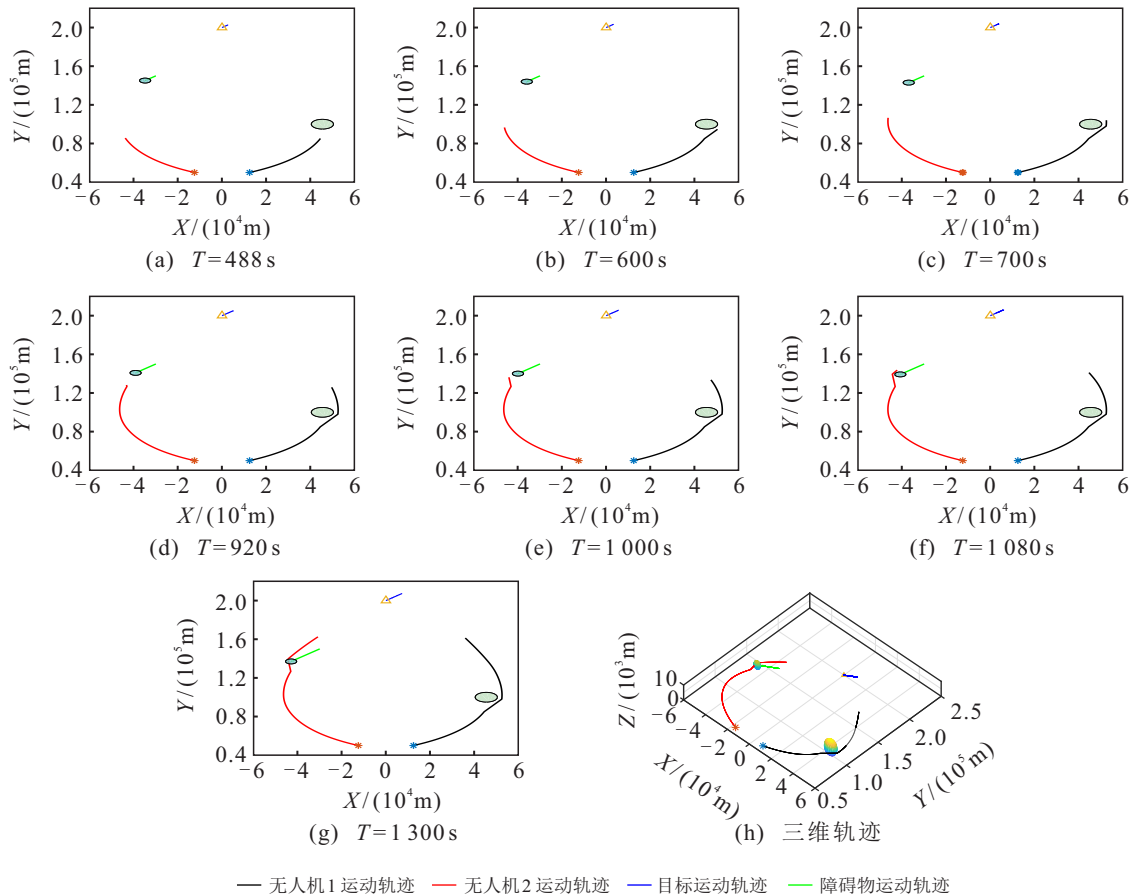


图7 双无人机协同跟踪运动目标与避障轨迹

无人机与目标视线夹角变化如图8所示。

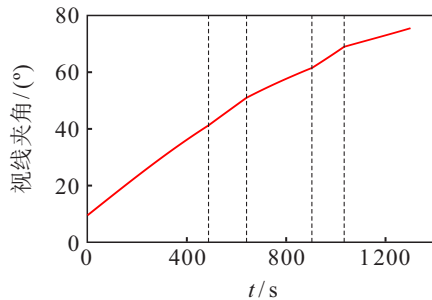


图8 无人机与目标视线夹角变化

结合图7与图8,无人机在趋近目标的同时,与目标的视线夹角也趋近于 90° ,系统FIM的行列式在不断增大(如图9所示),这表明无人机获得目标的信息量在不断增大,对于目标状态的估计也越来越准确,验证了本文的观测配置分析.图8中487s~641s与903s~1034s时间段曲线斜率变大,无人机与目标视线夹角能够更快地趋近于 90° .这是由于无人机避障的过程中,在无人机既可以选择从左侧避障也可以选择从右侧避障的条件下,无人机选择从增大目标视线夹角的方向进行避障,从而保证无人机在避障的同时仍能保持观测优化的位置.最优观测配置的形成不仅与角度有关,还与无人机到目标的距离有关,在无

人机进行避障的过程中势必会影响无人机趋近目标的距离,因此相比较有障碍物而言,在无障碍物的情况下,无人机仍能更快地趋近于最优观测条件.

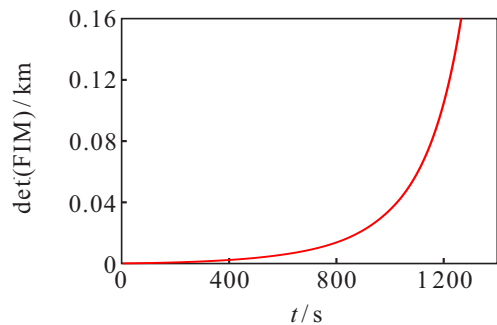


图9 系统FIM行列式变化

无人机偏航角速度变化如图10所示。

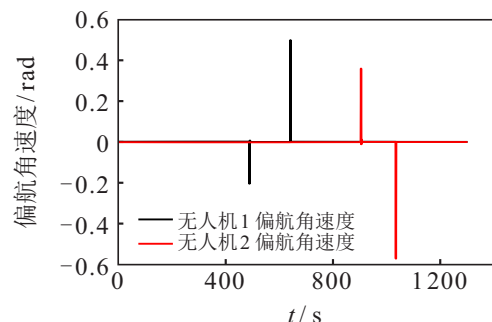
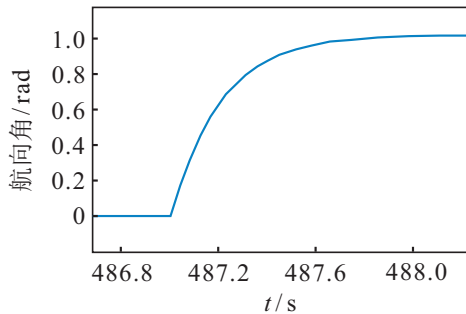


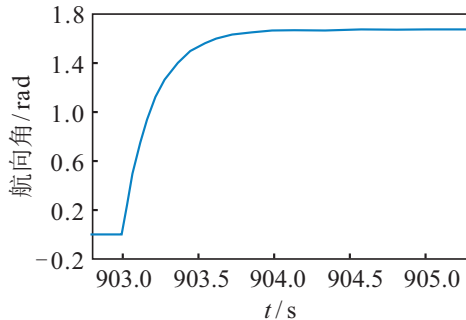
图10 无人机偏航角速度变化

从图7无人机协同跟踪和避障过程与图10无人机偏航角速度变化曲线中可以看出,在这个时间段内无人机执行了避障操作. 由于无人机飞行距离远、时间长以及传感器对障碍物的探测距离远,造成图10中无人机的偏航角速度都比较小. 无人机在飞行过程中只有在执行避障操作以及结束避障的时刻,偏航角速度发生了较大的变化,这与实际情况是相符的.

无人机避障过程中航向角控制命令变化如图11所示.



(a) 无人机1避障过程中航向角控制命令变化



(b) 无人机2避障过程中航向角控制命令变化

图11 无人机避障过程中航向角控制命令变化

从图11所示无人机避障过程中航向角控制命令变化曲线的分析可以得出,无人机1在487s之前未执行避障动作,因此航向角控制命令为零,之后航向角控制命令逐渐增大,最终在488s趋于稳定,表明避障时飞行航向角收敛于期望的航向角. 同样,无人机2在903s之前未执行避障动作,之后执行避障动作,飞行航向角在904s趋于稳定,表明本文避障算法所采用的航向角控制命令是可行的.

4 结论

1) 通过对无人机、传感器与障碍物的建模,提出了一种不确定环境下双无人机最优观测协同控制方法,以实现远程超视距目标的精确指示.

2) 以费舍尔信息矩阵(FIM)表征所获取的目标信息,理论推导出了三维空间中双机最优观测的指标函数;基于相对速度空间法结合最优观测条件,提出了基于观测优化的避障策略,避障算法只需要无人机和障碍物当前的位置和速度信息,因此实现简单且计

算量小,利于实时处理.

3) 通过对仿真实验和结果分析,本文提出的协同控制算法得到了充分的验证. 在实现对移动和静止障碍物有效避障的同时,无人机仍能保持在观测优化的位置,验证了本文所提控制算法的有效性.

参考文献(References)

- [1] 吕洋, 康童娜, 潘泉, 等. 无人机感知与规避: 概念、技术与系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 520-537.
(Lyu Y, Kang T N, Pan Q, et al. UAV sense and avoidance: concepts, technologies, and systems[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2019, 49(5): 520-537.)
- [2] Zhao S Y, Chen B M, Lee T H. Optimal sensor placement for target localization and tracking in 2D and 3D[J]. International Journal of Control, 2013, 86(10): 1687-1704.
- [3] Lee W, Bang H, Leeghim H. Cooperative localization between small UAVs using a combination of heterogeneous sensors[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1): 105-111.
- [4] 王林. 多无人机协同目标跟踪问题建模与优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 76-83.
(Wang L. Modeling and optimization for multi-UAVs cooperative target tracking[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 76-83.)
- [5] Zhong Y, Wu X Y, Huang S C, et al. Optimality analysis of sensor-target geometries for bearing-only passive localization in three-dimensional space[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(2): 391-396.
- [6] Frew E W, Lawrence D A, Morris S. Coordinated standoff tracking of moving targets using Lyapunov guidance vector fields[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(2): 290-306.
- [7] Frew E, Lawrence D. Cooperative stand-off tracking of moving targets by a team of autonomous aircraft[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, 2005: 15-18.
- [8] Kim S, Oh H, Tsourdos A. Nonlinear model predictive coordinated standoff tracking of a moving ground vehicle[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(2): 557-566.
- [9] Ma L L, Hovakimyan N. Cooperative target tracking in balanced circular formation: multiple UAVs tracking a ground vehicle[C]. Proceedings of the 2013 American Control Conference. Washington DC, 2013: 5386-5391.
- [10] 邸斌. 面向侦察任务的多无人机协同控制关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015: 93-95.
(Di B. Key issues in reconnaissance-oriented cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles[D].

- Bei Jing: Bei Jing University of Aeronautics and Astronautics, 2015: 93-95.)
- [11] Sinclair A J, Prazenica R J, Jeffcoat D E. Optimal and feedback path planning for cooperative attack[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(6): 1708-1715.
- [12] 钟春梅, 赵振宇, 孙海波, 等. 多无人机协同目标跟踪闭环最优控制方法[J]. *探测与控制学报*, 2012, 34(3): 13-18.
(Zhong C M, Zhao Z Y, Sun H B, et al. A closed-loop optimal control for multiple unmanned aerial vehicles cooperative target tracking[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(3): 13-18.)
- [13] Olfati-Saber R, Jalalkamali P. Coupled distributed estimation and control for mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(10): 2609-2614.
- [14] Tu J P, Yang S X. Genetic algorithm based path planning for a mobile robot[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 2003: 1221-1226.
- [15] Chen J, Zha W Z, Peng Z H, et al. Cooperative area reconnaissance for multi-UAV in dynamic environment[C]. *The 9th Asian Control Conference (ASCC)*. Istanbul, 2013: 1-6.
- [16] Oguz A E, Puymaz E S. Artificial potential field based autonomous UAV flight in dynamic environment[C]. *The 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Washington DC, 2016: 13-17.
- [17] Peng Z H. Ground target tracking and collision avoidance for UAV based guidance vector field[J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2015, 19(2): 277-283.
- [18] 陈守凤. 基于改进人工势场法的多无人机协同航迹规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 18-20.
(Chen S F. An improved artificial potential field based path planning algorithm for cooperative collision of multiple unmanned aerial vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 18-20.)
- [19] 杨秀霞, 周础础, 张毅. 基于速度障碍圆弧法的UAV自主避障规划研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(1): 168-176.
(Yang X X, Zhou W W, Zhang Y. Automatic obstacle-avoidance planning for UAV based on velocity obstacle arc method[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(1): 168-176.)
- [20] Seo J, Kim Y, Kim S, et al. Collision avoidance strategies for unmanned aerial vehicles in formation flight[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(6): 2718-2734.
- [21] Petr T, Carlos H M, Arye N P. Cram'er-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(5): 1386-1396.
- [22] Ponda S, Kolacinski R, Frazzoli E. Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Chicago, 2009: 1211-1235.

作者简介

史浩然(1992—), 男, 博士生, 从事多无人机协同控制和目标跟踪的研究, E-mail: Shihaoran_1992@163.com;

卢发兴(1974—), 男, 教授, 博士, 从事舰艇指挥控制和多目标优化等研究, E-mail: lfx1974@163.com;

王航宇(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事舰艇指挥控制和无人机协同控制等研究, E-mail: wanghangyu@sina.com;

许俊飞(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事最优化理论和作战效能评估的研究, E-mail: xjf09531@sina.com.

(责任编辑: 闫妍)