

无人机跟踪地面非合作目标的分段引导与控制方法

王勋, 孔维玮, 张代兵, 朱华勇

国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073

E-mail: hitwxx@126.com

摘要:针对无人机地面非合作目标跟踪问题, 设计了一种产生期望航向角的分段引导律和无人机转向控制律。首先建立了问题的求解模型, 并分析了无人机跟踪地面非合作目标的两种情形: 避免暴露和最小化暴露时间。同时证明了设计的引导律和控制律可以在安全状态下控制无人机避免暴露, 在暴露状态下控制无人机最小化暴露时间。理论分析和仿真实验结果都表明设计的引导律和控制律能够控制无人机有效的跟踪地面非合作目标。

关键词: 无人机, 非合作目标, 跟踪, 分段式, 引导控制

Segment Guidance and Control on Non-cooperative Ground Target Tracking for Unmanned Aerial Vehicles

WANG Xun, KONG Wei-wei, ZHANG Dai-bing, ZHU Hua-yong

College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, 410073,

E-mail: hitwxx@126.com

Abstract: This paper deals with the problem of non-cooperative ground target tracking using Unmanned Aerial Vehicles(UAVs). A segment guidance law and a heading rate control law are proposed to achieve the tracking. Firstly, the model of the problem is established. Exposure avoidance and minimizing the exposure time are studied respectively in terms of the initial state of the UAV. Secondly, the proposed approach is proved to be successful in dealing with the problem. Finally, theoretical analysis and simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key Words: UAV, Target tracking, Non-cooperative, Segment Guidance and control

1 引言

近年来, 无人机地面目标跟踪问题得到越来越多的关注^{[1][2]}。尽管已经存在很多方法, 但是理论和实践上依然存在一些挑战。论文针对无人机地面非合作目标跟踪的引导与控制算法进行研究。

关于无人机目标跟踪问题已有很多研究。在文献[2]和[3]中介绍了一种Lyapunov向量场的方法, 该算法可以引导无人机沿着静止目标周围的圆形轨迹飞行, 改进后能够应用于移动目标的跟踪。文献[4]中提出一种基于后退理论(BackStepping)的全局逼近移动目标跟踪算法, 该算法控制移动机器人保持固定距离跟踪目标。文献[5]中提出一种自主引导算法, 引导物理约束下的无人机跟踪移动目标。文献[6]提出一种基于动态路径规划的无人机目标跟踪算法, 利用正切向量场产生无人机的最小跟踪路径。上述方法都能使无人机按照期望的圆形轨迹飞行, 但是都没有考虑无人机可能会暴露给被跟踪目标的情况。文献[7]考虑了暴露的问题, 提出一种基于反正切函数的引导方法, 和一种继电器式转向速率控制器。但是其引导律只能引导无人机逆时针盘旋跟踪目标, 而且跟踪轨迹贴近期望轨迹的速度较慢。

在非合作目标跟踪的过程中, 无人机能否避免暴露取决于无人机的初始状态。当无人机可以避免暴露时可以把目标看作一个障碍; 当无人机无法避免暴露时, 可以把目标附近的区域看作威胁区域。关于无人机避障, 已经有几种方法被相继提出, 例如势场法、Lyapunov障碍函数法和最优化方法等。当无人机无法避免暴露时, 设计引导律和控制律的目标就是最小化无人机脱离威胁区域的时间。文献[8]研究了无人机需要在一定短的时间内飞过威胁区。文献[9]研究了寻找两个点间最小弧长路径的方法。这些研究都是集中在最小化两点间距离。然而, 如何控制无人机在威胁区以最小路径逃出仍然是一个未解决的问题。

论文主要研究无人机对地面非合作目标跟踪的引导和控制算法。无人机运动学模型选择Dubins模型, 以跟踪性能和无人机的安全为指标, 设计一种分段式引导律和转向控制律, 能够控制无人机在可以避免暴露时避免暴露; 在无法避免暴露时, 最小化暴露时间。

2 问题陈述

首先给出论文研究的问题:

问题1: 如果无人机的初始状态能够满足避免暴露的条件, 如何使无人机趋向于圆形轨迹并且保证无人机避免暴露。

*此项工作得到国防基础科研项目资助, 项目编号: A2820080247.

问题2: 如果无人机的初始状态不能满足避免暴露的条件, 如何最小化暴露时间并且使无人机趋向于期望圆形轨迹。

2.1 无人机模型

假设无人机高度不变, 无人机运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_0 \cos \psi \\ \dot{y} = v_0 \sin \psi \\ \dot{\psi} = u \end{cases} \quad (1)$$

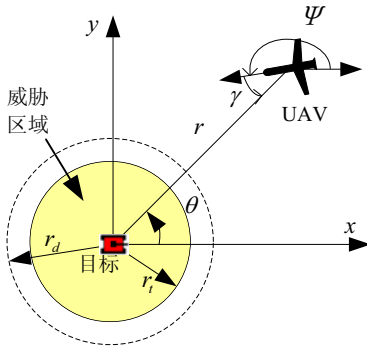


图 1: 无人机目标跟踪示意图

如图1, $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ 是无人机在惯性坐标系中的二维坐标, $\psi \in [-\pi, \pi)$ 是无人机的航向角, v_0 是无人机的固定空速, u 是航向角转向速率的控制输入。无人机有以下约束:

$$0 < v_{\min} \leq v_0 \leq v_{\max}; |u| \leq \omega_{\max} \quad (2)$$

无人机模型极坐标形式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta \\ -\dot{x} \sin \theta + \dot{y} \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 \cos(\psi - \theta) \\ v_0 \sin(\psi - \theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 是无人机和原点之间的水平距离, $\theta = \arctan 2(y, x) \in [-\pi, \pi)$ 是 x 轴到无人机与目标之间连线的角度, 如图1所示。

2.2 引导律与控制律

假设目标静止于坐标原点, 设计的引导律如式 (4) (5) 所示:

$$\psi_d = \langle \theta + \phi \rangle \quad (4)$$

$$\phi = \begin{cases} \text{sign}_+(\gamma) \left[\arccos\left(\frac{r_d}{r}\right) + \frac{\pi}{2} \right], & r \geq r_d \\ 2\text{sign}_+(\gamma) \arctan\left(\frac{r}{r_d}\right), & r_t \leq r < r_d \\ 0, & 0 < r < r_t \end{cases} \quad (5)$$

其中 ψ_d 是期望航向角, $\langle \rangle$ 表示转换到 $[-\pi, \pi)$ 后的角, r_d 为无人机与目标之间期望的水平距离, γ 为是无人机的航向沿逆时针到无人机与目标之间连线的

夹角: $\gamma = \langle \theta + \pi - \psi \rangle \in [-\pi, \pi)$, 由 ϕ 的定义可知 $\phi \in [-\pi, \pi)$, $\psi_d \in [-\pi, \pi)$, $\text{sign}_+(\cdot)$ 与符号函数 $\text{sign}(\cdot)$ 的区别是 $\text{sign}_+(0) = 1$ 。

从式 (4) (5) 可以看出无人机的期望航向角不仅跟无人机离目标的距离有关, 还跟无人机的初始航向角有关。当 $r \rightarrow 0$ 时 $\phi \rightarrow 0$, 当 $r \rightarrow \infty$ 时 $\phi \rightarrow \pm\pi$, 当 $r = r_d$ 时 $\phi \rightarrow \pm\pi/2$ 。因此, 当 $r \rightarrow 0$ 时, 无人机的期望航向角接近从原点出发沿半径的方向。当 $r \rightarrow \infty$ 时期望航向为指向原点。当 $r = r_d$ 时, 期望航向与期望圆形轨迹切线方向一致。

式 (4) (5) 所示的引导律产生期望的航向角。为了使无人机快速跟踪期望航向角, 论文设计的转向率控制律如下:

$$u = \begin{cases} -\text{sign}(\psi_e) \omega_{\max}, & |\psi_e| \leq \pi \\ \text{sign}(\psi_e) \omega_{\max}, & |\psi_e| > \pi \end{cases} \quad (6)$$

其中, 航向误差 $\psi_e = \psi - \psi_d$, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

2.3 问题描述

定义1: 威胁区域: 以被跟踪目标为圆心, 以 r_t 为半径的圆盘区域。

假设无人机初始位置在威胁区域之外, 无人机能否避开威胁区域取决于无人机的初始状态。设 r_m 是无人机的最小转弯半径, $r_m = v_0 / \omega_{\max}$, 论文中假设 $r_m < r_t < r_d$ 。

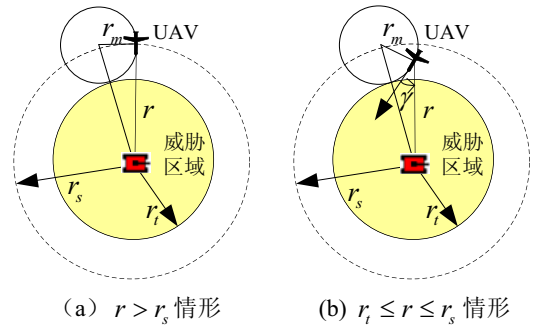


图 2: 无人机能够避免暴露的临界情况

由图2可以看出, 存在一个最短距离 r_s , 满足当 $r > r_s$ 时, 无论航向角是多少无人机总能避免暴露。如果 $r_t \leq r \leq r_s$, 无人机能否避免暴露取决于无人机的初始航向角。

首先确定 r_s , 如图2 (a) 所示, 考虑一个固定位置, 如果无人机的航向指向目标时无人机能够避免暴露, 则指向其他航向时必然也能避免暴露。因此, 由图2 (a) 知:

$$r_s^2 + r_m^2 = (r_m + r_t)^2$$

即:

$$r_s = (r_t^2 + 2r_m r_t)^{1/2}$$

当 $r \leq r_s$ 时, 需要考虑无人机的初始航向角。从图2 (b) 中可以看出, 对于 $r_i \leq r \leq r_s$, 如果无人机的最小转弯轨迹与威胁区域相切, 无人机可以避免暴露。即 $r_i \leq r \leq r_s$ 且 $|\gamma| \geq \gamma_{ig}$ 时, 无人机可以避免暴露。

其中 $\gamma_{ig} = \arccos\left(\frac{r_m^2 + r^2 - (r_m + r_i)^2}{2r_m r}\right) - \frac{\pi}{2}$ 。

定义2: 如果无人机的状态 (r, γ) 满足: $(r, \gamma) \in \{(r, \gamma) | r > r_s\} \cup \{(r, \gamma) | r_i \leq r \leq r_s, |\gamma| \geq \gamma_{ig}\}$, 称此时无人机状态为安全状态 (S), 否则为暴露状态 (E)。

下面给出问题的形式化描述:

问题1: 如果无人机的初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in S$, 如何使无人机的飞行轨迹趋向于期望的圆形轨迹并且保证无人机避免暴露。

问题2: 如果无人机的初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in E$, 如何最小化暴露时间并且使无人机趋向于期望圆形轨迹。

3 非合作目标跟踪

3.1 避免暴露

当 $(r_0, \gamma_0) \in S$ 时, 引导律和控制律可以控制无人机避免暴露, 且航向趋向于期望的航向角。下面将给出具体分析。

为叙述方便, 定义 C_1 、 C_2 和 C_3 :

$$C_1 = \{(r, \gamma) | r > r_s\};$$

$$C_2 = \{(r, \gamma) | r_i \leq r \leq r_s, |\gamma| \geq \gamma_{ig}\};$$

$$C_3 = \{(r, \gamma) | r_i \leq r \leq r_s, |\gamma| < \gamma_{ig}\};$$

则 $S = C_1 \cup C_2$, $E = C_3$ 。

如果 $(r_0, \gamma_0) \in C_1$, 有 $r_0 > r_s > r_i$, 下一时刻有两种可能情形: $(r(t), \gamma(t)) \in C_1$ 或 $(r(t), \gamma(t)) \in C_2$, 两种情况无人机都不会暴露。

如果 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$, 有 $r_i < r_0 < r_s$, 下一时刻有三种可能情形: $(r(t), \gamma(t)) \in C_1$ 、 $(r(t), \gamma(t)) \in C_2$ 或 $(r(t), \gamma(t)) \in C_3$ 。前两种情形无人机不会暴露, 第三种情况暴露不可避免。因此, 接下来将给出: 在提出的引导律和控制律的控制下, 第三种情形不会出现。

当 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$ 时, 只须考虑 $|\gamma(t)| \leq \pi/2$ 的情况。此时, γ_{ig} 满足 $0 \leq \gamma_{ig} \leq \pi/2$ 并且关于时间连续, $\gamma(t) = \langle \theta + \pi - \psi \rangle$ 关于时间连续。初始状态为 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$ 时, 必有 $|\gamma_0| \geq \gamma_{ig}(0)$ 。 $\gamma(t) = \gamma_{ig}(t)$ 时, 可以得到:

$$\frac{d \sin(|\gamma(t)|)}{dt} = \text{sign}_+(\gamma(t))(u - \dot{\theta}) \cos(\psi - \theta)$$

$$\frac{d \sin(\gamma_{ig}(t))}{dt} = \begin{cases} (-\omega_{\max} - \dot{\theta}) \cos(\psi - \theta), & \gamma(\dot{\theta}) \geq 0 \\ (-\omega_{\max} + \dot{\theta}) \cos(\psi - \theta), & \gamma(\dot{\theta}) < 0 \end{cases}$$

当 $\gamma(t) \geq 0$ 且 $|\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t)$ 时, 可以得到 $\psi > \psi_d$ 。证明如下:

首先, 如果 $r < r_d$, 则有 $\pi - \phi \geq \pi/2$, 又因为 $\gamma \leq \pi/2$ 、 $r_d > r_i$, 所以, 当 $r_d \geq r_s$ 时可以直接得到 $\psi - \psi_d = \pi - \gamma - \phi > 0$; 当 $r_d < r_s$ 时, 可以分析 $\sin(\pi - \phi) - \sin(\gamma)$ 在 $r \in (r_d, r_s]$ 时的符号。

$$\begin{aligned} & \sin(\pi - \phi) - \sin(\gamma) \\ &= \frac{2rr_d}{r^2 + r_d^2} + \frac{r_m^2 + r^2 - (r_m + r_i)^2}{2r_m r} = \frac{4r^2 r_m r_d}{r^2 + r_d^2} \\ &+ \frac{r^4 - r^2 r_i^2 - 2r^2 r_i r_m + r^2 r_d^2 - r_i^2 r_d^2 - 2r_d^2 r_i r_m}{2r_m r(r^2 + r_d^2)} \end{aligned}$$

上式分母大于0, 分子 $N(r)$ 对 r 求导大于0。因此, $N(r)$ 在 $r = r_d$ 处取最小值:

$$\begin{aligned} N(r) &\geq 4r_m r_d^3 + 2r_d^4 - 2r_d^2 r_i^2 - 4r_d^2 r_i r_m \\ &= 2r_d^2 (r_d - r_i)(r_d + r_i + 2r_m) > 0 \end{aligned}$$

因为 $\pi - \phi \in (0, \pi/2)$, $\gamma \in (0, \pi/2)$, 所以 $\psi - \psi_d = \pi - \gamma - \phi > 0$ 。

从而证明了: 当 $\gamma(t) \geq 0$ 且 $|\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t)$ 时, $\psi > \psi_d$ 。由对称性可得到: 当 $\gamma(t) < 0$ 且 $|\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t)$ 时, $\psi < \psi_d$ 。

控制器(6)中的 $|\psi_e| > \pi$ 的部分是为了处理 ψ 从 $\pm\pi$ 突变到 $\mp\pi$ 时出现 $|\psi_e| > \pi$ 时的瞬时处理方法, 因此 $\psi_e \in [-\pi, \pi)$ 时可以得到:

$$\gamma(t) \geq 0 \text{ 且 } |\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t) \text{ 时, } u = -\omega_{\max}。$$

$$\gamma(t) < 0 \text{ 且 } |\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t) \text{ 时, } u = \omega_{\max}。$$

因此, 当 $|\gamma(t)| = \gamma_{ig}(t)$ 时有 $d \sin(|\gamma(t)|) / dt = d \sin(\gamma_{ig}(t)) / dt$, 由于 $|\gamma_0| \geq \gamma_{ig}(0)$ 及 $\gamma(t)$ 和 $\gamma_{ig}(t)$ 的连续性可以得到 $|\gamma(t)| \geq \gamma_{ig}(t)$ 。由无人机的极坐标模型(3)可知, $r(t)$ 连续, 当 $r = r_i$ 时, $\gamma_{ig}(t) = \pi/2$, 由 $|\gamma(t)| \geq \pi/2$, 知 $r(t) \geq r_i$ 。

综上所述: $(r_0, \gamma_0) \in C_2$ 时, 在引导律(4)(5)和控制器(6)的作用下, 有 $(r(t), \gamma(t)) \in C_1 \cup C_2$, 即无人机可以避免暴露。

下面分析提出的引导律可以引导无人机趋于引导律产生的期望圆形轨迹。首先分析 $\gamma > 0$ 的情况:

当 $r > r_d$ 时, 引导律(4)(5)可知 $\psi_d > \theta + \pi/2$, 由无人机的极坐标模型(3), 可以得到此时 \dot{r} 小于0。

因此, r 随时间递减。当 $\gamma > 0$ 且 $r > r_d$ 时, r 连续, $r = r_d$ 时, $\dot{r} = 0$, r 达到最小, 所以 $r > r_d$ 时, 引导律 (4) (5) 必然能引导无人机趋于半径为 r_d 的期望圆形轨迹。

当 $r < r_d$ 时, 引导律 (4) 可知 $\psi_d < \theta + \pi/2$, 由无人机的极坐标模型 (3), 可以得到此时 \dot{r} 大于 0。因此, r 随时间递增。当 $\gamma > 0$ 且 $r < r_d$ 时, r 连续, $r = r_d$ 时, $\dot{r} = 0$, r 达到最大, 所以 $r < r_d$ 时, 引导律 (4) (5) 必然能引导无人机趋于半径为 r_d 的期望圆形轨迹。

当 $\gamma < 0$ 时, 同理可得到上述结论, 当 $\gamma = 0$ 时, 从图1可以看出, 无人机的航向指向被跟踪目标, 此时 r 必定随时间递减。

因此, 提出的引导律可以引导无人机趋于期望圆形轨迹。

3.2 最小化暴露时间

$(r_0, \gamma_0) \in C_3$ 时需要最小化暴露时间。该问题可以归结为一个最优化控制问题。

设 $p(t) = (x(t), y(t), \psi(t))^T$ 表示无人机的状态, 设无人机的初始位置在威胁区域的边缘圆上, $|\gamma_0| < \pi/2$; 设 T 是无人机脱离威胁区域的时刻, 则:

$$Q(T) = x(T)^2 + y(T)^2 - r_i^2 = 0$$

最优化问题描述如下:

$$\min_{u(t)} J = \int_0^T 1 dt$$

考虑无人机模型(1)的输入约束: $|u| \leq \omega_{\max}$

状态约束:

$$x(0)^2 + y(0)^2 - r_i^2 = 0$$

$$x(t)^2 + y(t)^2 - r_i^2 \leq 0$$

$$Q(T) = x(T)^2 + y(T)^2 - r_i^2 = 0$$

对此问题有哈密尔顿函数:

$$H = 1 + \lambda_1 v_0 \cos \psi(t) + \lambda_2 v_0 \sin \psi(t) + \lambda_3 u$$

根据庞特里亚金最小值原理和文献[10]中的方法可以得在一个很小的时间区间 (s, T) 中有:

$$\lambda_3(t) = \begin{cases} \frac{1}{\omega_{\max}} \left(\frac{\cos(\theta(T) - \psi(t))}{\cos(\theta(T) - \psi(T))} - 1 \right), u = \omega_{\max} \\ \frac{-1}{\omega_{\max}} \left(\frac{\cos(\theta(T) - \psi(t))}{\cos(\theta(T) - \psi(T))} - 1 \right), u = -\omega_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

分析图 (3) 可知无人机脱离威胁区域的瞬间满足: $0 \leq |\theta(T) - \psi(T)| < \pi/2$, 下面首先考虑 $0 < \theta(T) - \psi(T) < \pi/2$ 。如果时间区间 (s, T) 内 $u = -\omega_{\max}$, 则 $0 < \theta(T) - \psi(t) < \theta(T) - \psi(T)$, 此

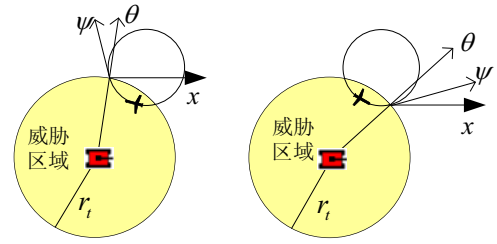


图 3: 无人机脱离威胁区域的情况

时式 (7) 中 $\lambda_3 < 0$; 由最优控制理论, $u = -\omega_{\max}$ 时, 有 $\lambda_3 > 0$; 得出矛盾。因此 $0 < \theta(T) - \psi(T) < \pi/2$ 时, 时间区间 (s, T) 内 $u = \omega_{\max}$ 。

$u = \omega_{\max}$ 时, 可知 $\psi(t)$ 随时间递增。在 $\psi(t)$ 增大到 $\theta(T) - \psi(t) = -(\theta(T) - \psi(T))$ 之前总满足: $\frac{\cos(\theta(T) - \psi(t))}{\cos(\theta(T) - \psi(T))} < 1$, 若 $\psi(t)$ 随时间增大到 $\theta(T) - \psi(t) \leq -\theta(T) - \psi(T)$, 由 $0 < \theta(T) - \psi(T) < \pi/2$, 可知此时 $\psi(T) - \psi(t) \geq \pi$ 。从图3可知, 对于任意初始角 $\psi(0) \in [-\pi, \pi)$, 总可以找到一个最小转弯路径满足 $\psi(T) - \psi(t) < \pi$, 所以, 最优路径下 $\psi(T) - \psi(t) \geq \pi$ 不可能发生。这个结论说明 $0 < \theta(T) - \psi(T) < \pi/2$ 时, 总是有 $u = \omega_{\max}$ 。

同理, 当 $-\pi/2 < \theta(T) - \psi(T) < 0$ 时, 可得到: $-\pi/2 < \theta(T) - \psi(T) < 0$ 时, 总是有 $u = -\omega_{\max}$ 。因为 $\theta(T) - \psi(T) = 0$ 时, $\lambda_3(t)$ 符号不变。因此, 最小的暴露路径是以最小转弯半径为半径的圆形路径。

因此, 论文提出的引导律和控制律可以引导无人机在 $(r_0, \gamma_0) \in C_3$ 时最小化暴露时间。

4 仿真结果

为了验证论文提出的引导律与控制律的有效性, 进行了仿真实验, 仿真包括两种情形: 一种是无人机初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$; 另一种是无人机初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in C_3$ 。仿真参数如表1所示。

表1. 仿真参数

参数	取值
v_0	20 m/s
ω_{\max}	0.2 rad/s
r_d	300 m
r_i	200 m
仿真步长 Δt	0.1 s

由于采用离散模型进行仿真, 仿真过程中当 $|\psi_e| < \omega_{\max}$ 时, $|u| = \omega_{\max}$ 过大会导致输入的转向速率产生振荡, 现实中则表现为无人机的副翼舵面高频跳动。为了防止这种振荡的出现, 仿真时将采用式

(8) 对控制器进行修改, 这种修改并不会改变论文中证明的一些结论。

$$u = -\frac{1}{\Delta t} \psi_e, |\psi_e| \leq \omega_{\max} \quad (8)$$

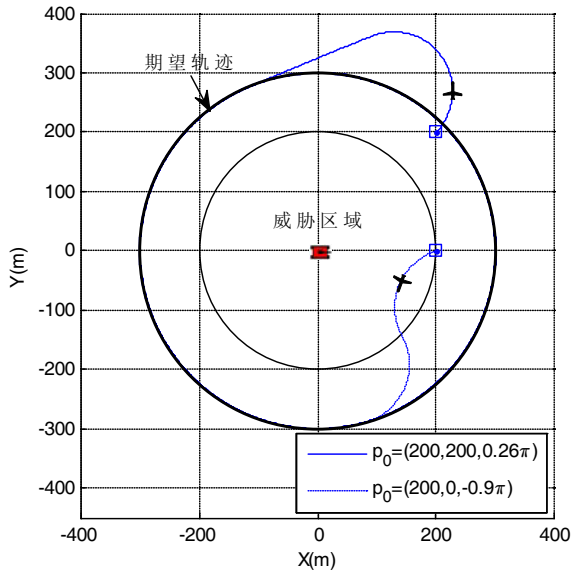


图 4: 无人机跟踪轨迹

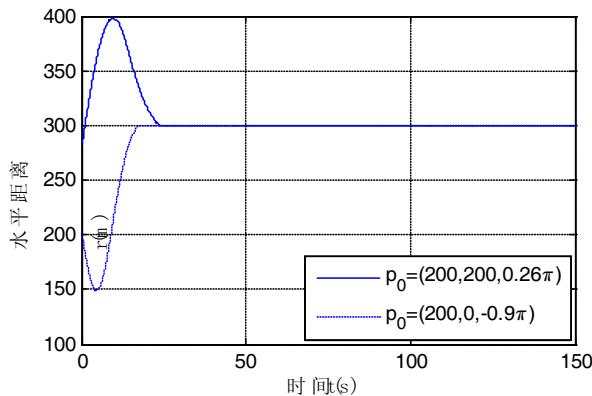


图 5: 无人机与目标之间水平距离曲线

仿真情形1: 初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$ 且目标静止。

当无人机的初始状态 $p(0) = (200, 200, 0.26\pi)$ 时, 满足 $(r_0, \gamma_0) \in C_2$, 此时, $\psi_0 = 0.26\pi$, $\theta_0 = 0.25\pi$, $\gamma_0 = 0.99\pi$, 根据论文提出的引导律和控制律, 无人机将可以避免暴露, 向左转弯趋于期望轨迹逆时针跟踪目标。由图4可以看出无人机无论处于 C_1 和 C_2 都能避免暴露并进入期望的圆形轨迹。图5给出跟踪过程中无人机与目标之间水平距离的变化曲线。

仿真情形2: 初始状态 $(r_0, \gamma_0) \in C_3$ 且目标静止。

当无人机的初始状态 $p(0) = (200, 0, -0.9\pi)$ 时, 满足 $(r_0, \gamma_0) \in C_3$, 图4给出了无人机对目标的跟踪轨迹, 当 $p(0) = (200, 0, -0.9\pi)$ 时, $\psi_0 = -0.9\pi$, $\theta_0 = 0$, $\gamma_0 = -0.1\pi$, 根据引导律和控制律无人机

将向左转弯, 沿着最小转弯路径快速脱离威胁区域, 脱离威胁区域以后趋向于期望轨迹顺时针跟踪目标。由图4可以看出无人机沿着以 r_m 为半径的圆形轨迹脱离威胁区域后趋向于期望的轨迹。图5给出跟踪过程中无人机与目标之间水平距离的变化曲线。

5 结论

论文针对无人机地面非合作目标跟踪的引导和控制算法进行研究。以目标跟踪性能和无人机的安全为指标设计了一种分段式引导律和一种转向速率控制律。根据无人机的初始位置, 分别研究了无人机避免暴露问题和脱离暴露区问题; 并证明了所提出方法能够避免暴露或最小化暴露时间。仿真实验结果表明提出的引导律和控制方法是有效的。另外, 论文进一步要研究的工作是如何将提出的方法应用于地面移动目标。

参考文献

- [1] 王林, 彭辉, 朱华勇, 沈林成, 应用无人机跟踪地面目标—最新研究进展. 系统仿真学报, 2010, 22(s1): 172–177.
- [2] Lawrence, D., Frew, E., Pisano, W. Lyapunov Vector Fields for Autonomous Unmanned Aircraft Flight Control. AIAA J. Guid. Control Dyn, 2008, 31(5): 1220–1229.
- [3] Frew, E., Lawrence, D. Cooperative Standoff Tracking of Moving Targets Using Lyapunov Guidance Vector Fields. J. Guid. Control. Dyn. 2008, 31(2): 290–306.
- [4] Lee, S.O., Cho, Y.J., Hwang, B.M., You, B.J., Oh, S.R.A Stable Target-tracking Control for Unicycle Mobile Robots. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000: 1822–1827.
- [5] Rafi, F., Khan, S., Shafiq, K., Shah, M. Autonomous Target Following by Unmanned Aerial Vehicles. Proceedings of SPIE, 2006, 6230: 1–8.
- [6] Chen, H., KC Chang, Agate, C.S. A Dynamic Path Planning Algorithm For UAV Tracking. SPIE, Bellingham, 2009.
- [7] Zhu, S.Q., Wang, D.W. Adversarial Ground Target Tracking Using UAVs with Input Constraints. J Intell Robot Syst, 2011.
- [8] Pfeiffer, B., Batta, R., Klamroth, K., Nagi, R.: Path Planning for UAVs in The Presence of Threat Zones using probabilistic modeling. Available at <http://www.am.uni-erlangen.de/pfeiffer/documents/prob120705.pdf>
- [9] Dubins, L.E. On Curves of Minimal Length With a Constraints on Average Curvature, and With Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. Am. J. Math. 1957, 79: 497–516.
- [10] Ding, X.C., Rahmani, A.R., Egerstedt, M. Multi-UAV Convoy Protection: An Optimal Approach to Path Planning and Coordination. IEEE Trans. on Robotics 2010, 26(2):256–268.