

两无人机远视角和 近视角协同跟踪地面目标的航线仿真^①

牟丽莎¹, 彭莉娟²

1. 四川工程职业技术学院 电气信息工程系, 四川 德阳 618000; 2. 西南科技大学 计算机学院, 四川 绵阳 621000

摘要: 目前大多数无人机(UAV)跟踪地面目标都利用单个 UAV 进行跟踪, 现研究采用两个 UAV 对地面目标进行跟踪. 每一个 UAV 都有各自的指引规则, 近距离跟踪 UAV 的指引规则要求持续在目标上方飞行, 有最佳的飞行耐久性. 远距离跟踪 UAV 的指引规则要求对目标有固定的距离和高度, 能够反复监视, 保证对地面目标最大的可视性. 由于设定两个 UAV 处于较大间距的不同高度, 两 UAV 发生碰撞的可能性非常小. 仿真实验利用有明显标志的汽车作为跟踪目标, 背景环境较为单一, 两 UAV 的航线表明, 在有风和无风、目标静止和运动的情况下, 其航线均有一定规律可循, 从跟踪效果看, 两 UAV 取得了明显的协同效果.

关键词: 无人机; 远距离跟踪; 近距离跟踪; 指引规则; 碰撞

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)06-0105-07

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的地面目标追踪^[1]是一个非常具有吸引力和实际意义的应用开发项目. 例如, 城市巷战、海上搜救、森林防火和目标定位等^[2-3]. 在无人机跟踪领域, 跟踪算法和指引规则非常重要, 获取的图像与无人机的高度、姿态、位置、传感器角度有密切关联, 而跟踪算法是在获取图像的基础上进行, 因此, 这两个方面直接影响无人机地面跟踪系统^[4].

已经有很多文献对无人机跟踪进行了研究, 例如, 文献[5]提出了基于无人机的混合距离目标跟踪, 使用车载计算机控制一个无人机进行地面目标跟踪, 将跟踪约束和系统可视界限作为误差估计函数, 获取目标速度, 并分析闭环自适应系统中的图像帧, 是比较经典的地表站产生指令的 UAV 跟踪.

文献[6]提出一种基于视觉的目标状态估计方法, 利用某些点的运动来计算成像变化, 估计目标速度, 减少了 UAV 的传感器噪声影响, 相邻帧用于图像平面运动速度估计, 再利用 UAV 和平台速度用坐标变换估计世界坐标系, 然而, 没有考虑速度和坐标系误差.

文献[7]提出一种 UAV 低速目标跟踪算法, 算法引入静态生产航路点, 在固定时刻对航路点进行动态修正, 维持跟踪路径与目标路径同步, 若目标逃离 UAV 的跟踪范围, 则报警维持继续跟踪, 这是一种单个 UAV 跟踪算法.

文献[8]利用交互多模型(Interacting Multi Models, IMM)进行次优估计, 能够处理系统参数和结构变化, 将复杂问题简单化, 无需进行严格的目标运动模型建模, 近年来得到广泛的研究和发展^[9-11].

许多文献仅研究单 UAV 的地面目标跟踪问题, 单 UAV 跟踪总体的适应性比较差, 对 UAV 的软件和硬件要求较高, 跟踪成功概率略低于多架 UAV, 这也是为什么多 UAV 的研究越来越热的原因. 本文采用两架 UAV 进行目标追踪. 由机载摄像机来获得与两架 UAV 相关的已知位置和视线角度, 并将两者组合计算出距离. 其中, 两架 UAV 以相同飞行速度, 但不同高度进行航拍跟踪, 本文主要讨论它们的动力学情

① 收稿日期: 2016-06-03

基金项目: 国家“863”计划项目(2015AA016405); 四川省教育厅科研项目(14CZ0012).

作者简介: 牟丽莎(1980-), 女, 重庆市人, 讲师, 硕士, 主要从事图像处理、模式识别等研究.

形和指引规则,其中指引算法控制一架 UAV 去徘徊在一个地面目标上方,称为近距离特写跟踪 UAV;控制另一架 UAV 以一个预定好的距离来跟踪目标,称为远距离跟踪 UAV,同时本文还考虑了风效应。

1 模型及设备

1.1 数学模型

一般来说, UAV 的高度设为固定值,飞行速度也设为定值, UAV 的跟踪问题可以看成是一个二维跟踪问题^[12]。其中 UAV 的控制输入是由副翼的形变量来提供的侧向加速度和飞机转弯时导致航向角改变引起的侧向加速度。本文的每个 UAV 均被建模成一个移动在水平面上的质点,且满足如下数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos(\psi) + W_x \\ \dot{y} = V \sin(\psi) + W_y \\ \dot{\psi} = \frac{a_n}{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $[x, y, \psi]^T$ 是 UAV 模型的状态矢量,这些状态变量代表了南北参考坐标系和航向角所定义的笛卡尔坐标位置。角度 ψ 以逆时针为正方向,代表了 x (北)轴和纵轴之间的夹角;反过来,这也符合 UAV 飞行速度矢量 $\mathbf{V}$,因为没有侧滑角度需要考虑。字母 V 通常用来表示速度矢量 $\mathbf{V}$ 的数值。 a_n 是模型单独的输入信号,代表径向加速度的数值。因为 $\dot{V} = 0$,所以不需要考虑气流的纵向加速度。其中径向加速度的效果是在保持飞行速度不发生变化的同时,转弯时的速率发生改变。 W_x 和 W_y 是风的速度分量。所有变量如图 1 所示,为了区分起见,本文约定下标 L 代表第一个 UAV 的变量,下标 F 代表第二个 UAV 变量,而 T 代表目标的变量,同时设定两个 UAV 的飞行速度相同,风速也是已知的,这些设定在整个动态模型中非常重要。

图 2 所示为这两个 UAV 之间的几何结构,可以导出式(2)的数学模型:

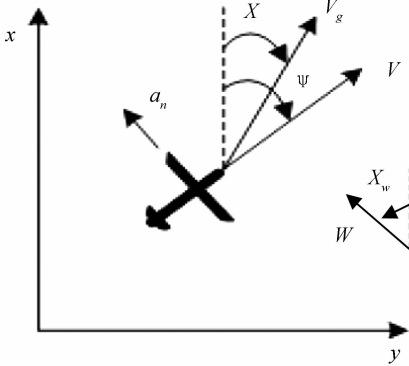


图 1 控制输入和空气,地面以及风速

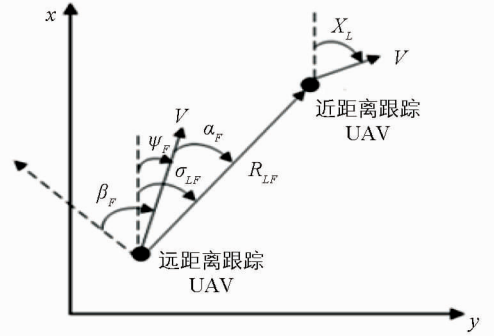


图 2 几何学构架

$$\begin{cases} \dot{R}_{LF} = V[\cos(\sigma_{LF} - \chi_L) - \cos(\sigma_{LF} - \chi_F)] \\ \dot{\sigma}_{LF} = \frac{V}{R_{LF}}[\sin(\sigma_{LF} - \chi_F) - \sin(\sigma_{LF} - \chi_L)] \end{cases} \quad (2)$$

式中,变量 $\sigma_{LF} = \arctan\left(\frac{y_L - y_F}{x_L - x_F}\right)$ 是近距离特写跟踪 UAV 和远距离跟踪 UAV 之间的视线角。而两架 UAV 之间的距离用 $R_{LF} = \sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2}$ 表示。现在,在公式(2)中将变量 $\beta_F = \frac{\pi}{2} - \alpha_F$ (同样的 $\alpha_F = \sigma_{LF} - \chi_F$) 替换得到系统变为

$$\begin{cases} \dot{R}_{LF} = -V[\sin(\beta_F) - \sin(\chi_L - (\chi_F - \beta))] \\ \dot{\sigma}_{LF} = \frac{V}{R_{LF}}[\cos(\beta_F) - \cos(\chi_F - (\chi_L + \beta))] \end{cases} \quad (3)$$

这个模型可以简单地修改来介绍输入变量 $\frac{a_{nF}}{V}$ 。由于 $\dot{\beta}_F = -\dot{\alpha}_F = \dot{\chi}_F - \dot{\sigma}_{LF}$,式(3)可以简化为

$$\begin{cases} \dot{R}_{LF} = -V[\sin(\beta_F) - \sin(\chi_L - (\chi_F - \beta_F))] \\ \dot{\beta}_F = \frac{a_{nF}}{V} - \frac{V}{R_{LF}}[\cos(\beta_F) - \cos(\chi_F - (\chi_L + \beta_F))] \end{cases} \quad (4)$$

1.2 无人机设备

本文选用两架“开拓者”无人机, 为固定翼无人机, 后推式双尾撑结构, 如图 3 所示, “开拓者”无人机使用 GPS/INS 组合导航, 底层飞行控制由自动驾驶仪控制. 图 4 是机载转台, 支持 RS-232 作为数据链路的接口, 无人机与地面双向传输数据, 无人机重要参数见表 1.



图 3 “开拓者”无人机



图 4 两自由度机载转台

表 1 “开拓者”无人机平台参数

指标	参数	指标	参数
尺寸/m	长 2.2, 翼展 2.9	续航时间/h	2
最大起飞质量/kg	15	最大载荷/kg	5
遥控半径/km	3.5	最大速度/(km · h ⁻¹)	110
通信半径/km	30		

2 指引规则

指引规则是 UAV 跟踪的核心之一. 文献[13 – 14] 给出了一个对于目标跟踪有用的传感器描述, 要求总结如下:

- 1) UAV 需要持续地追踪目标. 为达到这一目标, 他们的飞行速度必须远小于目标的地面速度.
- 2) 返回的策略必须服从飞机的机械特性决定的转角速度来决定, 同时这些策略的径向加速度必须有限, 在执行所有的追踪策略的过程中, UAV 的速度必须维持不变.
- 3) 近距离特写跟踪 UAV 的指引规则如下:

$$\frac{a_{nL}}{V} = K_1(R_{LF}, \dot{R}_{LF})\arctan(K_2(\sigma_L - \chi_L)) \quad (5)$$

- 式中, $K_1(): \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$;
- K_2 被认为是在区间[0, 1] 中的正值;
- σ_L 是目标与近距离特写追捕者的视线角度;
- R_{LF} 和 $\dot{R}_{LF}$ 是近距离特写跟踪 UAV 和目标之间的距离及距离的时间变化率.
- 4) 关于指引规则的所有内容和动机都可以在文献[15] 中找到, 远距离跟踪 UAV 的指引规则如下:

$$\frac{a_{nF}}{V} = K_{R_0}(R_{LF})\left(\frac{V\cos(\beta_F)}{R_d} - k_1\beta_F\right) - K_{R_{LF}}(R_{LF}, \dot{\sigma}_{LF})\operatorname{sgn}_2(\dot{\sigma}_{LF})e^{\frac{-(\dot{\sigma}_{LF})^2}{\epsilon}} \quad (6)$$

- 其中 $\beta = \frac{\pi}{2} - \sigma_F + \chi_F$;
- R_{LF} 是近距离特写跟踪 UAV 和远距离跟踪 UAV 之间的距离;
- σ_F 是目标与远距离跟踪 UAV 的视线角度;

$\dot{\sigma}_{LF}$ 是近距离特写跟踪 UAV 和远距离跟踪 UAV 之间的视线角度的时间变化率;

R_d 代表远距离跟踪 UAV 和目标之间想要的距离;

$K_{R_0}(): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$;

$K_{R_{LF}}(): \mathbb{R}^+, \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$;

$k_1, \epsilon > 0$.

另外 $\text{sgn}_2: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$\text{sgn}_2(\dot{\sigma}_{LF}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \dot{\sigma}_{LF} \geq 0 \\ -1, & \text{if } \dot{\sigma}_{LF} < 0 \end{cases}$$

(7)

式(6)保证了无论目标是静止还是运动,远距离跟踪 UAV 会盘旋在目标上方,围绕目标的圆形轨迹飞行,设置增益函数 $K_{R_0}(R_{LF})$ 如表 2. 其中 R_0 代表近距离特写跟踪 UAV 与远距离跟踪 UAV 的最小距离.

表 2 目标追踪指引法则的增益性选择

	$R_{LF} < R_0$	$R_{LF} \geq R_0$
K_{R_0}	0	1

为了简化稳定性测试,进行目标跟踪指引规则测试,式(6)保证了围绕着目标位置的一个圆形轨迹:

$$\frac{a_{N_F}}{V} = \frac{V \cos(\beta_F)}{R_d} - k_1 \beta_F$$

(8)

文献[16]已经证明其稳定性,所不同的是式(8)与增益函数 $K_{R_0}(R_{LF})$ 相乘来保证当 $R_{LF} < R_0$ 时,式(6)中的结果为 0.

值得一提的是本文中的两个跟踪 UAV 具有不同的飞行高度,高度相隔 50 m,不存在发生碰撞的可能性.

3 跟踪算法

跟踪算法是利用采集到的视频进行实时跟踪,其中实时和准确是 UAV 跟踪的重要特点,本文采用颜色直方图特征快速匹配跟踪,文献[17]是该类算法中效果最好的一个,即纠正的背景加权直方图跟踪 CBWH. 其实直方图特征匹配就是概率密度估计,这里概率密度函数采用 Epanechnikov 核,即

$$k(x) = \begin{cases} c(1 - \|x\|^2), & \|x\| \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(9)

目标局部背景模型表示为 $\{\hat{o}_u\}_{u=1, \dots, m} (\sum_{i=1}^m \hat{o}_u = 1)$, 通过环绕区域计算获得,本文在跟踪模块中设置局部背景区域是目标大小的 3 倍,利用背景特征分布计算的权重系数为

$$\{v_u = \min(\hat{o}^* / \hat{o}_u, 1)\}_{u=1, \dots, m}$$

(10)

式中, $\hat{o}^*$ 是 $\{\hat{o}_u\}_{u=1, \dots, m}$ 中的最小非零值,即背景特征 u 的值越高,权重系数越低. 直方图特征表示的目标模型如下^[17]:

$$q_u(y) = C_1 \sum_{i=1}^{n_k} k(\| \frac{y - x_i}{h_h} \|^2) \delta[b(x_i) - u]$$

(11)

其中 $k(x)$ 为核函数的轮廓函数,为了消弱目标区域周围背景像素对目标特征的影响,利用 $k(x)$ 对中心像素赋予高的权重,远离中心的赋予较小的值, $\delta(x)$ 是 delta 函数, $\delta[b(x_i - u)]$ 的作用是判断目前前景区域中像素 y 是否属于第 n_k 个 bin, C_1 为归一化系数,候选模型表示为

$$\hat{p}_u(y) = C v_n \sum_{i=1}^{n_k} k(\| \frac{y - x_i}{h} \|^2) \delta[b(x_i - u)]$$

(12)

$\hat{p}_u(y)$ 与 q_u 的 Bhattacharyya 相关系数定义为

$$w'' = \sqrt{\hat{p}'_u(y) / \hat{p}_u(y)}$$

(13)

相关系数的范围在 0, 1 之间, 文献[17] 已经被证明是一种快速有效稳定的算法, 对背景变化具有较好的鲁棒性.

4 仿真结果

本小节给出指引规则的初步结果. 仿真实验中, 近距离特写跟踪 UAV 的初始位置是(260, 260), 而远距离跟踪 UAV 是(-260, -260). UAV 的初始航向角和空速是相同的, 尤其当速度是 25 m/s 的定值时, 一开始均指向北方. 不论目标是静止还是移动, 风的恒定值设置为 5 m/s, 并从东北方向吹来, 表 3 为增益函数值. 跟踪的物体为一辆福特中型车辆, 如图 5 所示, 为了做显著标记, 在车顶盖有白色标志, 跟踪的地表环境与车辆具有较大显著区别, 不使仿真实验复杂化.



图 5 跟踪的车辆

表 3 提出的指引规则所得到的增益值

增益变量	增益值
R_0	100
B_0	$[-1, 1]$
ϵ	0.25

4.1 目标静止时

在第一种情况下, 目标在 origin 是静止的, 没有风效应, 图 6 所示为两 UAV 与目标运动轨迹图. 绿线轨迹是近距离特写跟踪 UAV 的轨迹, 红线是远距离跟踪 UAV 的轨迹在指引规则(6)影响下的位置. 虽然它们有一些重叠的轨迹, 但不同的高度避免了它们相撞的可能性.

图 7 为有风效应情况下的轨迹变化, 从中可以看出, 计算机始终模拟着风效应的影响. 很明显, 轨道略有不同, 但近距离特写跟踪 UAV 与远距离跟踪 UAV 之间的距离保持大概在 60 m 的范围, 这也保证了远距离跟踪 UAV 具有足够的目标可视性. 而近距离 UAV 的轨迹在有风和无风情况下基本一样, 这说明了近距离特写跟踪 UAV 在目标静止的情况下, 能保持在目标上方飞行, 具有一定飞行耐久性.

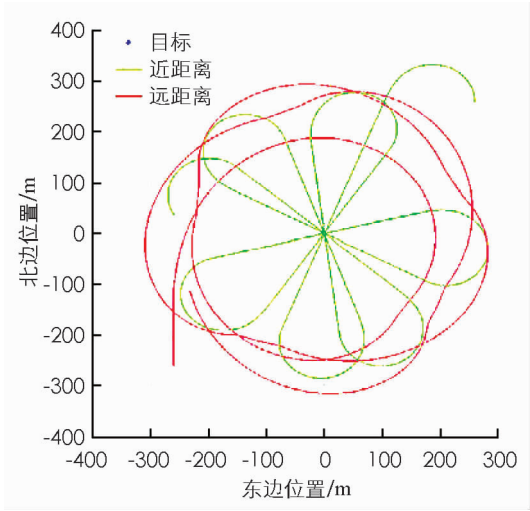


图 6 两 UAV 与目标运动轨迹(无风效应)

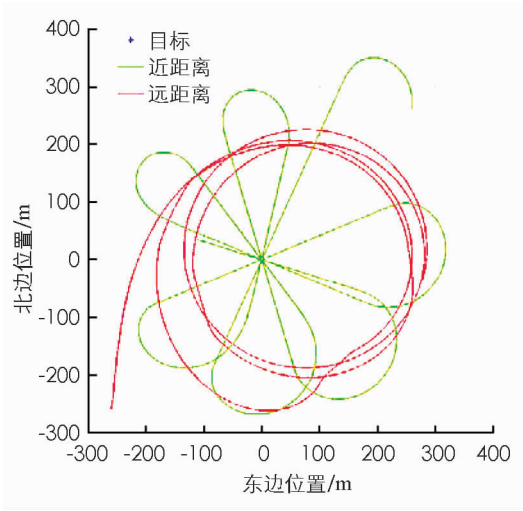


图 7 两 UAV 与目标运动轨迹(有风效应)

4.2 目标移动时

在第二种情况下, 目标从 origin 不仅以一个恒定的速度 7.5 m/s 移动, 而且有一个变化的运动方向. 图 8 所示为无风情况下, 物体运动轨迹和两架 UAV 的运动轨迹. 可以看出两个指引规则的不同特征. 从图 8 可以看出近距离特写跟踪 UAV 的轨迹好几次超过目标, 然而远距离跟踪 UAV 仍然围绕目标保持一个简单的圆形轨迹.

当存在风效应时,从图 9 可以看出,其轨迹与无风效应很相似,虽然也有诸多重叠的轨迹,但对处于不同高度的 UAV 没有任何影响.图 10 为两个 UAV 的摄像机视频识别结果,其中(a)与(b),(c)与(d)为同一时刻远距离跟踪 UAV 与近距离特写跟踪 UAV 的识别结果,结果准确无误,两 UAV 同步性非常好.目标运动和风的因素影响,轨迹在有风和无风有一些偏差,但近距离跟踪 UAV 都能持续在目标上方飞行,这保证了飞行耐久性.远距离跟踪 UAV 的轨迹两种情况相似,这也保证了对地面目标最大的可视性.

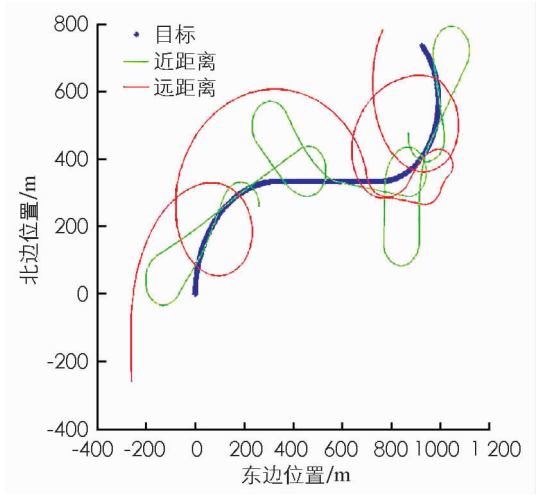


图 8 目标移动时的轨迹(无风效应)

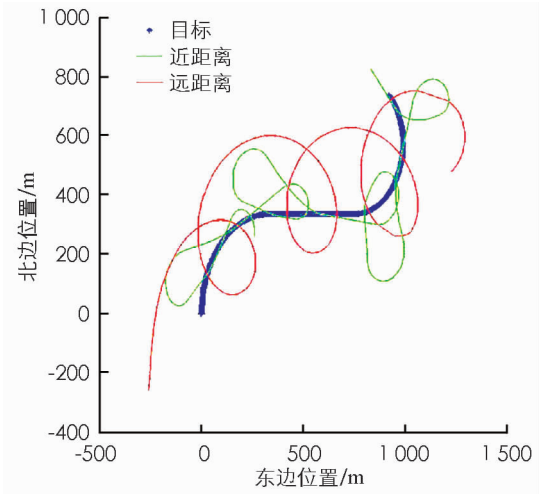


图 9 目标移动时的轨迹(有风效应)

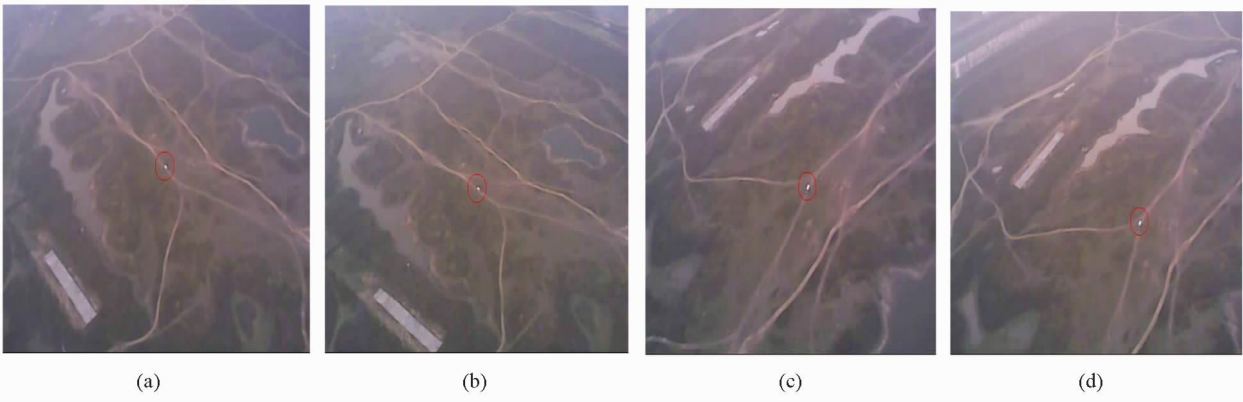


图 10 两个 UAV 的摄像机的图像序列实时识别结果

5 结论与展望

本文提出了两个 UAV 跟踪地面目标的指引规则,软件模拟结果表明了其有效性.由于它们处于不同飞行高度,它们的最小距离为它们所在平面的垂直高度,在有风和无风效应下均有类似的轨迹,且识别目标同步性也非常好.

下一步研究重点将在 4 自由度模拟器上对指引规则进行测试.还将考虑较为复杂情况下的跟踪,本文的环境和跟踪物体都进行了特别选择,下一步将测试更为一般情况下的环境和跟踪物体.

参考文献:

[1] 王凤娟. 基于图像跟踪的无人机定位方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.

[2] 王 林, 彭 辉, 朱华勇, 等. 应用无人机跟踪地面目标——最新研究进展 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(s1): 172—177.

[3] 李德仁, 李 明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505—513.

[4] 王 勋. 无人机自主跟踪地面运动目标方法与试验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.

[5] MA L, CAO C, HOVAKIMYAN N, et al. Adaptive Vision-Based Guidance Law With Guaranteed Performance Bounds [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2010, 33(3): 834—852.

- [6] 王 勋, 孔维玮, 张代兵, 等. 无人机跟踪地面非合作目标的分段引导与控制方法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(9): 733—738.
- [7] 冯慧成, 符小卫. 无人机跟踪低速目标算法设计 [C]// 2009 中国自动化大会暨两化融合高峰会议. 2009.
- [8] YANG C Y, CHEN B S, LIAO F K. Mobile Location Estimation Using Fuzzy-Based IMM and Data Fusion [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(10): 1424—1436.
- [9] HO T J, CHEN Z H. Mobile Location Estimation in Urban Areas Using Fuzzy-Tuned IMM Algorithm [C]// Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2012 International Conference on.
- [10] AL-JEMELI M, HUSSIN A F A. On Location Estimation Methods for Mobile Wireless Sensor Nodes [J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2014, 8(1): 124—130.
- [11] 石晓航, 梁青阳, 张庆杰, 等. DC-IMM 估计方法在多 UAV 协同目标跟踪中的应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 14(2): 169—174.
- [12] 辛哲奎. 基于视觉的小型无人直升机地面目标跟踪技术研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [13] KIM Z W, SENGUPTA R. Target Detection and Position Likelihood Using an Aerial Image Sensor [J]. Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2008, 17(2): 59—64.
- [14] RAHMAN S, RAHMAN S. Probability Distributions of Natural Frequencies of Uncertain Dynamic Systems [J]. Aiaa Journal, 2012, 47(6): 1579—1589.
- [15] REGINA N, ZANZI M. A Novel Solution for Overflight and Surveying of a Collaborative Target with Fixed Wing UAV [C]// Proceedings of Guidance Navigation and Control Conference, 2012.
- [16] DOBROKHODOV V N, KAMINER I I, JONES K D, et al. Vision-Based Tracking and Motion Estimation for Moving Targets Using Unmanned Air Vehicles [J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 2008, 31(4): 907—917.
- [17] NING J, ZHANG L, ZHANG D, et al. Robust Mean-Shift Tracking with Corrected Background-Weighted Histogram [J]. Omer Von, 2012, 17(1): 62—69.

Ground Target Routing Simulation in a Close View and a Distance View of Two UAV

MOU Li-sha¹, PENG Li-juan²

1. Department of Electrical Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang Sichuan 618000, China;

2. School of Computer Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621000, China

Abstract: Single unmanned aerial vehicles (UAV) is usually used track ground targets in most cases. In this paper, two UAV have been used to track ground targets. Each UAV has its own rules of guidelines. The rule of close-track UAV requires sustained fly above the target and the durability must be best. The rule of long-distance-track requires the fixed distance and height between the UAV and the target. And the target can be tracked again and again. The visibility of target on the ground must be maximized. Since the two UAV are set on different height, the distance between the two flat is quite large to avoid the possibility of the collision. A clearly marked car is used as a tracking target in the simulation. And the background environment is quite single. The rule of the routing of the two UAV can be followed under conditions of wind and none-wind, target-moving and target-still. The synergistic effect is obvious from the tracking performance.

Key words: unmanned aerial vehicles; long-distance-track; close-track; rules of guidelines; collision