

# 控制与决策

Control and Decision

## 固定翼无人机密集编队极速穿越策略研究

颜鸿涛, 许勇, 贾涛, 张可, 杜俊杰

引用本文:

颜鸿涛, 许勇, 贾涛, 张可, 杜俊杰. 固定翼无人机密集编队极速穿越策略研究[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 1074–1084.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1675>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于元胞自动机的蜂群无人机故障影响模型

Fault influence model of swarm UAVs based on cellular automata

控制与决策. 2023, 38(1): 103–111 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0910>

#### 一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法

An algorithm of model predictive control for formation control of a multi-UAV system considering multiple constraints

控制与决策. 2023, 38(3): 706–714 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0382>

#### 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>

#### 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>

#### 基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader-follower strategy

控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

# 固定翼无人机密集编队极速穿越策略研究

颜鸿涛, 许勇<sup>†</sup>, 贾涛, 张可, 杜俊杰

(中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对固定翼无人机密集编队穿越门框的任务场景, 提出系统编队穿越方案. 首先, 根据机载相机测量信息, 提出基于视线角的制导策略, 能够快速调整机头指向对准门框; 其次, 为了提高成功穿越的可靠性以及解决视线遮挡问题, 提出基于门框位置解算的协同制导策略; 然后, 针对复赛存在导航干扰情况, 在水平方向上设计基于特征点测量的惯性导航算法, 在垂直方向采用基于微分滤波的气压高度和升降率提取方法, 并且利用视线角穿越门框, 设计基于距离控制的编队控制律; 最后, 设计相应的固定翼无人机系统, 并以 7 机编队的形式参加了 2021 年“无人争锋”极速穿越比赛, 参赛结果验证了所提出极速穿越方法的有效性.

**关键词:** 固定翼无人机; 密集编队; 极速穿越; 飞行试验; 无人争锋

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2021.1675

**引用格式:** 颜鸿涛, 许勇, 贾涛, 等. 固定翼无人机密集编队极速穿越策略研究[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1074-1084.

## Research on fixed-wing UAVs close formation for fast crossing

YAN Hong-tao, XU Yong<sup>†</sup>, JIA Tao, ZHANG Ke, DU Jun-jie

(Aerospace Technology Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the task scene of close formation of fixed wing UAVs crossing through the gates, a systematic formation crossing scheme is proposed. Firstly, according to the measurement information of the airborne camera, a guidance strategy based on the line of sight angle is proposed, which can quickly adjust the nose to aim at the gates. Secondly, in order to improve the reliability of successful crossing and solve the problem of line of sight occlusion, a cooperative guidance strategy based on gate position solution is proposed; Then, in view of the navigation interference in the semi-finals, an inertial navigation system(INS) based on feature point measurement is designed in the horizontal direction. In the vertical direction, the extraction method of air pressure height and vertical velocity based on differential filtering is adopted, and the line of sight angle is used to pass through the gates; A formation control law based on distance control is designed. Finally, the fixed-wing UAV system is designed, and we participated the 2021 Fast Crossing Race of UAV Challenge Competition in a formation of 7 UAVs. The competition results verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** fixed-wing UAVs; close formation; speed crossing; flight test; UAV challenge competition

## 0 引言

近年来, 无人机集群编队与避障技术因其广阔的应用前景得到了快速的发展, 目前大多数的应用研究集中在低速旋翼机的编队控制技术方面, 而对于速度快、动态高的固定翼无人机编队研究较少. 基于传感器设备的智能固定翼无人机在复杂任务场景下, 既要以较快速度自主飞行, 又要进行编队保持和躲避障碍物, 这对无人机的协同控制、航迹规划以及目标识别与跟踪等相关技术的要求非常高, 具有很大的研究价

值.

为了考察无人机集群的自主智能水平, 2021 年空军装备部主办了第二届空军“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛, 挑战赛旨在聚焦无人机智能空战、复杂电磁环境下的集群控制, 共设置 5 个比赛科目, 该研究内容是基于 2021 年“无人争锋”极速穿越比赛科目而开展的. 极速穿越科目的比赛规则为: 参赛队派出至少 4 架自主无人机集群飞行, 依次穿过路线上 2 个门框, 无人机数量越多、编队越密集、用时越

收稿日期: 2021-09-26; 录用日期: 2022-02-25.

基金项目: 科技部科技创新 2030 重大项目(2020AAA0104801); 国家自然科学基金项目(61903364).

责任编辑: 董久祥.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: xuyong\_1105@qq.com.

少得分越高. 飞行区域如图1所示.

飞机在起降区起飞后, 按照规定顺序依次穿过2个门框. 门框为内框7m × 7m、宽度0.8m的红色矩形门框, 安放在高10m的可移动框架上, 门框可左右移动的最大距离为14m. 比赛分为初赛和复赛, 复赛会对卫星导航系统(GNSS)进行干扰. 固定翼无人机要在高速状态下以密集编队形式识别并穿过门框, 并在复赛阶段还会存在导航干扰, 这些对编队控制、高动态情况下的目标识别、GNSS拒止条件下的导航等技术都有很高的挑战.

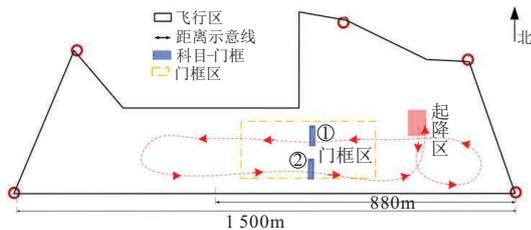


图1 “无人争锋” 比赛场地示意图

编队控制保持与基于视觉的目标导引技术是固定翼无人机密集编队极速穿越任务需要解决的核心技术, 这方面已经有大量的相关研究<sup>[1-2]</sup>. 文献[3-6]针对旋翼机编队导航与视觉制导提供了解决方案, 文献[7-9]研究了固定翼无人机基于长机-僚机的协同控制策略, 这种结构下的队形是建立在以长机为中心的相对坐标系下, 跟随无人机根据长机的位姿信息, 跟随其队形位置. 这种编队结构简单, 易于实现, 目前应用最为广泛, 但此类方法的缺点是长机出现故障将会导致整个编队出现问题. 文献[10]将导弹上用的比例导引法作为目标导引法, 但比例导引需要高精度导引头对视线角速度的求解, 一般低成本无人机上的摄像头无法提取准确的视线角速率信息. 大多数相关研究都是停留在仿真实验阶段, 缺少实际飞行约束问题考虑, 比如在密集编队情况下往往会存在视觉遮挡的实际问题, 需要考虑如何利用编队优势加以解决. 近年来, 针对GNSS拒止环境下的导航问题, 也涌现出大量的相关研究, 基于视觉惯导里程计(VIO)的组合导航技术<sup>[11]</sup>得到了全面的发展, 并且在室内环境下完成了许多实验验证, 已具备较高的定位精度<sup>[12-14]</sup>. 源于固定翼在高空快速飞行时的机身振动以及摄像头视野模糊等因素制约, 基于视觉里程计的组合导航技术在固定翼的成功案例还特别少.

本文以“无人争锋”极速穿越比赛为任务背景, 提出固定翼无人机密集编队穿越门框的方法和策略. 本文的主要贡献包括:

1) 提出了基于图像检测信息共享的协同制导策

略, 有效解决了视觉遮挡时的门框制导问题.

2) 针对GNSS拒止场景, 设计了基于特征点测量修正的纯惯性导航策略, 能够有效修正惯导的位置累计误差.

3) 在编队控制方面, 采用传统的长机-僚机编队策略, 但所不同的是, 长机在任务中并不是一直不变的, 以编队中第1架无人机作为长机, 若其出现故障, 按顺序其后面的无人机将升级为长机. 在编队距离保持时, 设计了跟随长机的速度, 与前机保持距离的策略, 同时利用了长机的速度信息和前一架无人机的位置信息, 相比于只跟随长机的位置速度, 有更好的编队效果.

4) 设计了相应的集群无人机系统, 参加了2021年“无人争锋”比赛的极速穿越科目, 7架无人机以密集编队形式成功穿越两个门框, 最终取得11.13分的全场最高成绩, 验证了本文方法和策略的有效性和可行性.

## 1 坐标系定义及测量模型建立

### 1.1 基本坐标系定义

如图2所示, 无人机的基准坐标系定义为北东地坐标系( $ox_e y_e z_e$ ), 原点为起飞点位置; 固连在飞机上, 原点位于飞机质心的坐标系为机体坐标系( $ox_b y_b z_b$ ), 关于坐标系的详细定义可参考文献[15].

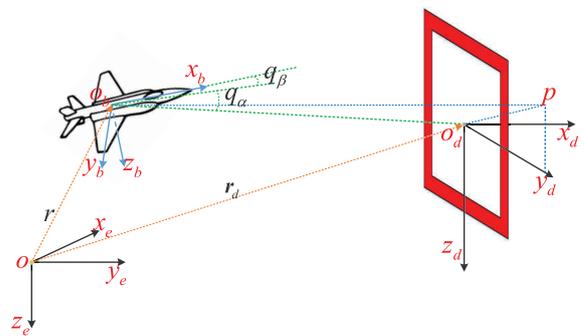


图2 基本坐标系示意图

机载光学测量设备固连于机头位置, 测量信息在相机坐标系( $ox_c y_c z_c$ )下描述, 相机系与机体系之间存在安装角度 $\psi_c$ 和 $\theta_c$ , 一般需要提前标定得到, 机体系到相机系的转移矩阵可表示为

$$\mathbf{T}_b^c = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 & -\sin \theta_c \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_c & 0 & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi_c & \sin \psi_c & 0 \\ -\sin \psi_c & \cos \psi_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

定义门框坐标系为 $o_d x_d y_d z_d$ , 原点 $o_d$ 在门框中心,  $o_d x_d$ 轴垂直于门框平面, 指向前方,  $o_d y_d$ 轴在门框平面内, 水平向右, 根据右手法则,  $o_d z_d$ 轴垂直向下.

因门框平面垂直于地平面,则门框坐标系与基准坐标系之间只存在一个转移角度 $\psi_d$ ,该角度通过提前标定可得到,基准坐标系到门框坐标系的转移矩阵可表示为

$$\mathbf{T}_e^d = \begin{bmatrix} \cos \psi_d & \sin \psi_d & 0 \\ -\sin \psi_d & \cos \psi_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

## 1.2 相机测量模型建立

无人机在巡航阶段,光学相机需要对门框进行搜索与识别,无人机根据相机的测量信息对门框进行制导跟踪.当门框进入机载相机的可视范围内,距离较远时,可测得门框中心在相机系下的位置矢量 $\boldsymbol{\rho}_c = [\rho_{x_c}, \rho_{y_c}, \rho_{z_c}]^T$ ,则可以进一步求得门框中心在机体坐标系下的位置矢量

$$\boldsymbol{\rho}_b = \mathbf{T}_b^c \boldsymbol{\rho}_c + \mathbf{L}. \quad (3)$$

其中: $\mathbf{L}$ 为无人机质心指向相机中心的位置矢量,由矢量 $\boldsymbol{\rho}_b$ 可以求得视线高低角 $q_\alpha$ 和视线方位角 $q_\beta$ ,即

$$\begin{cases} q_\alpha = \arctan \frac{\rho_{z_b}}{\sqrt{\rho_{x_b}^2 + \rho_{y_b}^2}}, \\ q_\beta = \arctan \frac{-\rho_{y_b}}{\rho_{x_b}}. \end{cases} \quad (4)$$

因门框的大小提前已知,在近距离范围内,图像检测算法可以得到无人机在门框坐标系中的位置,用 $\boldsymbol{\rho}_d = [\rho_{x_d}, \rho_{y_d}, \rho_{z_d}]^T$ 表示.

## 2 无人机门框制导策略研究

### 2.1 基于视线角的制导策略

在试验中发现,相机的检测距离受光线影响较大,正常情况下可在距离300m左右检测到门框.当距离大于150m时,解算的视线方位角相对准确,但在接近门框的过程中,因无人机受风扰动、控制扰动以及自身机动等因素影响,测得的视线角是不稳定的,姿态的变化对视线角的影响较大;在距离小于150m后,采用视线角制导会带来较大的误差.

门框的大小是提前已知的先验信息,根据透视原理,图像算法可以得到相机在门框系下的位置.但在远距离时,解算的相机在门框系下的位置误差较大,距离门框越近,精度越高.因此,当距离大于150m时,可以采用视线角制导策略,控制机头大致朝向门框;当距离小于150m时,利用相机在门框系下的位置进行精确制导.

### 2.2 基于门框位置解算的协同制导策略

利用无人机在门框坐标系下的位置 $\boldsymbol{\rho}_d$ 可进行相对导航,控制的目标是将侧向距离 $\rho_{y_d}$ 和相对门框的

$z$ 向距离 $\rho_{z_d}$ 控制到零.

在密集编队情况下,前机对后机存在视野遮挡问题,图3为实飞情况下机载摄像头拍摄的画面,可以看到处于编队前面的无人机对后面的无人机有严重的视野遮挡,门框制导时间短暂,遮挡视野很可能导致飞机撞上门框,因此仅利用单机的相机制导,存在可靠性不足的问题.为了发挥编队的优势,提出了基于门框位置共享的协同制导机制.由每架无人机测量的自身在门框系下的相对位置 $\boldsymbol{\rho}_d$ ,可计算出门框在基准坐标系下的绝对位置 $\mathbf{r}_d$ ,通过组网通信节点将位置信息进行广播,后机即可利用前机广播的门框位置进行制导控制,这样即使后机因为视觉系统故障而无法检测目标,也可以进行目标导引,大大提高了门框制导的成功率和可靠性.



图3 前机对后机的视线遮挡情况

已知无人机在基准坐标系中的位置为 $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]^T$ ,测量得到的无人机在门框系下的位置为 $\boldsymbol{\rho}_d$ ,可得门框在基准坐标系中的位置为

$$\mathbf{r}_d = \mathbf{r} - \mathbf{T}_e^d \boldsymbol{\rho}_d. \quad (5)$$

无人机将解算的门框位置通过自组网通信节点进行广播,处于其后方的无人机可根据收到的门框位置进行制导.

假设第 $i(i \geq 2)$ 架无人机接收到的门框位置为

$$\mathbf{R}_d = [\mathbf{r}_{d_1} \quad \mathbf{r}_{d_2} \quad \dots \quad \mathbf{r}_{d_N}], \quad (6)$$

其中 $N \leq i$ .不同无人机的目标检测精度可能存在差异,有的检测结果可能误差较大.将误差大的检测结果发送给其他无人机使用,反而污染了整个编队,这将会带来适得其反的灾难后果.为了解决这个问题,采用给不同无人机分配不同权重的方法.门框检测的目的是使无人机根据检测的门框信息穿越门框,可以认为已经成功穿越门框的无人机检测的门框位置精度较高,相应的权重系数将被提高.设模值为1的权重系数为

$$\begin{cases} \mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T; \\ w_j = \frac{w'_j}{\sum_{i=1}^N w'_i}, i \in \{1, N\}. \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{w}$  为归一化后的无人机权重系数矩阵,  $w'_j$  为每架无人机发来的未归一化的权重系数, 具体取值如下:

$$w'_j = \begin{cases} 0, & \text{未检测到;} \\ 1, & \text{检测到, 未穿越门框;} \\ 2, & \text{成功穿越门框.} \end{cases} \quad (8)$$

则每架无人机最终估计的门框位置为

$$\mathbf{r}_d = \mathbf{R}_d \mathbf{w}. \quad (9)$$

### 3 GNSS失效情况下的导航策略

#### 3.1 惯性导航算法原理

当GNSS受到干扰后, 无人机不能依赖卫星定位信息进行导航制导, 此时需要其他导航方式进行导航. 飞控自动驾驶仪上一般都集成有惯性测量单元, 如基本的三轴陀螺仪、三轴加速度计和气压计等, 利用惯性测量单元可进行惯性导航. 图4为惯性导航算法基本原理.

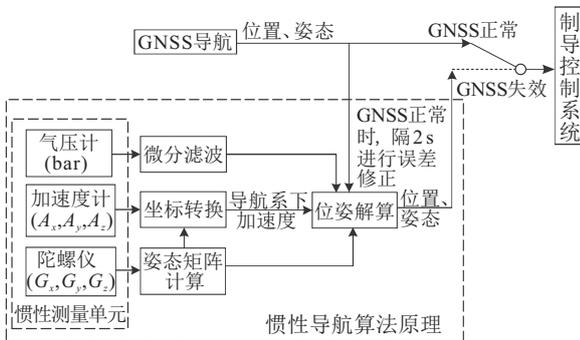


图4 INS导航算法原理

在姿态解算方面, 可采用互补滤波算法<sup>[16]</sup>, 利用加速度计长时间内的稳定特性修正陀螺仪测量的漂移误差, 可以得到高精度的姿态角.

惯性测量单元采用ADIS16488传感器, 内置的气压计可以测量大气静压, 大气压力与海拔高度的简化转换公式如下所示:

$$H_{\text{bar}} = 44300 \left[ 1 - \left( \frac{P_s}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.256}} \right]. \quad (10)$$

其中:  $H_{\text{bar}}$  为海拔高度, 单位为m;  $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$ , 为标准大气压,  $P_s$  为气压计的测量值.

气压计的测量误差主要受温度、气流大小影响, 温度变化会导致气压输出发生漂移. 可在GNSS有效条件下, 采用固定间隔时间用GPS高度修正气压高度. 气压计输出具有高频噪声, 若要利用气压高度微

分得到升降率信息, 则必须对气压计输出进行滤波处理. 韩京清教授的自抗扰(ADRC)跟踪微分器(TD)就是从被噪声污染的信息中提取微分信号<sup>[17]</sup>, 故可采用二阶微分跟踪器来实现气压高度的滤波与微分.

#### 3.2 基于特征点测量的INS误差修正方法

在纯惯性导航阶段, 因高度和升降率是通过静压滤波求解的, 求解误差随惯导误差漂移, 但水平位置和水平速度受漂移影响严重, 水平位置是经加速度两次积分得到的, 漂移最为严重. 在门框制导阶段, 相机可识别无人机相对于门框的位置信息, 又提前可测得门框在基准坐标系中的位置, 虽然门框位置会左右移动14m, 但此移动距离相对于经过数10s漂移后的惯导积分误差可以忽略不计. 因此, 可以基于门框特征点测量信息对INS的位置误差进行修正, 得到更准确的导航位置. 由式(5)可知, 由相机测量的位置 $\rho_d$ , 经坐标转换, 可得无人机在基准系中的测量位置, 便可求得INS的位置误差 $\delta \mathbf{r}$ , 即

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{\text{ram}} = \mathbf{r}_d + \mathbf{T}_d^c \rho_d; \\ \delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{\text{INS}} - \mathbf{r}_{\text{cam}}. \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $\mathbf{r}_{\text{ram}}$  为利用相机测量信息反求得到的无人机位置矢量,  $\mathbf{r}_{\text{INS}}$  为惯性导航计算的位置矢量.

### 4 无人机编队控制律设计

#### 4.1 编队距离控制

比赛场地较小, 且在任务阶段需要顺序穿过门框, 因此采用“一”字编队队形, 每架无人机的航线相同, 通过控制速度来保持编队机间距离.

每架无人机按照ID( $ID = 0, 1, \dots, N$ )大小顺序, 以相同的机间距 $\delta_d$ 飞行, ID小的飞机在前面. 编队控制的目标是保持机间距, 为了增加控制的鲁棒性, 采用的速度控制策略为: 追长机速度, 与前机保持机间距; 为了避免无人机发生碰撞, 在正常编队巡航阶段, 前后机在高度上相隔 $\delta_H$ . 当进入门框穿越的任务阶段, 所有无人机再降到与门框等高的相同高度.

已知本机的位置和速度为 $\mathbf{r}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ ,  $\mathbf{v}_m = [v_{xm}, v_{ym}, v_{zm}]^T$ , 根据通信节点, 可得到前机的位置速度为 $\mathbf{r}_f = [x_f, y_f, z_f]^T$ ,  $\mathbf{v}_f = [v_{xf}, v_{yf}, v_{zf}]^T$ , 则两机之间的直线距离为

$$d_s = |\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_m|. \quad (12)$$

因两机的速度方向不一致, 将 $d_s$ 作为距离控制的反馈量有时会偏小, 如图5所示. 为了得到真实的机间距, 考虑采用圆弧距离, 圆弧夹角和圆弧半径分别为

$$\begin{cases} \theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{v}_m \mathbf{v}_f}{|\mathbf{v}_m| |\mathbf{v}_f|}\right); \\ R = \frac{0.5d_s}{\sin(0.5\theta)}. \end{cases} \quad (13)$$

则圆弧距离  $d_c = R\theta$ . 机间距为

$$d = \begin{cases} d_s, & |\theta| \leq \frac{10}{57.3}; \\ d_c, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

编队中长机的速度用  $v_0$  表示, 预设的编队距离为  $\delta_d$ , 则本机的期望速度为

$$v_{cmd} = v_0 + k_v(d - \delta_d), \quad (15)$$

其中  $k_v$  为编队速率控制的调节系数.

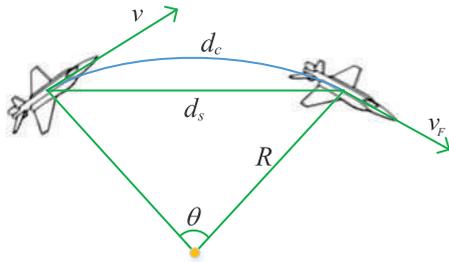


图5 计算圆弧距离示意

### 4.2 水平位置控制

当距离门框大于 150m 时, 横向采用视线角制导策略, 将视线方位角转换为滚转角指令, 通过副翼实现滚转控制, 使得飞机向视线角减小的方向飞行. 滚转角指令如下所示:

$$\phi_{cmd} = k_{LOS} q_\beta. \quad (16)$$

其中:  $k_{LOS}$  为视线角增益,  $q_\beta$  为测量的视线方位角. 因缺少视线角速率作为阻尼项, 只用式(16)会带来较大的超调, 最终控制结果会使得视线方位角在零附近

振荡.

当距离门框小于 150m 后, 相机测得无人机在门框系中的位置可用, 无人机在门框系下  $y$  向位置用  $\rho_{y_d}$  表示, 也称为侧偏距, 横向通过控制  $\rho_{y_d} = 0$ , 使飞机正好在门框的中心线上. 只控侧偏距缺少阻尼项也会带来超调的问题, 为了避免超调振荡的发生, 考虑将速度方向加入到制导量中, 增加阻尼. 如图6所示, 将分解在门框系下速度矢量记为  $\mathbf{v}_d = [v_{x_d}, v_{y_d}, v_{z_d}]^T$ , 则速度矢量与门框方向的夹角为

$$\eta = \arctan\left(\frac{v_{y_d}}{v_{x_d}}\right). \quad (17)$$

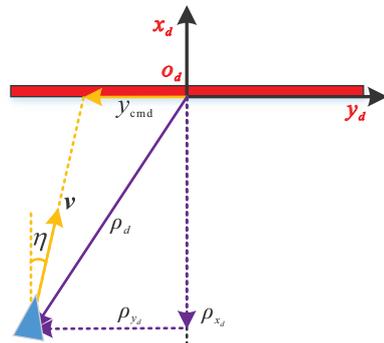


图6 无人机门框制导算法原理

将速度方向延长到门框平面上, 交点到门框中心的水平距离是需要控制的侧偏距, 而不是实际无人机的位置侧偏, 此控制策略的核心是控制无人机速度矢量对准门框中心, 达到门框穿越的目的. 由图6可得侧偏距指令为

$$y_{cmd} = \rho_{y_d} + \rho_{x_d} \tan \eta. \quad (18)$$

将侧偏距指令转化为滚转角指令同样采用比例控制. 图7为无人机横向控制结构, 横向采用滚转角速率反馈的增稳控制结构.

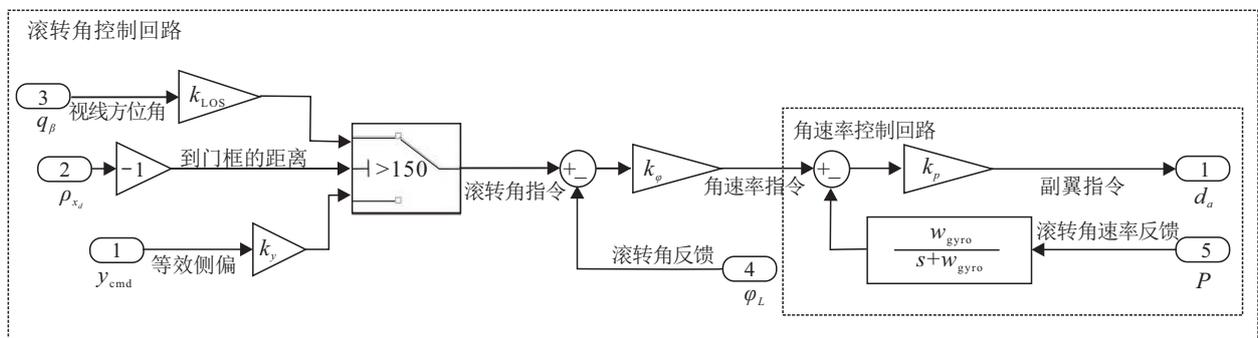


图7 横向控制基本框图

### 4.3 高度控制

由于图像测量的相对高度  $\rho_{z_d}$  在远距离阶段误差较大, 在远距离时, 飞机按原航线高度飞行; 在近距离阶段, 将相对高度控制到零, 使得飞机高度与门框

中心高度相同.

飞机的高度控制的核心为俯仰角控制系统, 通过对升降舵的控制来改变俯仰角, 间接达到对纵向航迹倾角的控制, 从而控制飞行高度, 具体高度控制回路

的设计流程可参考文献[18].

### 5 飞行实验验证

2021年7月,“无人争锋”比赛在河北涿水举行.初赛时,采用7架无人机参加比赛,无人机在起飞后迅速形成间距为40m的飞行编队,以21 m/s的巡航速度飞行,所有无人机都穿过了两个门框,穿越门框的总用时为45 s,最终取得了11.13分的最高成绩.复赛前试飞时,进行了导航干扰试验,起飞后30s开始进行压制性干扰,在无GNSS的情况下,依靠基于门框位置修正INS算法,无人机导航正常,依次从两个门框上空通过后,降落在着陆点附近.下面将从实验平台开始,详细介绍本次实验情况.

#### 5.1 实验平台介绍

##### 5.1.1 无人机平台

选择低成本的小型固定翼无人机,最初的结构设计如图8(a)所示,采用单个螺旋桨电机作为动力

源,翼展达到2m.考虑到机载相机须安放在飞机头部,这种布局会遮挡相机视野,并且2m的大翼展对于成功穿越门框有不利影响.经研究分析之后,最终定型的无人机结构为图8(b)所示的布局,将原来的单电机替换成双电机并安装在机翼前缘,两端机翼各截短30cm.无人机的总起飞重量为6.9kg,翼展为1.4m,单个电机的最大推力为3.6kg,最小起飞速度为16 m/s,最大航时为15 min.

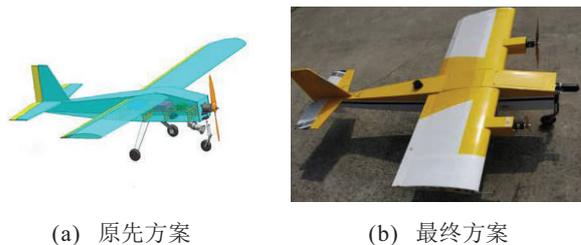


图8 无人机平台方案

机载主要设备如表1所示.

表1 机载设备参数详细列表

设备名称	设备型号	性能详情
自动驾驶仪	Pixhawk4	STM32F765; 216 MHz; 2 MB Flash
导航模块	中海达RTK天线; 司南GPS板卡	支持三星定位, 厘米级定位精度
INS模块	集成ADIS16488的INS模块	惯性导航精度为60s, 位置精度10m
相机模块	集成OSG230-150UC高速相机和HF-10MP镜头	分辨率为1920×1200, 采集频率150FPS, 相机视场角40.2°×30.6°×86.6°
任务计算机	英特尔NUC8i7	16 GB RAM, CPU运行速度3 GHz
通讯设备	自研自组网节点	频率为1.655 GHz, 可支持16个节点

##### 5.1.2 地面设备

无人机编队的顺利飞行离不开地面设备的支持.图9展示了地面设备与无人机的信息交互关系.地面站软件具有无人机状态监控、飞控参数修改与上传等功能;RTK基站将负责产生差分信息供机载GPS修正位置,使其得到厘米级定位精度;地面端数传是无人机与地面站数据交互的媒介;地面遥控器与机载接收机通过无线直连,以备在紧急情况下切换至人工控制模式.



图9 无人机地面设备交互示意图

### 5.2 7机编队穿越门框飞行实验

在实飞实验中,采用7架无人机在起飞场地滑跑起飞,爬升到巡航高度后迅速调整队形,以等间距不同高的“一”字队形编队飞行,检测到门框后,高度降至门框高度,侧向由制导信息进行调整以对准门框.图10为第7架无人机机载相机在穿越两个门框前所拍摄的画面,可以看到在航线上有两个门框,7架无人机在图像制导模式下,最终都顺利穿过两个门框,完成此次实验.

图11为7机在x-y平面内的航迹图,可以看到,无人机在起飞后先是进行两个左转弯后朝向第1个门框飞去,从放大图中可以看到,7架无人机在水平方向从门框中心位置通过;图12为y-h平面图,即东向-高度方向的二维航迹图,图12(a)为穿越门框1的情况,可以看到,在距离门框较远时,为了避障考虑,集群的高度分为两层,δ<sub>H</sub>为5m,在穿越门框阶段,高度降为门框同一高度,穿越门框之后再行升高分层;图12(b)为穿越门框2的情况,因门框2的左侧存在较高

的树木,为了避障考虑,采用沿斜线降高的策略,使无人机到门框平面时刚好降到与门框同高的位置.所有无人机在穿越第2个门框后,按照不同的盘旋路线分批降高着陆.



图 10 机载拍摄的比赛现场编队飞行图

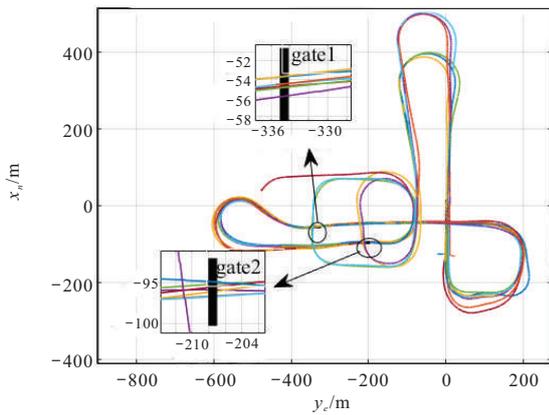


图 11 编队飞行水平航迹

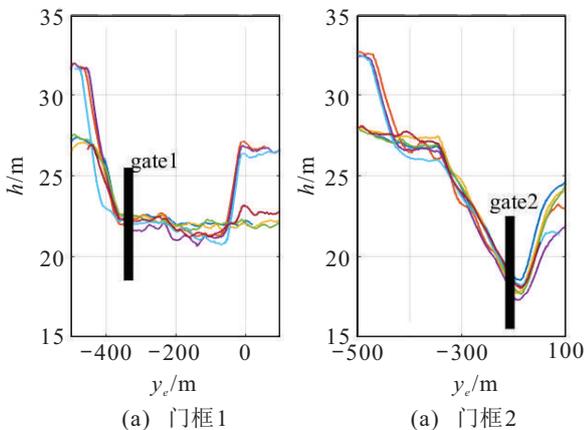


图 12 门框附近编队飞行高度分布

编队机间距  $\delta_d$  设置为 40 m,飞机在前 30 s 处于大油门加速离地爬升阶段,编队还未形成,当 110 s 穿越第 2 个门框之后,飞机陆续处于已退出编队控制的

降落阶段,因此,只分析稳定编队阶段的编队距离数据.图 13 为 30 s~110 s 所有无人机与其前机的距离曲线,图中  $\delta_{d_n}$  为无人机  $n$  与无人机  $n-1$  的距离.可以看出,在 35 s~75 s 之间,编队距离已经控制到 40 m 附近,编队距离误差在 10 m 以内.在 75 s 之后,机间距控制误差很快增大,机间距最大达到 2 倍间距,最小已减小到 0 附近.为了分析机间距误差增大原因,将不同时刻无人机的位置分布用图 14 表示.其中,不同颜色的  $\triangle$ 、\* 和 + 分别为 70 s、90 s 和 110 s 时无人机的位置分布.可以看出,当飞机处于门框 1 和门框 2 之间时,会经历一个大的转弯阶段,同时由图 12 可知,此时在纵向会有爬高和降高机动,高度方向的变化会影响速度的控制,速度的不同会带来转弯半径的不同.因此,在 75 s~90 s 机间距控制误差增大的本质原因是强机动引起的,90 s 之后所有无人机已转弯结束,重新回到直线上,机间距逐渐回到 40 m.

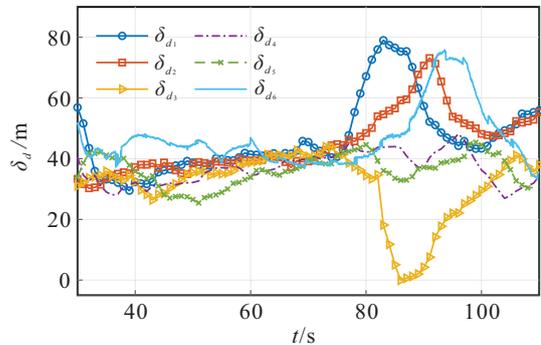


图 13 机间编队距离变化曲线

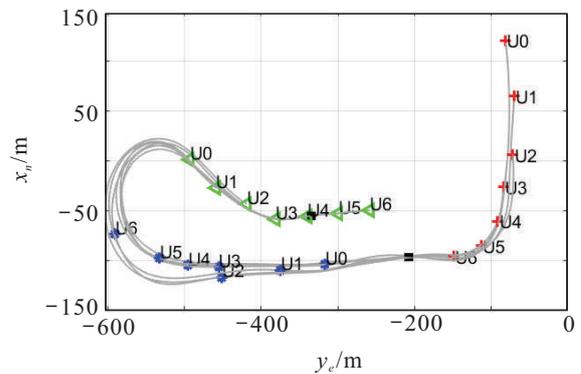


图 14 不同时刻无人机位置分布曲线

图 15 为每架无人机检测的门框在机体坐标系下的  $x$  位置  $\rho_x$ .可以看出,最大检测距离接近 500 m,在距离门框 30 m 时门框出相机视场而丢失门框.同时,除第 1 架无人机外,其余无人机受遮挡情况比较严重,检测信息会出现断断续续的丢失情况,越靠后的无人机受遮挡越严重,由图 10 也可看出存在遮挡情况.

表 2 记录了 7 架无人机最终稳定检测的门框位置,以及开始稳定检测到门框时与门框的距离.可以看出,各架无人机检测到的门框位置与门框的实

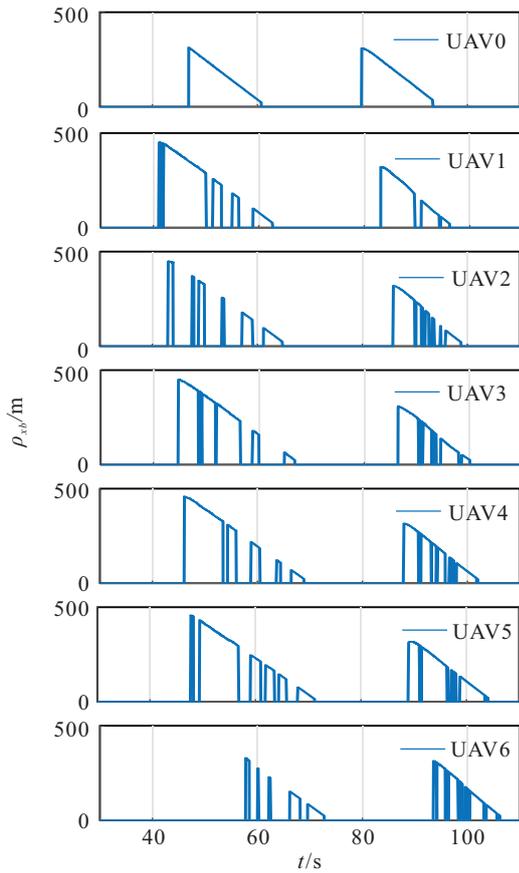


图 15 相机检测的门框在机体坐标系下的  $x$  坐标

际位置  $(-54.5, -336, 23)$  相比误差很小,但同时也可看出位于头机后的其他无人机的检测距离大幅缩短, UAV1 因受前机遮挡,距离门框 102 m 才稳定检测

表 2 各架无人机检测的门框位置和检测距离

UAVID	门框位置			开始稳定检测时的距离/m
	$x/m$	$y/m$	$h/m$	
0	-54.5	-335.8	22.9	312
1	-54.4	-335.9	22.9	102
2	-54.5	-335.7	22.6	97
3	-54.6	-336.6	23.1	66
4	-54.0	-335.9	22.9	70
5	-54.4	-336.9	22.9	77
6	-53.6	-335.6	22.5	86

到门框,后面的无人机检测距离更短.在试验中发现,无人机距离门框小于 90 m 后,无法修正超过 10 m 的侧偏,有很大的可能性会撞上门框.

为了避免由于遮挡而导致目标丢失,采用机间共享机制解决此问题.以最后 1 架无人机为例,图 16 为第 7 架无人机融合了所有无人机的检测结果后得到的门框 1 位置数据随距离变化曲线,当距离大于 200 m 时,只融合了前 3 架无人机的检测门框位置结果,误差较大,随着距离越近,陆续收到了前面的无人机的检测结果,门框位置检测误差逐渐减小.可以看出,从距离门框 350 m 开始得到门框位置,一直到穿过门框时,门框位置一直在收敛,最终,  $x$  方向的误差在 0.5 m 以内,  $y$  方向的误差在 0.2 m 以内,  $z$  方向的误差在 0.5 m 以内.

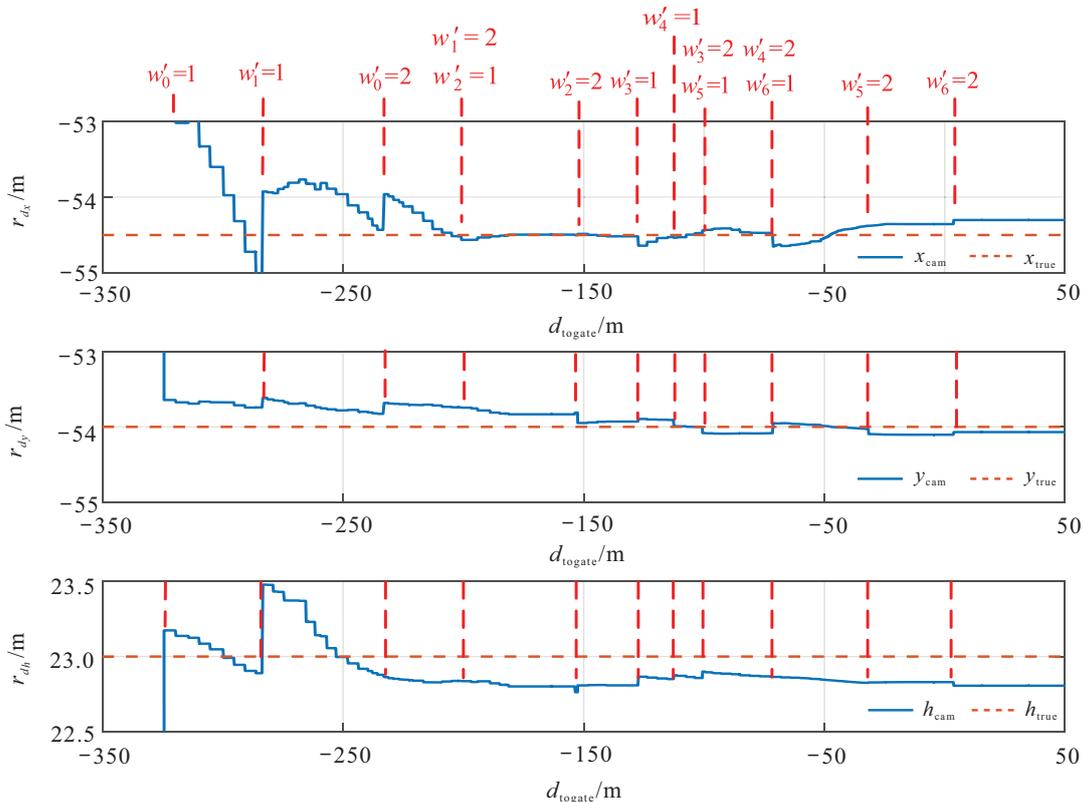


图 16 相机检测的门框位置随距离变化曲线

### 5.3 基于特征点修正INS算法误差的飞行实验

为了验证INS导航算法的有效性,开展了在GNSS受干扰失效条件下的INS导航实验.因为GNSS失效后,缺少真实的位姿数据与INS解算的位姿数据对比,无法进行精度分析.为此,首先开展了在GNSS有效条件下的INS算法搭载实验,分析INS解算精度;然后开展了GNSS失效条件下的INS导航实验.

#### 5.3.1 GNSS有效条件下的INS算法搭载试验

图17为两种导航解算方式的水平面航迹图.起始时刻,用GNSS结果为INS算法赋初值,两种导航的起始位置一致.INS导航误差随时间逐渐增大,在100s后,水平位置最终误差为140m.

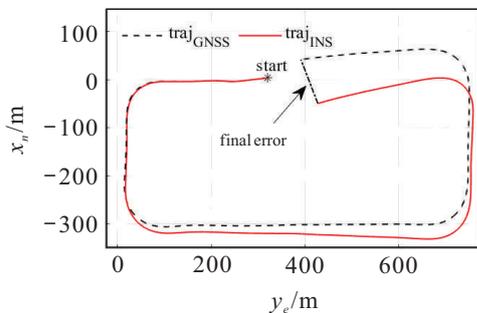


图17 INS/GNSS两种导航解算方式下的水平航迹

图18为两种导航解算方法得到的无人机姿态、速度、位置数据随时间变化曲线.可以看出,在3轴姿态角值较大时,误差也会随之增大,俯仰角平均误差在 $3^\circ$ 以内,滚转角平均误差在 $1.5^\circ$ 以内,偏航角误差相较于其他两个姿态角误差偏大,这是因为互补滤波无法对偏航角进行修正.偏航角在飞行中可以不用用于控制反馈,因此,基于互补滤波的INS姿态算法可以满足导航要求.

水平速度误差随时间逐渐增大,北向速度和东向速度在90s后各产生3m/s的误差,且有呈线性发散的趋势,这是由姿态矩阵计算误差和加速度测量误差等叠加导致的;升降速率平均误差稳定在1m/s以内,且不随时间发散,其原因是升降速率由静压高度经微分滤波得到,静压在达到温漂稳定后,误差不随时间发散.

水平速度误差的线性发散,导致水平位置误差呈二阶指数发散.由图18(b)和图18(c)可以看出,水平位置随时间发散严重,在纯惯导解算90s后,北向位置误差为100m,东向位置误差为40m;经过微分滤波器的静压高度噪声明显减小,且不受惯导累积误差影响,高度误差在3m以内.

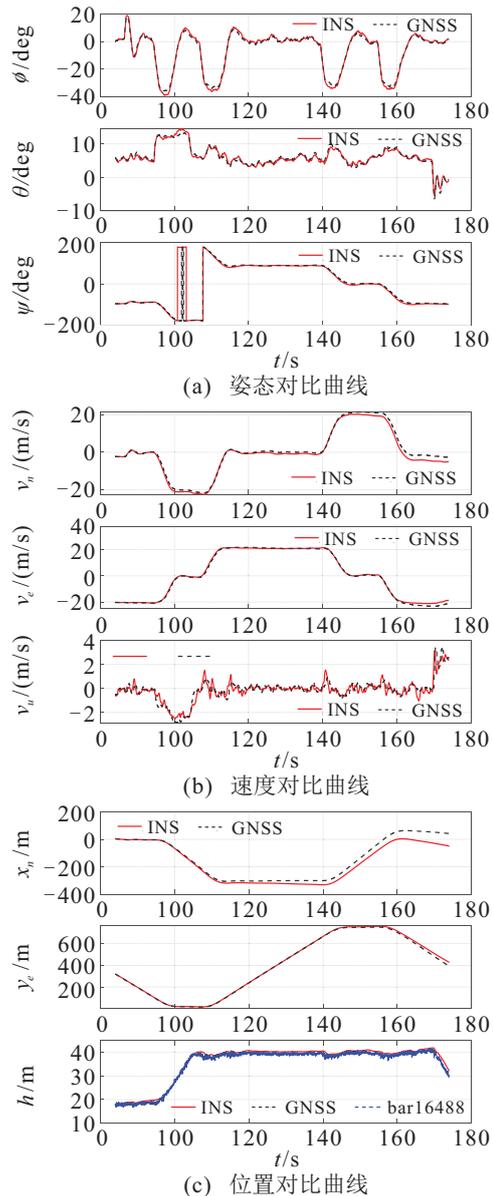


图18 GNSS/INS解算姿态、速度和位置对比曲线

由以上分析可知:INS算法解算的姿态角误差在互补滤波修正下,并不会随时间漂移太大;速度误差和位置误差随时间发散严重,位置误差呈二次曲线增长.在短时间内,速度误差对导航制导的影响并不严重,但水平位置误差不可忽略.

#### 5.3.2 基于特征点修正的INS算法飞行实验

试验飞行时的任务航迹如图19所示,起飞后距离第1个门框300m时开启基于视线角的门框制导,无人机根据视线角信息调整机头,朝向门框飞行;在通过门框时,因电磁干扰丢失卫星信号,开始INS导航.转过弯检测到门框2时,用视线角导航,当距离门框小于100m时,图像检测的门框位置精度比较高,这时用图像检测信息修正INS算法的水平位置偏差继续导航.盘旋1圈后卫星信号还未恢复,最终利用INS导航进行着陆,着陆后卫星导航信息恢复,可以看出,

真实位置与INS解算位置存在一定偏差。

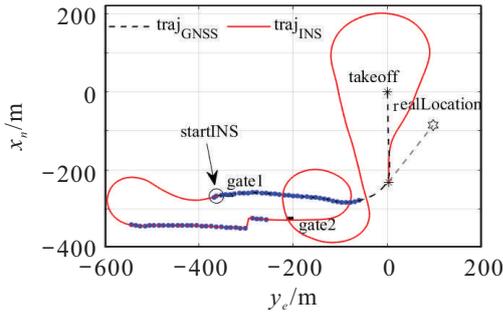


图19 导航干扰情况下的水平航迹

GNSS失效后,缺少真值与INS解算结果进行对比,因此不分析姿态与速度误差,图20为导航位置随时间变化曲线. 180s为GNSS导航与INS导航的分界线,211s开始基于门框2位置测量对INS的水平位置进行修正,由放大图可以看出,北向修正误差为20m,东向修正误差为5m,在INS导航113s后飞机着陆,恢复GNSS时,北向位置误差为145.5m,东向位置误差为94.5m,高度误差为0.5m. 基于门框位置检测信息对INS的位置误差的修正效果较为明显,验证了方法的有效性.

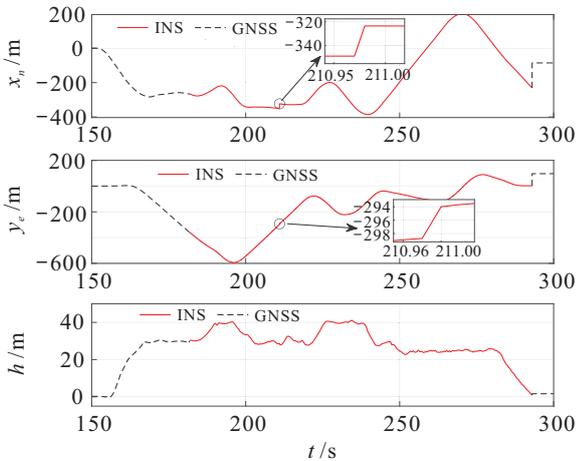


图20 导航干扰下两种导航方式的位置轨迹

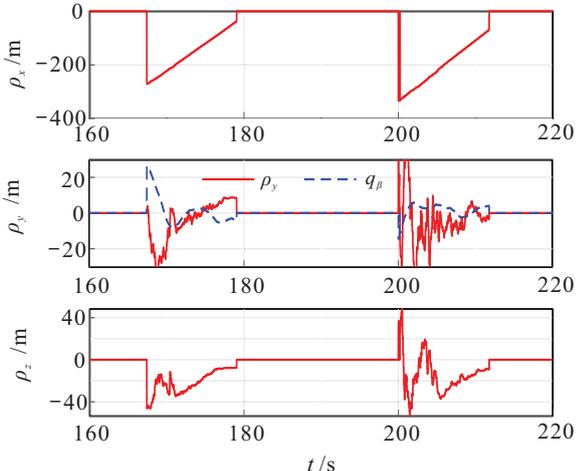


图21 检测无人机在门框系下位置与视线角曲线

图21为图像测量的无人机在门框系下的位置以及视线方位角随时间变化曲线. 可以看出,在距离门框300m时可稳定检测门框,初始时,视线方位角接近20°,视线角制导将使得视线角不断减小,因缺少阻尼,视线角出现超调现象,图像丢失时刻存在1°视线角.

### 6 结论

本文以“无人争锋”极速穿越比赛为背景,提出了固定翼无人机密集编队穿越门框的方法和策略,在初赛中7架无人机保持40m距离编队飞行,用时45s全部穿越门框并顺利返航着陆,验证了所提出的基于门框位置解算的协同制导策略的有效性;最终复赛虽然取消导航干扰设置,但在之前进行了导航干扰条件下的INS飞行实验,验证了所提出的基于门框位置修正的INS导航算法的可行性.

本文所提出方法的优点在于:

- 1) 固定翼无人机在高速飞行情况下保持近距离编队的控制技术;
- 2) 利于机间信息共享的制导策略,可以有效解决在图像信息失效情况下对目标的制导问题;
- 3) 在卫星导航失效情况下,利用图像检测的门框特征点对INS位置进行修正,可辅助提高导航精度,当位置信息不准确时,利用图像求解的视线角信息可实现对目标的有效制导.

本文方法也存在一些不足和需要进一步加强研究的方面:

- 1) 无人机在大角度转弯的机动阶段,编队距离控制效果变差,有待进一步研究解决;
- 2) GNSS失效情况下,可对多个特征点进行标定和修正,这样可以多次修正INS误差,或者可以结合视觉Slam进行导航.

### 参考文献(References)

[1] Wang X K, Zeng Z W, Cong Y R. Multi-agent distributed coordination control: Developments and directions via graph viewpoint[J]. Neurocomputing, 2016, 199: 204-218.

[2] Gu Y, Seanor B, Campa G, et al. Design and flight testing evaluation of formation control laws[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1105-1112.

[3] Liu W Q, Zou D P, Sartori D, et al. An image-guided autonomous navigation system for multi-rotor UAVs[C]. Proceedings of China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer, 2019: 513-526.

- [4] 王梓豪, 朱波, 王奇, 等. 基于视觉辅助导航的小旋翼机群编队穿越障碍技术[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(3): 391-397.  
(Wang Z H, Zhu B, Wang Q, et al. Heterogeneous micro air vehicles formation crossing obstacles based on vision-aided navigation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(3): 391-397.)
- [5] Liu X M, Ge S S, Goh C H. Vision-based leader - follower formation control of multiagents with visibility constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(3): 1326-1333.
- [6] Das A K, Fierro R, Kumar V, et al. A vision-based formation control framework[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 813-825.
- [7] Wilson D B, Göktoan A H, Sukkarieh S. Vision-aided guidance and navigation for close formation flight[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(5): 661-686.
- [8] Zhang M F, T Liu H H. Cooperative tracking a moving target using multiple fixed-wing UAVs[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3/4): 505-529.
- [9] 王祥科, 陈浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2063-2073.  
(Wang X K, Chen H, Zhao S L. Formation control of large-scale fixed-wing unmanned aerial vehicle swarms[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2063-2073.)
- [10] 张旭, 张涛, 赵汉武. 无人机密集编队穿越竞速导引算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2019, 20(6): 23-26.  
(Zhang X, Zhang T, Zhao H W. A crossing and contesting guidance algorithm for UAV intensive formation[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2019, 20(6): 23-26.)
- [11] Lynen S, Achtelik M W, Weiss S, et al. A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation[C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013: 3923-3929.
- [12] Foehn P, Brescianini D, Kaufmann E, et al. AlphaPilot: Autonomous drone racing[J]. Autonomous Robots, 2022, 46(1): 307-320.
- [13] Moon H, Martinez-Carranza J, Cieslewski T, et al. Challenges and implemented technologies used in autonomous drone racing[J]. Intelligent Service Robotics, 2019, 12(2): 137-148.
- [14] Li S, Horst E, Duernay P, et al. Visual model-predictive localization for computationally efficient autonomous racing of a 72-gram drone[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(4): 667-692.
- [15] 吴森堂. 飞行控制系统[M]. 第2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013: 8-14.  
(Wu S T. Flight control system[M]. The 2nd edition. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2013: 8-14.)
- [16] 王立, 章政, 孙平. 一种自适应互补滤波姿态估计算法[J]. 控制工程, 2015, 22(5): 881-886.  
(Wang L, Zhang Z, Sun P. An adaptive complementary filter for attitude estimation[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(5): 881-886.)
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 46-77.  
(Han J Q. Active disturbance rejection control technique: the technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 46-77.)
- [18] 徐军, 欧阳绍修. 运输类飞机自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 184-256.  
(Xu J, Ouyang S X. Automatic flight control system of transport aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 184-256.)

### 作者简介

颜鸿涛(1992—), 男, 工程师, 硕士, 从事飞行器制导控制、编队控制等研究, E-mail: yanht1992@163.com;

许勇(1988—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事图像检测与目标识别的研究, E-mail: xuyong\_1105@qq.com;

贾涛(1987—), 男, 助理研究员, 硕士, 从事无人机导航制导控制的研究, E-mail: yht\_2410@163.com;

张可(1996—), 男, 工程师, 硕士, 从事无人机航迹任务规划的研究, E-mail: 15776627696@163.com;

杜俊杰(1994—), 男, 工程师, 硕士, 从事无人机自抗扰控制的研究, E-mail: stu\_junjie@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)