

采用改进 Sage-Husa 自适应滤波的运动目标三维定位方法*

吴岸平^{1,2}, 鲁亚飞¹, 郭正¹, 侯中喜¹

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川绵阳 621000)

摘要: 提出不依赖于测距信息, 利用两架基于视觉的无人机对运动目标进行三维交会定位的方法。采用多模型交互方法实现在不预知目标运动模式的条件下对运动目标的实时定位; 采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法, 综合协方差匹配技术和正定性判断, 提高了定位精度。为评估这些方法的性能, 模拟真实观测条件进行仿真。结果表明, 提出的方法可以实时对运动目标的三维坐标进行估计。改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法可以显著提高定位精度, 在 90° 观测夹角下, 平均估计误差从 27.13 m 降低到 14.62 m。仿真研究了两无人机观测夹角对定位的影响, 结果表明: 过小的夹角不利于定位精度的提高; 较大的夹角对无滤波定位方法有较好的效果, 但对基于改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法的定位方法影响并不明显。

关键词: 无人机; 运动目标定位; 三维交会模型; 自适应滤波; 多模型交互

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2023)02-146-09

Three-dimensional localization for moving target using modified Sage-Husa adaptive filter

WU Anping^{1,2}, LU Yafei¹, GUO Zheng¹, HOU Zhongxi¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: A three-dimensional intersection localization method for moving target using two vision-based UAVs (unmanned aerial vehicles), which did not rely on the distance information from the target point to the UAV was proposed. An interacting multiple model estimator was adopted to the localization method to solve the problem of not knowing the motion form of the moving target. A modified Sage-Husa adaptive filtering algorithm that synthesized the covariance matching technique and the positive definiteness judgment was used to improve the accuracy of localization. To assess the performance of these approaches, a set of simulations that carried out under realistic conditions were presented. Results show that the method proposed can get the accurate three-dimensional coordinates of the target. The modified Sage-Husa adaptive filtering algorithm can improve the localization accuracy significantly, with the average estimation error reduced from 27.13 m to 14.62 m under the intersection angle of 90°. The influence of the intersection angle on localization was studied in the simulation, which shows that too small intersection angle is not conducive to the improvement of localization accuracy, a larger intersection angle is good for the localization method without filtering, but the effect on the method with the modified Sage-Husa adaptive filtering algorithm is not significant.

Keywords: UAVs; moving target localization; three-dimensional intersection model; adaptive filter; interacting multiple model

无人机以其成本低、隐蔽性好、零人员伤亡等优势, 在军事和民用领域发挥着越来越重要的作用^[1-2]。小型低成本无人机在自主监视、侦察、搜索和救援等领域具备很好的应用前景^[3-5]。携带光电设备对目标进行侦察定位是目前无人机系统的主要应用之一^[6-9]。传统的机载光电平台通过无人机搭载的激光测距仪和可见光相机, 测量出无人机与目标点之间的距离、俯仰角和方位角, 结

合机载传感器获得的无人机位置和姿态信息, 完成对目标的定位。该方法虽然可以实现对目标的精确定位, 但激光测距仪在作用距离方面有一定限制, 且这种方法所需的多功能光电吊舱质量体积较大、设备成本也相对较高^[10-11]。采用基于模型的滤波器进行滤波有利于提高定位精度, 但是目标的运动模式往往事先难以预测^[12]。因此, 在不搭载激光测距仪, 无法获取目标距离信息、无法预知目

* 收稿日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61801495); 基础技术强化计划资助项目(2019JCJQJ210)

作者简介: 吴岸平(1990—), 男, 湖南涟源人, 博士研究生, E-mail: wuanpingtech@163.com;

鲁亚飞(通信作者), 男, 河南汝州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, E-mail: luyafeichina@163.com

标运动模式的条件下,采用可见光相机结合自身传感器数据完成对地目标(尤其是运动目标)的实时定位是当前小型无人机亟待解决的实际问题。

针对无人机对地目标定位问题,国内外开展了广泛的研究。Gaspar 等^[13]利用配备了航姿参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)和GPS的无人机建立了基于模型的海洋哺乳动物三维定位滤波器,当海洋哺乳动物在海面上移动时,目标高度为零,问题简化为二维定位问题。Zhang 等^[14]提出了一种在给定地面车辆尺寸(长度)的条件下基于无人机视觉的相对高度估计方法,这为小型无人机在目标定位、跟踪和地形探测任务中的应用提供了可能的改进或扩展空间。Monda 等^[15]开发了扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)和无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法来定位目标在河流环境下的惯性位置,这意味着目标的高度是一个已知的常数。贺若非等^[16]提出了一种基于蒙特卡罗卡尔曼滤波的目标定位算法,该算法仅利用无人机的位置和激光测距仪的传感器信息。在文献[17-19]中,利用图像景深估计相机光轴到目标的距离,然后使用基于距离的方法完成目标定位。Bai 等^[20]参考光电经纬仪交叉角定位方法,提出了一种改进的基于机载光电平台的双无人机交会定位系统,并详细研究了无人机与目标之间位置关系的影响,以获得理想的测量位置。鲁亚飞等^[21]采用基于卡尔曼滤波的图像多帧配准对地面目标定位的方法,通过融合无人机获取的多帧目标图像,研究无人机对地目标高精度融合定位的方法。

本文提出不依赖于目标点到无人机的距离信息,利用两架基于视觉的无人机对运动目标进行三维交会定位的方法。采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法,综合协方差匹配技术和正定性判断,提高了定位精度。针对预先不清楚目标运动形式的问题,采用多模型交互(interacting multiple model, IMM)估计器进行定位。为了评估这些方法的性能,模拟实际观测条件进行仿真,分析该方法对定位精度的提升以及两无人机观测夹角对定位的影响。

1 问题陈述

对地目标定位是指无人机结合对地目标的观测数据和自身传感器数据,求解目标的三维坐标。定位过程如图1所示,无人机检测到目标后,使用图像采集模块将目标锁定在摄像机视场中心并保持跟踪,无人机的姿态角 (ϕ, θ, ψ) 、小型云台的姿态角 (α, β) 、无人机质心位置 $[P_x, P_y, P_z]^T$ 均可通

过机上传感器获取,目标的像素点位置 (x, y) 可通过图像识别获取,通过坐标转换关系可得对目标的观测视轴,多点观测即可完成对地目标定位。

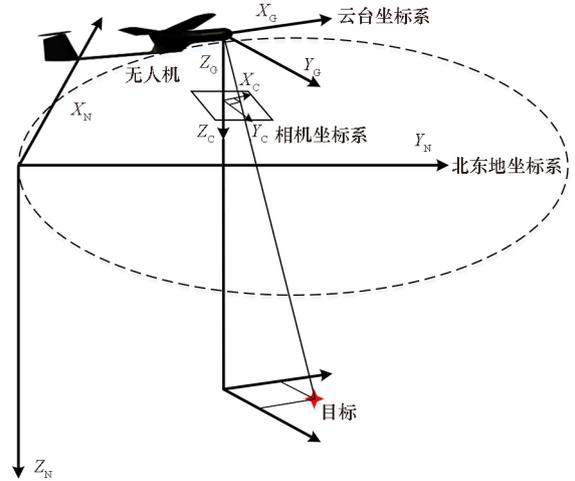


图1 对地目标定位示意

Fig. 1 Schematic diagram of ground target localization

定位过程涉及的坐标系包括相机坐标系(C)、云台坐标系(G)和北东地坐标系(N)。相机坐标系原点在相机的光学投影中心, X_c 轴在图像平面中指向向前, Y_c 轴在图像平面中指向右, Z_c 轴在图像平面中指向下。云台坐标系与通常所定义的机体坐标系平行,原点位于二维云台的旋转中心,不失一般性,认为云台坐标系原点与机体坐标系原点重合。其中, X_c 轴指向机头方向, Y_c 轴垂直于机体对称面指向右, Z_c 轴指向下。北东地坐标系以飞机进入定位程序时刻质心位置为原点, X_n 轴指向北, Y_n 轴指向东, Z_n 轴指向下。

1.1 单机目标定位模型

单架无人机进行目标定位的核心是求解惯性坐标系下的视轴矢量,它可以通过坐标变换得到。从相机坐标系到云台坐标系的旋转矩阵 M_{C-G} 可表示为:

$$M_{C-G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

从云台坐标系到北东地坐标系的旋转矩阵 M_{G-N} 可表示为:

$$M_{G-N} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

惯性坐标系下的视轴矢量可由式(3)得到。

$$\mathbf{L}_{\text{LOS}} = \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{G-N} \mathbf{M}_{C-G} \begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, f 为相机的焦距。

获得惯性坐标系下的 \mathbf{L}_{LOS} 向量后, 若已知无人机到目标的距离, 则可直接求解目标的三维坐标。但正如前面介绍部分所提到的, 无人机到目标的距离较难获得。若目标静止不动, 可以通过多点观测得到目标的一系列视轴矢量, 再通过视轴交叉法得到目标的三维坐标。针对运动目标定位而言, 就需要两架无人机来解决三维定位问题。

1.2 双机目标定位模型

双机目标定位过程如图 2 所示。可以通过式(3)得到每架无人机的 \mathbf{L}_{LOS} 向量, 在理想的情况下, 两架无人机的 \mathbf{L}_{LOS} 向量将在目标点相交。但实际上, 考虑到测量误差, 两个 \mathbf{L}_{LOS} 向量可能不会相交在一个平面上。定义一个点 $T(T_x, T_y, T_z)$ 作为目标的位置, 它到两个 \mathbf{L}_{LOS} 轴的距离是最小的。

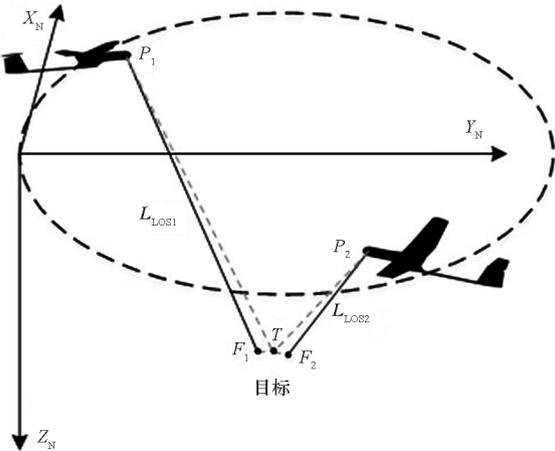


图 2 双机目标定位示意

Fig.2 Schematic diagram of two UAVs target localization

点 T 到两个 \mathbf{L}_{LOS} 轴的距离为:

$$J = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [(T_x - F_{xi})^2 + (T_y - F_{yi})^2 + (T_z - F_{zi})^2]} \quad (4)$$

式中, $F_i(F_{xi}, F_{yi}, F_{zi})$ 是目标在 $\mathbf{L}_{\text{LOS}i}$ 轴上的投影点, i 为观测视轴的编号, 对于双机目标定位模型取值为 1、2。

无人机的位置 P_i 、目标点 T 和投影点 F_i 之间满足:

$$\begin{cases} F_{xi} = P_{xi} + \frac{L_{xi}[L_{xi}(T_x - P_{xi}) + L_{yi}(T_y - P_{yi}) + L_{zi}(T_z - P_{zi})]}{L_{xi}^2 + L_{yi}^2 + L_{zi}^2} \\ F_{yi} = P_{yi} + \frac{L_{yi}[L_{xi}(T_x - P_{xi}) + L_{yi}(T_y - P_{yi}) + L_{zi}(T_z - P_{zi})]}{L_{xi}^2 + L_{yi}^2 + L_{zi}^2} \\ F_{zi} = P_{zi} + \frac{L_{zi}[L_{xi}(T_x - P_{xi}) + L_{yi}(T_y - P_{yi}) + L_{zi}(T_z - P_{zi})]}{L_{xi}^2 + L_{yi}^2 + L_{zi}^2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 为了使 J 的值最小, 则式(4)对于 (T_x, T_y, T_z) 的偏导数为零。那么可以获得矩阵形式的交叉定位模型:

$$\mathbf{A}\mathbf{T} = \mathbf{B} \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^2 (L_{yi}^2 + L_{zi}^2) & -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{yi} & -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{zi} \\ -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{yi} & \sum_{i=1}^2 (L_{xi}^2 + L_{zi}^2) & -\sum_{i=1}^2 L_{yi}L_{zi} \\ -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{zi} & -\sum_{i=1}^2 L_{yi}L_{zi} & \sum_{i=1}^2 (L_{xi}^2 + L_{yi}^2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^2 (L_{yi}^2 + L_{zi}^2)P_{xi} - \sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{yi}P_{yi} - \sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{zi}P_{zi} \\ -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{yi}P_{xi} + \sum_{i=1}^2 (L_{xi}^2 + L_{zi}^2)P_{yi} - \sum_{i=1}^2 L_{yi}L_{zi}P_{zi} \\ -\sum_{i=1}^2 L_{xi}L_{zi}P_{xi} - \sum_{i=1}^2 L_{yi}L_{zi}P_{yi} + \sum_{i=1}^2 (L_{xi}^2 + L_{yi}^2)P_{zi} \end{bmatrix}$$

由于矩阵 \mathbf{A} 是非奇异矩阵, 目标三维坐标的无滤波解可以由式 $\mathbf{T} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 获得。

2 基于改进 Sage-Husa 自适应滤波的多模型交互算法

为提高双机交会定位方法的定位精度, 采用滤波方法对目标的三维坐标进行估计。由于不能准确掌握定位过程中系统噪声和量测噪声的统计特性, 因此采用自适应滤波方法对噪声的统计特性进行估计, 采用多模型交互方法提高算法的鲁棒性, 使其不仅能对静止目标进行估计, 也能适用于运动目标。

2.1 改进 Sage-Husa 自适应滤波

Sage-Husa 自适应滤波是具有代表性的带时变噪声估计器的滤波方法^[22]。其基本思想是在利用观测数据进行递推滤波的同时, 实时对系统噪声和量测噪声的统计特性进行估计和修正, 从而抑制滤波发散, 提高滤波精度^[23]。

通常情况下无人机对目标的观测频率较快, 目标运动的加速度相对较小, 在相邻的两个采样数据内目标可以看作是做匀速直线运动或者匀速转弯运动。目标运动的状态方程可以写为:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}_k = [x_k, v_{x_k}, y_k, v_{y_k}, z_k]$ 是 k 时刻目标的状态

变量; x_k, y_k, z_k 是目标的三维坐标; v_{x_k}, v_{y_k} 是目标的运动速度,由于高度方向位置变化较小,其速度项在状态方程中不再体现; w_{k-1} 为服从均值为零、方差为 Q_k 的高斯分布的系统噪声; Φ_{k-1} 为系统的状态矩阵,当目标做匀速直线运动时,状态矩阵为:

$$\Phi_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

当目标做匀速转弯运动时,状态矩阵为:

$$\Phi_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & 0 & -\frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} & 0 \\ 0 & \cos(\omega T) & 0 & -\sin(\omega T) & 0 \\ 0 & \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} & 1 & \frac{\sin(\omega T)}{\omega} & 0 \\ 0 & \sin(\omega T) & 0 & \cos(\omega T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, T 为观测过程中的采样时间间隔。

Sage-Husa 自适应滤波理论上能同时估计系统噪声 Q_k 和量测噪声 R_k 。但实际上,由于它们都依赖于新息向量,新息向量的异常变化同时影响系统噪声和量测噪声的计算,不能保证滤波估计的收敛性和准确性。采用简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法,认为定位过程中的系统噪声具有稳定性,将其设为常数,仅对量测噪声进行估计。滤波算法为:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k-1} \hat{X}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \\ e_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + \hat{R}_k)^{-1} \\ \hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k e_k \\ P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k \hat{R}_k K_k^T \end{cases} \quad (10)$$

为了保证 \hat{R}_k 的正定性,加入对滤波稳定性预判矩阵 $DR_k = e_k e_k^T - H_k P_{k/k-1} H_k^T$ 正定性的判断,采用式(11)对量测噪声进行估计。

$$\hat{R}_k = \begin{cases} (1 - d_k) \hat{R}_{k-1} + d_k DR_k, \text{eig}(DR_k) > 0 \\ (1 - d_k) \hat{R}_{k-1} + d_k (e_k e_k^T), \text{eig}(DR_k) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: eig 表示矩阵的特征值; $d_k = (1 - b)/(1 - b^{k+1})$, b 为遗忘因子,且有 $0 < b < 1$, 一般取值范

围为 $0.95 \sim 0.99$ 。

为进一步提高滤波的稳定性,抑制滤波发散,采用基于协方差匹配技术的滤波发散判据进行判断。发散判据为:

$$e_k^T e_k > \gamma \text{tr}[E(e_k e_k^T)] = \gamma \text{tr}[H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k] \quad (12)$$

式中, $\gamma \geq 1$ 为储备系数,当 $\gamma = 1$ 时为最严格的收敛判据条件; tr 表示矩阵的迹。若式(12)成立,表明滤波已发散,则式(11)用式(13)代替。

$$\hat{R}_k = \hat{R}_{k-1} \quad (13)$$

采用观测数据结合式(10) ~ (13) 进行迭代计算,就可以得到目标三维坐标的最优估计值。

2.2 多模型交互算法

上述改进的 Sage-Husa 自适应滤波方法是在已知目标运动的条件下进行的。然而,目标的运动模型通常很难提前预测。多模型交互算法对不同运动状态的目标使用不同的模型滤波器^[24]。各模型滤波器并行工作,模型间的概率传递服从马尔可夫过程,估计结果为各模型^[25] 预测值的加权和。采用 IMM 算法估计运动目标的三维坐标。IMM 算法采用匀速直线 CV 模型(模型 1)和匀速转弯 CT 模型(模型 2)作为模型集。IMM 算法的结构如图 3 所示。

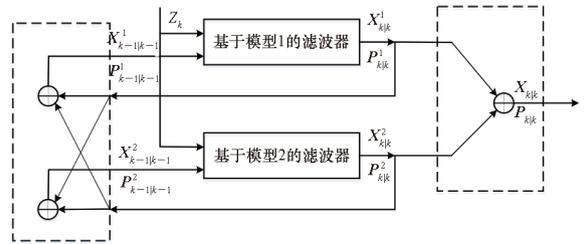


图3 IMM 算法结构

Fig. 3 Structure of IMM algorithm

IMM 估计器是一个递归行,每个循环由 4 个步骤组成。

步骤 1: 混合输入。

$$\mu_{i|j}(k-1) = \frac{1}{\bar{c}_j} \pi_{ij}(k-1) \mu_i(k-1) \quad (14)$$

式中, $\bar{c}_j = \sum_{i=1}^n \pi_{ij}(k-1) \mu_i(k-1)$, $\pi_{ij}(k-1)$ 是转移概率的马尔可夫链。

$$\hat{x}_{0j}(k-1) = \sum_{i=1}^n \mu_{i|j}(k-1) \hat{x}_i(k-1) \quad (15)$$

$$P_{0j}(k-1) = \sum_{i=1}^n \mu_{i|j}(k-1) \{P_i(k-1) + [\hat{x}_i(k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1)][\hat{x}_i(k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1)]^T\} \quad (16)$$

步骤 2:模型条件滤波。获得的使用状态和协方差方程(15)和(16)作为初始条件,分别采用 2.1 节中描述的滤波方法计算更新后的状态和协方差,以及目标以两种模型状态运动的可能性:

$$\lambda_j(k) = p[\mathbf{Z}_k | \hat{\mathbf{x}}_j(k-1), \mathbf{P}_j(k-1)] \sim N(\mathbf{e}_k^j; \mathbf{0}, \mathbf{S}_k^j) \quad (17)$$

步骤 3:模型概率更新。

$$\mu_j(k) = \frac{1}{c} \lambda_j(k) \bar{c}_j \quad (18)$$

步骤 4:估计混合输出。

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \sum_{j=1}^n \mu_j(k) \hat{\mathbf{x}}_j(k) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}(k) = \sum_{j=1}^n \mu_j(k) \{ \mathbf{P}_j(k) + [\hat{\mathbf{x}}_j(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)][\hat{\mathbf{x}}_j(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)]' \} \quad (20)$$

3 仿真验证

考虑到无人机实际观测数据误差的随机性,采用在准确数据的基础上添加高斯白噪声的方法,模拟采样值,产生模拟观测数据作为目标定位算法的输入,以获取与真实状况接近的仿真结果。根据现有小型无人机各传感器技术现状,取测量误差的方差如表 1 所示。

表 1 各传感器测量误差

Tab. 1 Measurement error of each sensor

误差类型	标准差	误差类型	标准差
无人机水平位置/m	1	无人机滚转角/(°)	0.1
无人机高度/m	4	无人机俯仰角/(°)	0.1
云台俯仰角/(°)	0.2	无人机偏航角/(°)	0.2
云台滚转角/(°)	0.2	像素点尺寸/mm	4×10^{-4}

无人机对目标的定位精度除与机上传感器相关外,还与观测距离、观测角度等相关。为减少其他因素的影响,仿真过程中无人机采用圆形飞行航迹,飞行高度为 2 000 m,盘旋半径为 3 000 m,并假定目标始终处于其视场范围之内。

3.1 匀速直线运动目标定位仿真

当目标做匀速直线运动时,采用式(8)中的状态矩阵进行自适应滤波,设目标运动速度为 10 m/s,两观测无人机间距对应的圆心角为 90°,

定位仿真结果如图 4~6 所示。

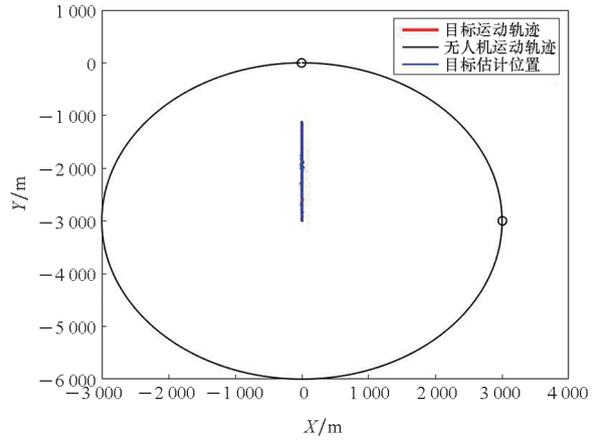


图 4 匀速直线运动目标定位

Fig. 4 Localization process of target in uniform linear motion

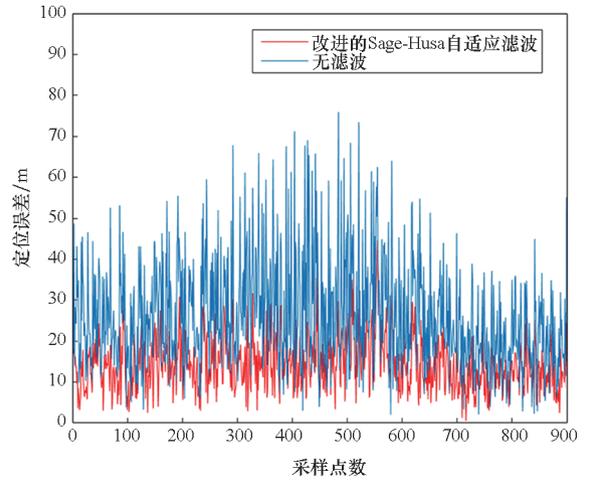


图 5 滤波前后对直线运动目标定位误差的对比

Fig. 5 Localization error comparison of target in uniform linear motion before and after filtering

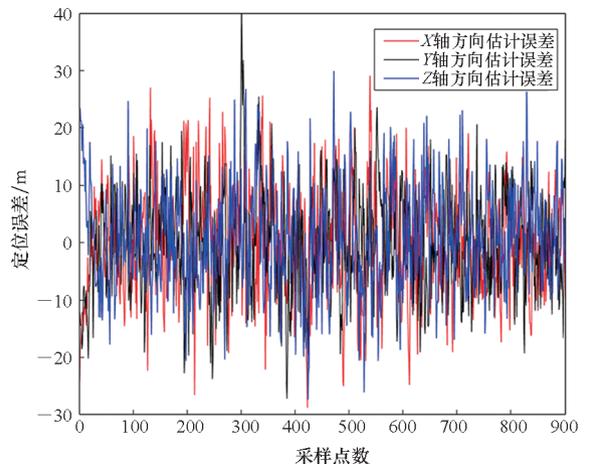


图 6 匀速直线运动目标定位三个坐标轴方向的定位误差

Fig. 6 Localization error of three axis direction for target in uniform linear motion

可以看出,采用双机交会定位方法能够对做匀速直线运动的目标进行精确定位,采用估计点

到真实目标点的距离作为定位误差,无滤波的情况下平均定位误差为 27.17 m,采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法能大大提高定位精度,平均定位误差为 14.69 m。

为研究两无人机间的距离对三维交会定位结果的影响,取不同间距对应的圆心角进行定位仿真,结果如图 7 所示。可以看出,无滤波的定位误差随圆心角的增大而迅速减小,然后趋于稳定。采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法的定位方法在圆心角小于 30°时发散,定位效果不佳;当圆心角大于 60°时,定位误差基本保持不变,圆心角的影响不显著。

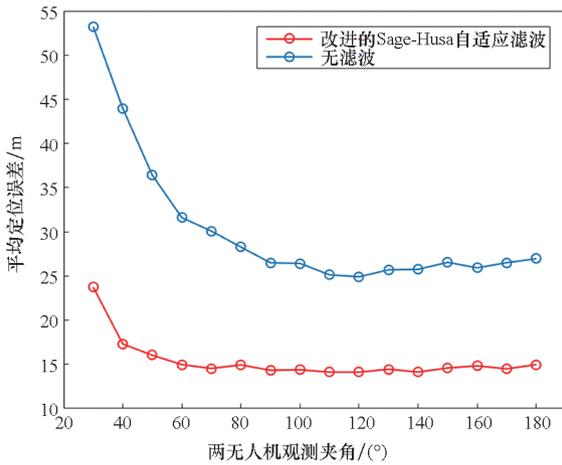


图7 两无人机观测夹角对直线运动目标定位误差的影响

Fig.7 Influence of intersection angle between the two UAVs on localization for target in uniform linear motion

3.2 匀速转弯运动目标定位仿真

当目标做匀速转弯运动时,采用式(9)中的状态矩阵进行自适应滤波,设目标运动角速度为 0.05 rad/s,转弯半径为 500 m,两观测无人机间距对应的圆心角为 90°,定位仿真结果如图 8 ~ 10 所示。

可以看出,采用双机交会定位方法能够对做匀速转弯运动的目标进行精确定位,无滤波的情况下平均定位误差为 27.12 m,采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法能大大提高定位精度,平均定位误差为 14.60 m。

同样取不同间距对应的圆心角进行定位仿真,结果如图 11 所示。可以看出,无滤波的估计误差随圆心角的增大而迅速减小,然后趋于稳定。采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法的定位方法在圆心角小于 30°时发散,定位效果不佳;当圆心角大于 60°时,定位误差基本保持不变,圆心角的影响不显著。也就是说,无论是匀速直线运动

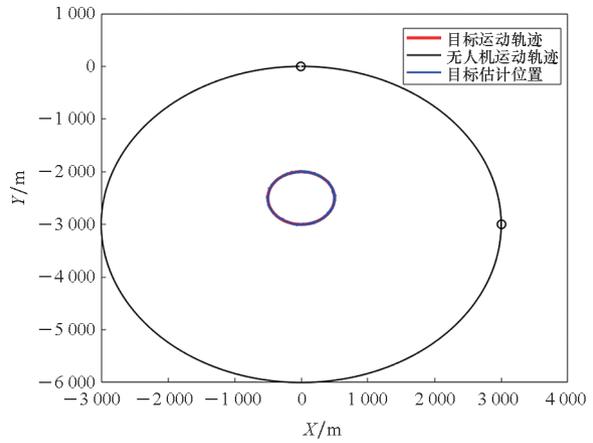


图8 匀速转弯运动目标定位

Fig.8 Localization process of target in uniform turning motion

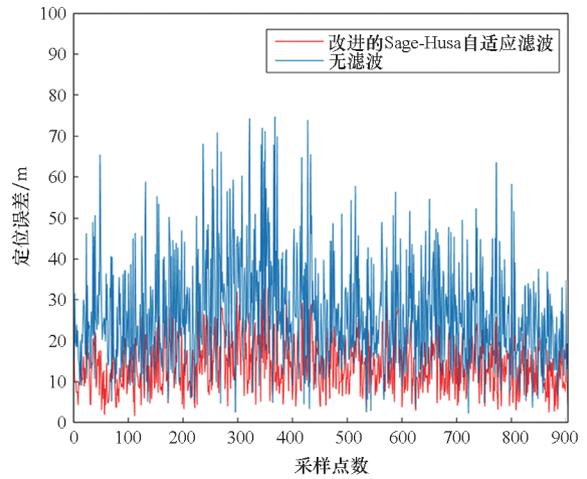


图9 滤波前后对转弯运动目标定位误差对比
Fig.9 Localization error comparison of target in uniform turning motion before and after filtering

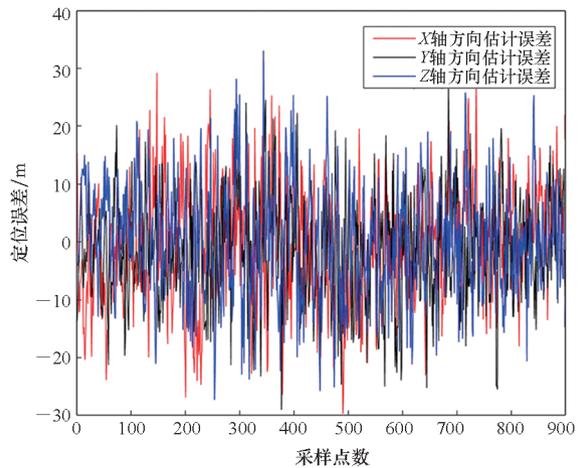


图10 匀速转弯目标定位三个坐标轴方向的定位误差

Fig.10 Localization error of three axis direction for target in uniform turning motion

还是匀速转弯,圆心角对目标三维定位的影响是

相似的。

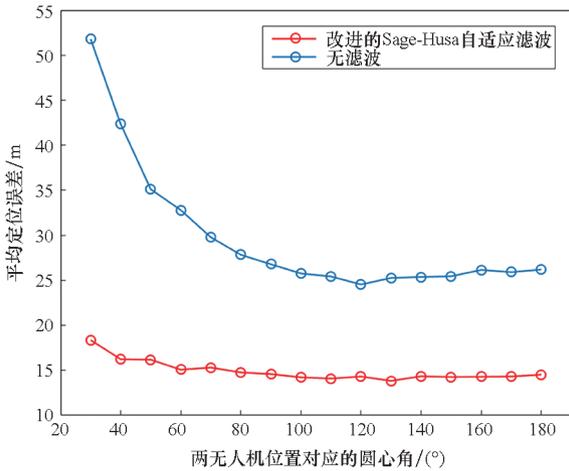


图 11 两无人机位置对应的圆心角对转弯运动目标定位误差的影响

Fig. 11 Influence of intersection angle between the two UAVs on localization for target in uniform turning motion

3.3 基于 IMM 算法的定位仿真

由于目标的运动模型通常难以提前预测,采用基于 IMM 算法的定位方法获取运动目标的三维坐标,该定位方法由两个并行滤波器组成,每个滤波器采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法。对目标在相同条件下进行匀速直线运动和匀速转弯运动仿真,仿真结果如图 12 和图 13 所示。

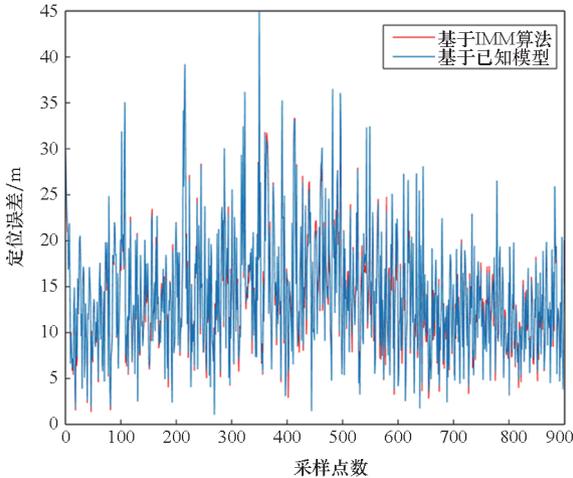


图 12 用已知模型和 IMM 算法对匀速直线运动目标定位的误差对比

Fig. 12 Localization error comparison of target in uniform linear motion using known model and IMM based method

从仿真结果可以看出,基于 IMM 算法的定位方法可以在不事先知道目标运动形式的情况下获得运动目标的三维坐标,其定位误差与基于已知模型的定位方法相当。

为了研究目标运动切换对定位结果的影响,

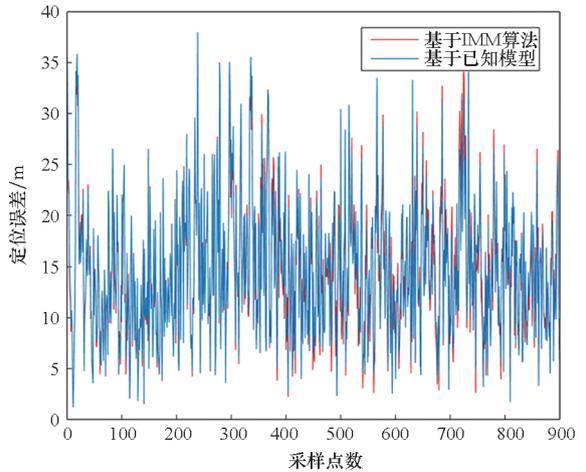


图 13 用已知模型和 IMM 算法对匀速转弯运动目标定位的误差对比

Fig. 13 Localization error comparison of target in uniform turning motion using known model and IMM based method

假设目标先做匀速直线运动,然后做匀速转弯运动,两种运动交替进行。定位结果如图 14 和图 15 所示。可以看出,基于 IMM 算法的定位方法能够对做不同形式运动的目标进行三维定位,目标平均定位误差为 14.62 m,无滤波条件下平均误差为 27.13 m,定位精度与已知运动模型条件下的定位精度相当,但比无滤波条件下的定位精度有较大程度提高,可见该定位方法能够实现未知运动形式目标的高精度定位。

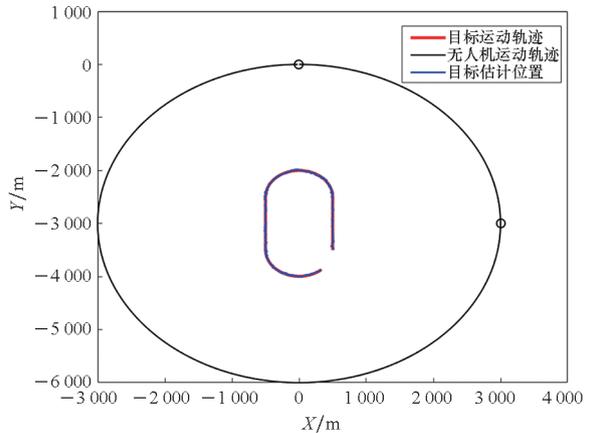


图 14 目标多运动模式切换定位

Fig. 14 Localization process of target with motion switching

4 结论

本文提出不依赖于目标点到无人机的距离信息,利用两架基于视觉的无人机对运动目标进行三维交会定位的方法。采用改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法提高定位精度,针对预先不清楚目标运动形式的问题,采用 IMM 估计器进行定位。

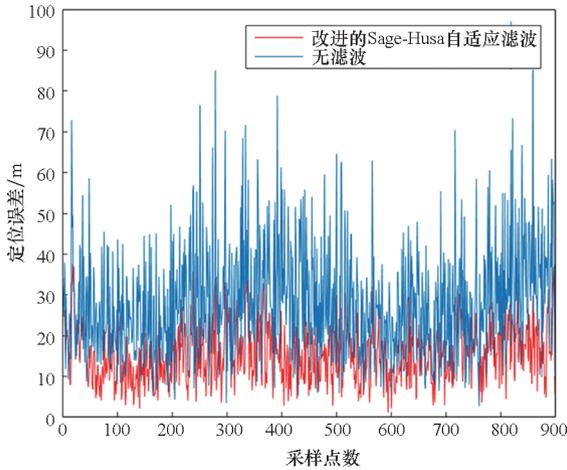


图 15 滤波前后对交替运动目标定位误差对比

Fig. 15 Localization error comparison of target with motion switching before and after filtering

为了评估这些方法的性能,模拟真实观测条件进行仿真。仿真结果表明,本文方法可以实时获得运动目标的精确三维坐标。改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法可以显著提高定位精度,两无人机在 90° 夹角下,平均估计误差从 27.13 m 降低到 14.62 m。仿真中还研究了两无人机观测夹角对定位精度的影响。本文所描述的目标运动都在无人机的观测范围内,未来将继续研究目标运动超出观察范围时无人机的跟踪策略。

参考文献 (References)

- [1] 张笋,朱昱,代李菟,等. 军用无人机技术发展历程、现状及未来应用研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(6): 9-13.
ZHANG S, ZHU Y, DAI L T, et al. Research on development, current situation and future application of military UAV technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(6): 9-13. (in Chinese)
- [2] 周文雅,李哲,许勇,等. 基于双目视觉的无人机编队相对定位算法[J]. 宇航学报, 2022, 43(1): 122-130.
ZHOU W Y, LI Z, XU Y, et al. Relative positioning algorithm of UAV formation based on binocular vision[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(1): 122-130. (in Chinese)
- [3] KINGSTON D B, BEARD R W. Real-time attitude and position estimation for small UAVs using low-cost sensors[C]// Proceedings of AIAA the 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, 2004.
- [4] WHITACRE W, CAMPBELL M, WHEELER M, et al. Flight results from tracking ground targets using SeaScan UAVs with gimballed cameras[C]// Proceedings of American Control Conference, 2007.
- [5] 吴岸平,郭正,侯中喜,等. 不确定环境下无人机区域目标搜索及载荷参数影响[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(4): 35-42.
WU A P, GUO Z, HOU Z X, et al. Area target search and payload parameters influence for UAV in uncertain

- environment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(4): 35-42. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] CAMPBELL M E, WHEELER M. Vision-based geolocation tracking system for uninhabited aerial vehicles[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(2): 521-532.
- [8] 白冠冰,宋悦铭,左羽佳,等. 机载光电平台的对地多目标定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2323-2336.
BAI G B, SONG Y M, ZUO Y J, et al. Multi-target geolocation based on airborne optoelectronic platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2323-2336. (in Chinese)
- [9] 孙聪,贾萌娜,于起峰. 基于仿射近似投影模型的无人机对地目标定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(1): 104-112, 120.
SUN C, JIA M N, YU Q F. Affine approximation projection model based geo-targeting method with unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2022, 30(1): 104-112, 120. (in Chinese)
- [10] 左羽佳,白冠冰,刘晶红,等. 基于机载光电平台的双机交会定位方法[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 146-156.
ZUO Y J, BAI G B, LIU J H, et al. Two-UAV intersection localization based on the airborne optoelectronic platform[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 146-156. (in Chinese)
- [11] WHANG I H, DOBROKHODOV V N, KAMINER I I, et al. On vision-based target tracking and range estimation for small UAVs [C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2005.
- [12] MALLICK M, LA SCALA B F. IMM estimator for ground target tracking with variable measurement sampling intervals[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Information Fusion, 2007.
- [13] GASPAR T, OLIVEIRA P, SILVESTRE C. Model-based filters for 3-D positioning of marine mammals using AHRS-and GPS-equipped UAVs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(4): 3307-3320.
- [14] ZHANG R, LIU H H T. Vision-based relative altitude estimation of small unmanned aerial vehicles in target localization [C]// Proceedings of the American Control Conference, 2011.
- [15] MONDA M J, WOOLSEY C A, REDDY C K. Ground target localization and tracking in a riverine environment from a UAV with a gimballed camera [C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007.
- [16] 贺若飞,田雪涛,刘宏媚,等. 基于蒙特卡罗卡尔曼滤波的无人机目标定位方法[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 435-441.
HE R F, TIAN X T, LIU H J, et al. A UAV target localization approach based on Monte-Carlo Kalman filter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(3): 435-441. (in Chinese)
- [17] ZHANG L L, DENG F, CHEN J, et al. Vision-based target three-dimensional geolocation using unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

- 2018, 65(10): 8052 – 8061.
- [18] BARBER D B, REDDING J D, MCLAIN T W, et al. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air vehicle [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2006, 47(4): 361 – 382.
- [19] PAI P, NAIDU V S. Target geo-localization based on camera vision simulation of UAV [J]. *Journal of Optics*, 2017, 46(4): 425 – 435.
- [20] BAI G B, LIU J H, SONG Y M, et al. Two-UAV intersection localization system based on the airborne optoelectronic platform[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 98.
- [21] 鲁亚飞, 吴岸平, 陈清阳. 无人机对地目标多帧融合定位与误差收敛特性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(2): 66 – 73.
LU Y F, WU A P, CHEN Q Y. Analysis of UAV multi-frame fusion location and error convergence characteristic for ground target [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(2): 66 – 73. (in Chinese)
- [22] 魏伟, 秦永元, 张晓冬, 等. 对 Sage-Husa 算法的改进[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(6): 678 – 686.
WEI W, QIN Y Y, ZHANG X D, et al. Amelioration of the Sage-Husa algorithm [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(6): 678 – 686. (in Chinese)
- [23] 牛振中, 李岁劳, 王青青, 等. 改进的 Sage-Husa 滤波在精确空投组合导航系统中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(25): 6395 – 6400.
NIU Z Z, LI S L, WANG Q Q, et al. Improved Sage-Husa filter for precision airdrop integrated navigation system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12 (25): 6395 – 6400. (in Chinese)
- [24] JOHNSTON L A, KRISHNAMURTHY V. An improvement to the interacting multiple model (IMM) algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49 (12): 2909 – 2923.
- [25] LI X R, JILKOV V P. Survey of maneuvering target tracking. Part V. Multiple-model methods [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41 (4): 1255 – 1321.