

基于纯方位的多无人机协同目标跟踪算法

辛沙欧, 陈可, 宋震林, 桂欣颖, 戚国庆
(南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094)

摘要: 近年来, 仅利用纯方位量测下的多无人机对运动目标进行协同定位与跟踪技术研究受到了广泛关注。在目标位置未知的情况下, 现有的对运动目标的纯方位估计策略以及观测器机动控制策略性能仍不够理想。该文针对多无人机研究了一种用于目标定位的无偏估计器, 以及用于控制多无人机在以目标为中心的圆周上形成等角编队的控制器。提出了一种用于估计目标状态的粗略估计器, 并利用卡尔曼滤波获得了精确的目标状态估计。针对现有的基于方位的控制律进行改善, 基于虚拟交叉算法对控制律进行改进, 得到一种新的基于方位角和目标估计速度的控制律, 确保无人机在以目标为中心且具有指定半径下的圆周上形成等角间隔编队。通过数值仿真, 验证了所提出估计算法的渐近无偏性, 进一步验证了控制误差可收敛为零, 且收敛速率和稳定性优于现有的估计和控制策略。

关键词: 纯方位; 多无人机; 被动跟踪; 分布式控制

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2021)24-0018-06

DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2021.24.004

A algorithm of multi-UAV cooperative target tracking based on only-bearings

XIN Shaou, CHEN Ke, SONG Zhenlin, GUI Xinying, QI Guoqing

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In recent years, cooperative localization and track of moving targets by using bearings-only information of multi-UAV has received extensive attention. But the performances of the existing estimation and control laws for moving agent are still not so satisfactory when the target position is not known beforehand. In this paper, an unbiased estimator for locating the position of the target and a distributed controller for controlling multi-UAV to form an equiangular formation on the circle of goal-orientation are studied. A rough estimator is proposed to estimate the target state, and Kalman filter is used to obtain accurate state of estimated target. The existing control law based on bearing only is improved, and a new control law based on azimuth and the estimated speed of the target is obtained by improving the control law based on virtual cross algorithm, which ensures that multi-UAV form equiangular formation on the circle with the target as the center and the specified radius. The asymptotic unbiasedness of the proposed estimation algorithm is verified by numerical simulation, and the control error can converge to zero, and the convergence rate and stability are better than the existing strategy of estimation and control.

Keywords: only-bearings; multi-UAV; passive tracking; distributed control

近年来, 无人机技术发展迅猛, 广泛应用于各领

域之中。随着电子对抗技术在现代战争中的地位越来越高, 通过获取目标的方位、多普勒变化率、到达

收稿日期: 2020-11-14 稿件编号: 202011079

基金项目: 国家自然科学基金(61871221)

作者简介: 辛沙欧(1995—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生。研究方向: 无人机被动跟踪。

时间等信息确定目标位置的无源定位研究逐渐吸引了更多的关注^[1]。由于成本和重量的限制,无源纯方位传感器被广泛应用于被动跟踪中的无源定位。例如,分布式控制及定位中的纯方位跟踪^[2]、包围控制中的方位或相对视距观测^[3]、无人机编队飞行的视觉导航与跟踪^[4]。纯方位跟踪系统是对目标进行连续观测,积累测角信息,从而获得目标状态的精确估计,包括目标的位置和速度,从而控制观测器进行跟踪^[5]。多站无源组网定位技术作为更加有效的无源定位方法,已经受到国内外科研人员的高度重视^[6]。

针对纯方位目标跟踪问题,文献[7-9]讨论了纯方位下的目标估计策略,其中文献[9]在文献[7]中的估计器基础上加入卡尔曼滤波,得到目标状态的无偏估计,进一步改善了目标估计的精度,为运动目标被动跟踪提供了更多的可能。

随着任务和应用的日益复杂,多无人机协同跟踪问题越来越受到重视。常见的是研究一组移动智能体对未知目标的定位和绕航问题,目的是使智能体以期望的半径围绕目标旋转,并在目标周围形成均匀的队形^[10-13]。Liya Dou等^[11]研究了一组移动智能体基于纯方位测量对静止或者移动目标的定位和包围问题,在文献[7]的估计器基础上,设计了分布式控制率,保证智能体群分别在目标或其邻域周围全局收敛到一个精确的均匀圆形,估计误差和控制误差可以收敛到零的邻域。针对未知目标,J. Shao以及R. Li在不同维度研究了定位与环航问题^[14-15]。

现有的纯方位量测下多无人机协同目标定位与跟踪的估计误差和控制误差只能收敛到零的邻域,而不能收敛到零,尤其是对于快速移动的目标。因此,针对快速移动的目标,如何提高目标估计精度和减小控制误差还有待进一步研究。

该文研究了多无人机在二维环境下围绕一个位置未知的运动目标的控制器设计,以及仅利用方位测量信息的精确目标状态估计器的设计问题。针对文献[7]中的估计器方法,提出了结合卡尔曼滤波的方式,以获得更加精确的目标状态。结果表明,相较于没有滤波的作用,对于运动目标的估计误差收敛到零,而不是零的邻域。针对文献[11]中的控制器设计问题,通过引入虚拟交叉算法,加入目标估计速度项对原有的控制器进行改进,可以保证控制误差收敛到零。最后,仿真结果验证了文中所提出的估计器以及控制律的优越性。

1 预备知识与问题描述

1.1 图论

多无人机系统中 N 个无人机之间的通信情况可以采用无向图 $G=\{V,E\}$ 进行描述,其中 $V=\{1,2,\dots,N\}$ 为无向图节点的集合, $E\subseteq V\times V$ 为无向图的边集。 $A=[a_{ij}]\in R^{N\times N}$ 是加权邻接矩阵,当 $(i,j)\in E, a_{ij}=a_{ji}=1, (i,j)\notin E$ 时, $a_{ij}=0$ 。假设该图没有自循环,则 $a_{ii}=0$ 。节点 i 的所有邻域集合用 $N_i=\{j\in V:(i,j)\in E\}$ 表示。定义图 G 的拉普拉斯矩阵为 $L=[l_{ij}]\in R^{N\times N}$,当 $i\neq j$ 时, $l_{ij}=-a_{ij}$, $l_{ii}=\sum_{j=1, j\neq i}^N a_{ij}$ 。

在图 G 中由节点 i 到节点 j 的路径是以节点 i 为起点,以节点 j 为终点的一系列不同边的组合。如果图 G 的每一对不同的节点都有一条路径,则图 G 是连通的。每个索引 i 都是对 N 求余得到的,例如,索引 $N+1$ 与 1 等价^[16]。

1.2 问题描述

首先,假设无人机可以在固定的高度飞行,因此只关注无人机在二维笛卡尔坐标系下的目标估计与定位。无人机与目标在二维平面下的相对位置如图1所示。目标及其估计位置用“+”表示,无人机的位置用“●”表示。

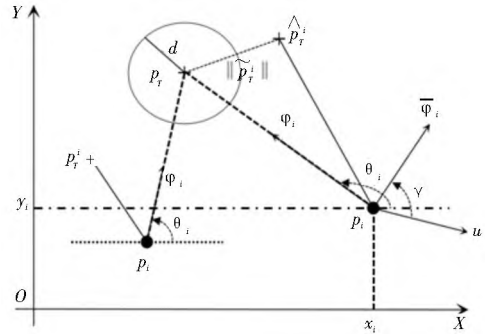


图1 无人机与目标相对位置图形化视图

考虑一个在时间 t 内具有未知轨迹 $p_T(t)=[x_T(t), y_T(t)]^T \in R^2$ 的运动目标,和 N 个具有已知轨迹 $p_i(t)=[x_i(t), y_i(t)]^T \in R^2$ 的无人机,其中 $i\in V$ 。假设每个无人机的运动服从单积分模型:

$$\dot{p}_i(t)=u_i(t) \quad (1)$$

其中, $u_i(t)$ 表示无人机 i 的控制输入。

无人机 i 对目标的估计位置可以表示为 $\hat{p}_T^i(t)=[\hat{x}_T^i(t), \hat{y}_T^i(t)]^T \in R^2$ 。无人机 i 对目标的观测角为

$\theta_i(t) \in [0, 2\pi)$, 与目标相对距离用 $\rho_i(t) = \|p_T(t) - p_i(t)\|$ 表示, 无人机 i 与对目标的估计位置的距离为 $\hat{\rho}_T^i(t) = \|\hat{p}_T^i(t) - p_i(t)\|$, 无人机 i 对目标的估计误差为 $\tilde{p}_T^i(t) = \hat{p}_T^i(t) - p_T(t)$ 。 d 为无人机与目标期望间距, 即期望环航旋转半径。用 $\varphi_i(t) \in R^2$ 表示无人机 i 指向目标的单位方向向量, 则:

$$\varphi_i(t) = \frac{p_i(t) - p_T(t)}{\|p_T(t) - p_i(t)\|} = \frac{p_i(t) - p_T(t)}{\rho_i(t)} \quad (2)$$

$$= [\cos(\theta_i(t)), \sin(\theta_i(t))]^T$$

$\bar{\varphi}_i(t) \in R^2$ 是 $\varphi_i(t)$ 绕 $p_i(t)$ 顺时针旋转 $\pi/2$ 得到的垂直于 $\varphi_i(t)$ 的单位向量。为了方便起见, 假设逆时针旋转方向为正。因此, 无人机 i 到无人机 j 的分离角 $\theta_i^j (i < j)$ 是通过从无人机 i 到目标的射线逆时针旋转直到遇见无人机 j 到目标的射线:

$$\theta_i^j = \theta_j - \theta_i + s, i < j \quad (3)$$

其中, $s = \begin{cases} 0, \theta_j(t) \geq \theta_i(t) \\ 2\pi, \text{otherwise} \end{cases}$, 另外也定义分离角

$$\theta_i^j = -\theta_j^i, i < j。$$

为了设计一个分布式定位方案, 利用纯方位测量值来估计目标的未知位置 $p_T(t)$, 然后设计基于局部测量的分布式控制律, 从而实现以下目标:

①估计误差收敛到0, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{p}_T^i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{p}_T^i(t) - p_T(t)) = 0, i \in V \quad (4)$$

②无人机 i 与目标之间的距离收敛到指定的相同环航半径, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \|p_T(t) - p_i(t)\| = d, i \in V \quad (5)$$

③一组无人机按照等角均匀分布在以目标为中心的指定半径的圆周上, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_i^{i+1}(t) = 2\pi/N, i \in V \quad (6)$$

该文主要工作是基于以下假设进行实现的:

假设 1: 存在正常数 u_0 使得对于 $t > 0$ 时 $\|\dot{p}_T(t)\| \leq u_0$, 且保证任一无人机 i 的速度满足 $\|\dot{p}_T(t)\| < \|\dot{p}_i(t)\|$ 。

假设 2: 通信拓扑 G 是无向连通的。

假设 3: 所选择的 $p_i(0)$ 、 $p_T(0)$ 以及 $\hat{p}_T^i(0)$ 能够使得 $\rho_i(0)$ 、 $\hat{\rho}_T^i(0)$ 以及 $\|\tilde{p}_T^i(0)\|$ 是有限的。

2 算法设计

已知多无人机跟踪位置未知的移动目标是一个估计和控制的综合问题, 因此这一部分, 尝试同时为

每个无人机构造估计器和控制器^[17-19]。

为了定位未知目标, 首先为每个无人机提出如下协作的估计器:

$$\dot{\hat{p}}_T^i = k(I - \varphi_i(t)\varphi_i(t)^T)(p_i(t) - \hat{p}_T^i(t)), i \in V \quad (7)$$

其中, k 是正常数, $\varphi_i(t)\varphi_i(t)^T$ 是向量 $\varphi_i(t)$ 的投影矩阵。目标与无人机之间的几何位置关系如图 2 所示。

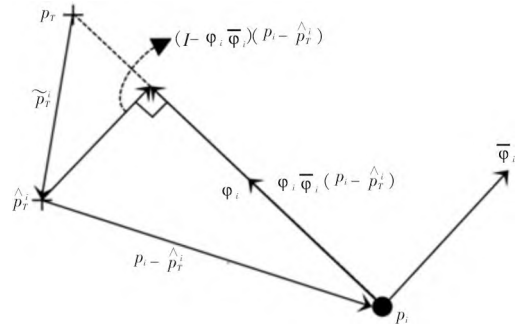


图2 无人机与目标之间的几何位置关系图

然后, 基于无人机对目标的估计位置以及邻居节点的角度测量信息为每个无人机设计如下控制器:

$$u_i(t) = k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t) + (\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\bar{\varphi}_i(t) \quad (8)$$

其中, k_d 、 α 是设计参数, 分离角误差

$$\tilde{\theta}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\theta_i^j - \frac{2\pi(j-i)}{N}), i \in V。$$

例如, 当 $N=5$ 时, 期望无人机能够在以目标为中心的具有指定半径的圆周上形成如图 3 所示的等角编队。

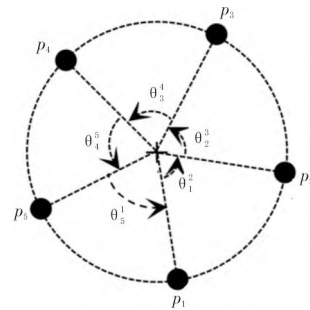


图3 5个无人机期望队形示意图

控制输入 $u_i(t)$ 由两部分组成。径向项 $k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t)$ 控制无人机移动到指定的环航跟踪半径的圆周上, 切向项 $(\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\bar{\varphi}_i(t)$ 则保证各个无人机之间按照指定的角度分布在以目标为中心的圆周上。另外, 因为切向项依赖于各个无人机的期望距离, 因此当目标期望距离较小时, 可以避免过高的角速度。

引理 3.1^[9]:在基于虚拟交叉算法^[14]的式(7)估计器下,卡尔曼滤波得到的估计误差 $\tilde{X}_T^{i\text{kal}}(t) = X_T(t) - \hat{X}_T^{i\text{kal}}(t)$,在 $t \rightarrow \infty$ 时是渐近无偏的。其中 $\hat{X}_T^{i\text{kal}}(t) = [\hat{p}_T^{i\text{kal}}(t), \dot{\hat{p}}_T^{i\text{kal}}(t)]$ 。

引理 3.2^[11]:假设目标是静止状态,在式(7)估计器和式(8)控制器下,一组无人机将收敛于以目标为圆心,半径为 d 的圆周上,即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\rho_i(t) \rightarrow d$ 。

引理 3.3^[11]:假设目标是静止状态,在式(7)估计器和式(8)控制器下,如果无向拓扑 G 是树结构,则一组无人机将按照指定分离角度分布在以目标为中心的具有指定半径的圆周上,对于 $i \in V$,当 $t \rightarrow \infty$ 时,满足 $\theta_i^{i+1}(t) = 2\pi/N$ 。

3 稳定性分析

根据引理 5^[11],对于一个运动的目标,在式(7)估计器和式(8)控制器下,无人机 i 与目标的相对距离的控制误差收敛到一个半径有限的区域,但不是收敛到零。因此,提出下列控制器:

$$\bar{u}_i(t) = k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t) + (\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\varphi_i(t)^T + \dot{\hat{p}}_T^{i\text{kal}} \quad (9)$$

推论 1:对于运动目标,式(9)控制器下无人机 i 的环航跟踪半径控制误差 $\hat{\rho}_T^i(t) - d$ 一致收敛到零。

证明:定义图 1 所示的笛卡尔坐标系为 C1,定义以目标 $p_T(t)$ 为原点的参考坐标系为 C2。则无人机在 C2 坐标系下的相对于目标的运动速度可以描述为:

$$\begin{aligned} v_{ri}(t) &= \dot{p}_i(t) - \dot{p}_T(t) = \bar{u}_i(t) - \dot{p}_T(t) \\ &= k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t) + (\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\varphi_i(t)^T + \dot{\hat{p}}_T^{i\text{kal}} - \dot{p}_T(t) \end{aligned} \quad (10)$$

根据引理 3.1,卡尔曼估计值 $\hat{X}_T^{i\text{kal}}(t) = [\hat{p}_T^{i\text{kal}}(t), \dot{\hat{p}}_T^{i\text{kal}}(t)]$ 是渐进无偏的。

$$\begin{aligned} E(v_{ri}(t)) &= E(k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t) + (\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\varphi_i(t)^T + \dot{\hat{p}}_T^{i\text{kal}} - \dot{p}_T(t)) \\ &= E(k_d(\hat{\rho}_T^i(t) - d)\varphi_i(t) + (\hat{\rho}_T^i(t)\tilde{\theta}_i + \alpha)\varphi_i(t)^T) \\ &= E(u_i(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

因此,原来的环航编队控制问题可以转化为 C2 坐标系下一组无人机环航跟踪静止目标,根据引理 3.2,一组无人机将收敛于以目标为圆心,半径为 d 的圆周上,即当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\rho_i(t) \rightarrow d$ 。证毕。

推论 2:对于运动目标,在式(9)控制器下,如果无向拓扑 G 是树结构,则一组无人机将按照指定分

离角度分布在以目标为中心的圆周上,对于 $i \in V$,当 $t \rightarrow \infty$ 时,满足 $\theta_i^{i+1}(t) = 2\pi/N$ 。

证明:基于推论 1 的证明,在 C2 坐标系下一组无人机环航跟踪静止目标的问题,可以根据引理 3.3,使得无人机之间的分离角按照 $2\pi/n$ 分布在指定半径的圆周上。

4 仿真验证

4.1 动力学模型选择

为了能够得到目标更精确的估计位置,参考文献[9]在式(7)估计器引入卡尔曼滤波。首先,选择目标动力学模型相关参数为:

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma w(k) \\ Z(k) = HX(k) + v(k) \end{cases} \quad (12)$$

$$X(k) = [x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k)]^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & (\Delta t)^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} (\Delta t)^2/2 \\ \Delta t \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$H = [1 \quad 0 \quad 0]$$

其中,采样时间 $\Delta t = 0.1$ s, x, \dot{x}, \ddot{x} 分别是估计目标的位置、速度以及加速度。假设模型噪声 $w(k)$ 和外界干扰 $v(k)$ 是均值,且为 0,方差分别为 $E[w(k)w(l)] = q^2\delta(k, l)$, $E[v(k)v(l)] = R^2\delta(k, l)$ 的高斯白噪声, $\delta(k, l)$ 是狄利克雷函数, $q = 0.2, R = 0.2$ 。

4.2 低速目标仿真对比

低速目标以文献[11]中的目标轨迹 $v_T(t) = [0.2, 0.1(\cos(0.3t) + 1)]^T$ 为例,在该文引入卡尔曼滤波的式(7)估计器和式(9)控制器下,选择参数 $k = 5, k_d = 1, \alpha = 0.5$ 时,环航半径 $d = 10$,无人机初始位置任意,轨迹图如图 4(a)所示,估计误差、收敛半径以及分离角情况如图 4(b)、(c)、(d)所示。

通过图 4 可以看出,添加滤波以及补偿项的控制策略,能够有效地使一组无人机在以目标为中心且具有指定半径的圆周上形成等角编队。将该次仿真结果与相同参数条件下的文献[11]中的估计控制策略进行比较,以无人机 1 的估计误差、收敛半径以及分离角的收敛情况为例,结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出加入滤波后的估计策略收敛速度更快且能够全局渐近收敛到指定位置,控制误差更小。

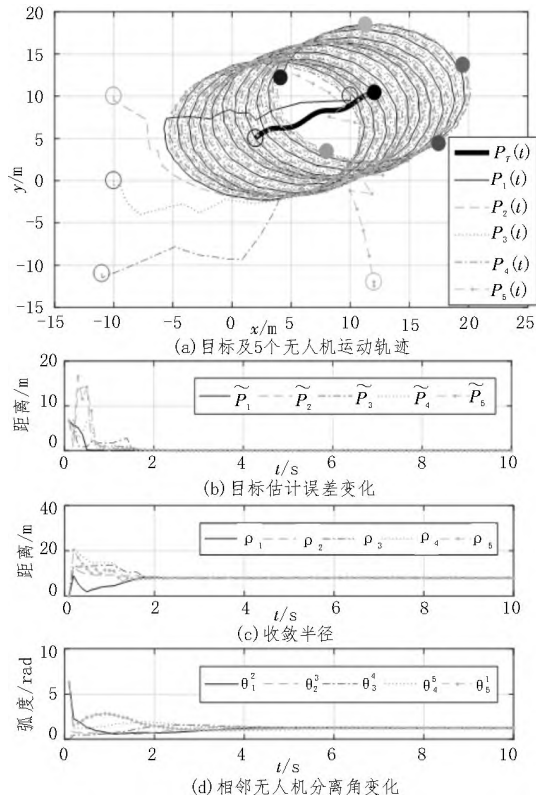


图4 低速目标在滤波控制策略下的仿真结果图

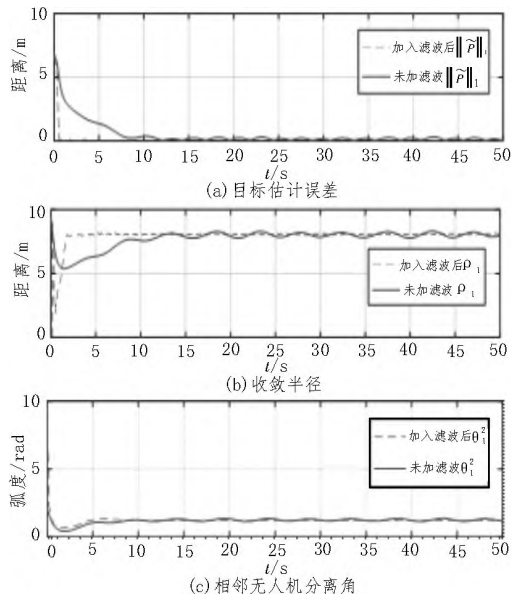


图5 低速目标两种方法结果对比图

4.3 快速目标仿真对比

快速目标以文献[7]中的目标轨迹 $v_T(t)=[1, \cos(0.1t)+1]^T$ 为例,在相同动力学模型下,引入滤波方法。在式(7)估计器与式(9)控制器的作用下,选择参数 $k=5, k_d=1, \alpha=0.5$ 时,环航半径 $d=8$,无人机初始位置任意,轨迹图如图6(a)所示,估计误差、收敛半径以及分离角情况如图6(b)、(c)、(d)所示。

计误差、收敛半径以及分离角情况如图6(b)、(c)、(d)所示。

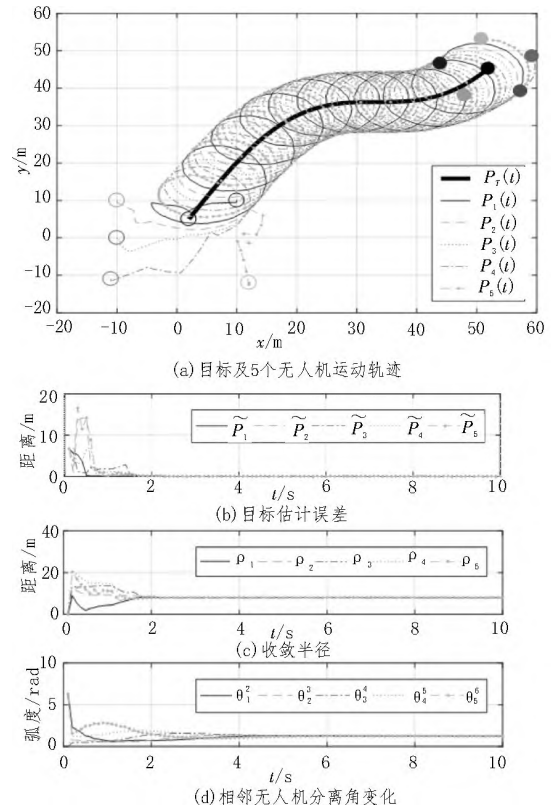


图6 快速目标在滤波控制策略下的仿真结果图

通过图6可知,添加滤波以及补偿项的控制策略针对高速目标也有良好的跟踪性能。通过两组仿真结果对比可知,在目标速度加快且估计策略相同的情况下,引入滤波的方式所得到的估计误差显著减小,半径收敛误差减小,分离角也收敛到 $2\pi/5$,如图7所示。

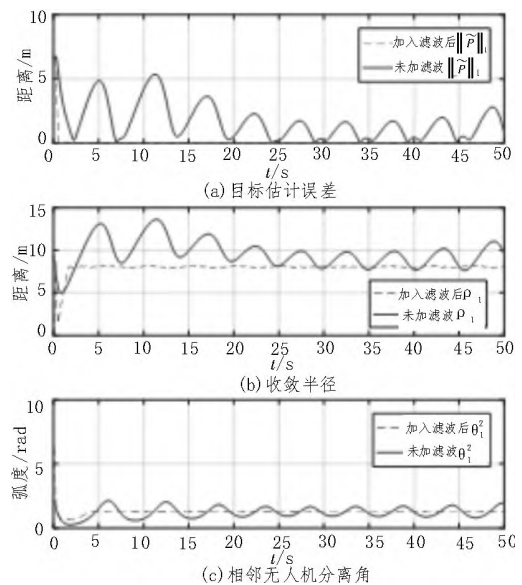


图7 快速目标两种方法结果对比图

5 结 论

该文主要研究了纯方位量测下多无人机协同目标跟踪问题,讨论了一种具有无偏估计误差的卡尔曼滤波器在多无人机协同跟踪中的应用,基于虚拟交叉定位算法对现有控制律加入估计目标速度进行改进,保证多无人机在目标周围形成以目标为中心具有指定半径的等角圆形编队。与现有的纯方位量测下多无人机协同跟踪方法进行了比较,仿真结果表明,不管是低速还是快速目标,所提出的算法能显著提高目标状态估计的精度,并减小了控制误差。

参考文献:

- [1] 高擎峰.多无人机被动目标定位与跟踪技术研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [2] Zhao S Y,Zelazo D.Bearing-based distributed control and estimation of multi-agent systems[C].2015 European Control Conference(ECC),2015:15-17.
- [3] Liu Y F,Wang Y H.Theory and experiment of enclosing control for second-order multi-agent systems[J].IEEE Access,2020(8):186530-186539.
- [4] Zhao S Y,Li Z H,Ding Z T.Bearing-only formation tracking control of multiagent systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2019,64(11):4541-4554.
- [5] Chu X Y,Liang Z C,Li Y Y.Trajectory optimization for rendezvous with bearing-only tracking[J].Acta Astronautica,2020(171):311-322.
- [6] 邢益临.机载无源雷达组网定位技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [7] Deghat M,Shames I,Anderson B D O,et al. Localization and circumnavigation of a slowly moving target using bearing measurements[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2014,59(8):2182-2188.
- [8] Deghat M,Xian L,Anderson B D O,et al.Multi-target localization and circumnavigation by a single agent using bearing measurements[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2015,25(14):2362-2374.
- [9] Qi G Q,Li Y Y,Sheng A D.Virtual intersecting location based uav circumnavigation and bearings-only target tracking techniques[J].Information Sciences:An International Journal,2019,505:14-39.
- [10] Shao J,Tian Y.Multi-target localisation and circumnavigation by a multi-agentsystemwithbearing measurements in 2d space[J].International Journal of Systems Science,2018,49(1):15-26.
- [11] Dou L,Song C,Wang X,et al.Distributed target localization and enclosing control for mobile agents with bearing measurements[C].In 12th Asian Control Conference,2019:1161-1166.
- [12] Zheng R,Liu Y,Sun D.Enclosing a target by nonholonomic mobile robots withbearing-only measurements[J].Automatica,2015(53):400-407.
- [13] Boccia A,Adaldo A,Dimarogonas D V,et al.Track- ing a mobile target by multi-robot circumnavigation using bearing measurements[C].In IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control,2017: 1076-1081.
- [14] Bao Y M,Shi Y J,Li R,et al.Circling over a target based on bearing-onlymeasurement[C].Wuhan, Pro- ceedings of the 37th Chinese Control Conference, 2018:7136-7140.
- [15] Li R,Shi Y.Localization and circumnaviga- tionof multiple agents along an unknown target based on bearing-only measurement:a three dimensional so- lution[J].Automatica,2018(94):18-25.
- [16] Lu M B,Liu L.Leader-following consensus of second-order nonlinear multi-agent systems sub- ject to disturbances[J].Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2019,20(1): 88-94.
- [17] 武岳龙,钟凡,高月,等.基于无人机三维影像技术的铁路信号设备自动巡检系统设计[J].自动化与仪器仪表,2020(12):85-88.
- [18] 沈思源,李震霄,孙伟.基于改进Camshift的无人机目标跟踪算法研究[J].微电子学与计算机,2019, 36(11):76-83.
- [19] 彭福先,张伟,祝晓军,等.基于激光点云精确定位的输电线路无人机自主巡检系统研究[J].智慧电 力,2019,47(7):117-122.