

大机动多旋翼无人机的轨迹预测拦截算法

孙铭会¹, 边静远², 车嘉兴³, 舒振杰⁴

(1. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 优联智控(北京)技术有限公司, 北京 101318; 3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 4. 中国航空工业集团有限公司 中国航空综合技术研究所, 北京 100073)

摘 要: 针对未经许可的拒止无人机在限飞区域内的安全风险以及其难以被反制的问题, 提出了利用一架无人机对无证无报备无人机进行高速拦截的算法。本文算法使用导航、控制架构来解决这个问题。导航方面, 通过相机与激光雷达的结合, 实现了低成本的全向感知, 并通过对高精度低频率的激光雷达数据与高频率低精度的视觉数据进行融合, 得到精确的目标位置估计与追踪。控制方面, 采用基于轨迹预测的动态权限分配控制方法, 以实现对大机动无人机的有效反制。最终, 通过实验及仿真验证了本文算法的有效性, 结果表明: 对不小于 12 m/s 的拒止无人机的锁定成功率大于 90%, 拦截成功率高于 85%。

关键词: 智能控制与机器人; 轨迹预测; 融合感知; 位置估计

中图分类号: TP391.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)10-3416-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240040

Trajectory prediction and interception algorithm for large maneuvering multi-rotor UAV

SUN Ming-hui¹, BIAN Jing-yuan², CHE Jia-xing³, SHU Zhen-jie⁴

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. Unilink Intelligent Control (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 101318, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. China Aero-Polytechnology Establishment of AVIC, Beijing 100073, China)

Abstract: Aiming at the security risk of the unauthorized rejected UAV in the restricted flying area, and the problem that it is difficult to counter, this paper proposes an algorithm to use a UAV to intercept the unlicensed and uninformed UAV at high speed. Our algorithm uses a navigation and control architecture to solve this problem. In the aspect of navigation, low-cost omnidirectional perception was realized through the combination of camera and laser radar. Through the fusion of high precision and low frequency lidar data and high frequency and low precision vision data, accurate target position estimation and tracking are obtained. In the control aspect, the dynamic authority allocation control method based on trajectory prediction is used to realize the effective countermeasures against the large maneuvering UAV. Finally, the

收稿日期: 2024-01-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0601301).

作者简介: 孙铭会(1983-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 计算机应用与技术, 计算机视觉, 智能人机交互.

E-mail: smh@jlu.edu.cn

effectiveness of the proposed algorithm is verified by experiments and simulations. It is verified that the proposed algorithm can lock the denied UAV with a success rate of more than 90% and intercept the UAV with a success rate of more than 85%.

Key words: intelligent control and robotics; trajectory prediction; fusion perception; position estimation

0 引言

近年来,多旋翼无人机迅速发展和普及,未经许可的无人机的广泛使用给社会带来严重的管理与安全问题,因此针对拒止,对多旋翼无人机的反制是近年来的热点研究问题之一。

基于文献[1,2]提出的GPS诱骗方案,通过反无人机电磁枪定向干扰GPS与遥控信号,切断无人机与控制器间的信号通道,令飞行目标坠落。GPS欺骗器的瞄准多为非自主,其综合拦截成功率较低;无法反制基于VIO或LIO的可拒止飞行的无人机,而这正是当今无人机发展的主要趋势;且因电磁信号会随距离衰减,其反制距离较近,通常不超过300 m。基于多旋翼平台的精确拦截方案,Yang等^[3]提出了低成本的基于视觉伺服的无人机拦截方案,该方案采用了视觉伺服方案,完成了1 m/s与2 m/s的目标拦截试验验证,视觉伺服存在的问题是对目标的空间位置解算存在过大的误差,仅通过视觉导航的拦截器无法应对大机动目标。Marina等^[4]提出了非合作无人机拦截的方案,该方案采用动捕系统获得目标位置,以增强比例导引作为控制律,实现拦截的控制。该方案的主要问题在于,动捕为室内预设场景,实验条件过于理想化;比例导引及其衍生的增强比例导引对过载要求高,且无法应对末端导引过程目标的大机动,因此其拦截速度受到限制,实验为6 m/s,现阶段四旋翼无人机可以快速突破10 m/s的机动速度,该方案在这样的场景下无法应对。潘翔宇等^[5]提出了基于微分几何的预测控制律方法,其应用场景为弹道导弹拦截,该方案的计算方式对弹目信息的获取要求过高,难以实际应用,而且仅对方案进行了仿真实验,因此并不适用于本文的应用场景。

综上所述,传统的无人机反制方案存在无法反制可拒止飞行(VIO、LIO导航)的无人机问题,同时存在难以锁定目标、反制距离近、脱靶率高的问题;新兴的基于多旋翼平台的精确拦截方案大多数未经过实验验证,整体处于理论阶段或仅能

处理低速目标,因此本文提出的一种新型的无人机反制方法,对军事、交通监控等领域高机动无人机反制的研究有重大意义。

为了解决上述问题,本文提出用于拦截最大机动状态下无人机的轨迹预测拦截方法,用于反制空中高机动的可拒止飞行的无人机。本文算法创新地使用了视觉和激光雷达两种传感器对空中目标进行融合感知,采用EKF对两种不同频率的传感器数据进行组合导航估计,实现低延迟的目标与拦截器的状态精准估计;本文算法创新地采用了全新的基于轨迹预测的拦截方法,通过预测命中点提高对大机动目标的拦截成功率,采用动态权限分配技术,实现持续最大速度对目标高速拦截。经实验验证,本文算法可以显著提高目标锁定成功率,降低拦截脱靶率。

1 目标位置估计

准确的目标位置估计是实现拦截的前提,在本节中,在假设系统被零均值高斯白噪声影响并且测量模型的协方差已知,通过扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman filter, EKF)估计目标位置。本节采用具有6个状态量的通用线性匀速模型描述探测目标运动特性。通过视觉与激光雷达两种传感器完成低成本的全向感知,最后通过EKF估计目标位置和相应的协方差。

1.1 视觉目标检测与激光雷达目标检测

本文采用Yolo-V5-n^[6]进行识别,Yolo-V5采用CSPNet主干结构,运算效率高,训练样本小。n模型与现阶段其他同精度网络模型相比,其有最快的处理速度,这能够很好地满足飞行平台对快速响应的要求。视觉目标检测输出识别的box框,box框描述了其在像素点中的位置与大小,通过对其转换得以估计其真实坐标。

激光雷达的工作原理是向目标发射探测信号(激光束),然后通过对接收到的从目标反射回来的信号(目标回波)与发射信号进行比较处理,以获得目标的完整位置与姿态信息^[7]。激光雷达获

取的数据为点云数据,点云数据边缘特性差,不适用于直接用于目标识别。激光雷达感知流程如图 1 所示,通过视觉检测框,可以得到探测目标的方位角,对指定方位角的点云进行聚类,其质心坐标即识别目标的真实坐标,激光雷达的识别精度为厘米级。

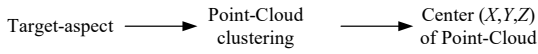


图 1 激光雷达感知流程

Fig. 1 Flow chart of lidar perception

1.2 组合目标位置估计

视觉信息通过深度学习推理后得 box 框^[6],根据 box 框在图像的像素位置估计物体的真实坐标,对位置量微分则可获得测量目标的速度信息。

视觉测量频率较高,但误差较大;激光雷达测量可以获得较高精度的目标位置信息,但其频率较低^[7]。通过激光雷达可以补偿测量精度,本文采用基于此的组合目标位置估计,视觉测量结果与激光雷达测量结果分别序列化输入估计模型,以实现高频、高精度的目标位置估计。

表 1 传感器参数

Table 1 Parameter of sensor

Sensor	Update rate	Measurements
Camera	30 Hz	Position
Lidar	10 Hz	Position

1.2.1 过程模型

对于刚体目标的位置估计,过程模型的系统状态向量由位置 $\boldsymbol{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T \in \mathbb{R}^3$,速度 $\boldsymbol{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T \in \mathbb{R}^3$ 表示,因此状态量被定义为 $\boldsymbol{x} = [p_x \ p_y \ p_z \ v_x \ v_y \ v_z]^T \in \mathbb{R}^6$,连续过程模型则可以写成:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{v} \\ \dot{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{n}_a \end{cases} \quad (1)$$

其离散非线性方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{n}_k \\ \boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{x}_{k+1}$ 为式(1)中状态量的离散化表示; $\boldsymbol{F}$ 为状态转换矩阵,描述了系统状态如何随时间演变; T_s 为系统采样时间。

1.2.2 测量模型

视觉测量频率为 30 Hz,远高于激光雷达的 10 Hz(见表 1)。本节对不同频率的测量量进行

序列化处理^[8],测量模型以每个传感器的单独形式表示。

成像原理根据 1.1 节内容可以写为:

$$\boldsymbol{p}_j = G(u, v, f, \text{Size}_{\text{real}}) \quad (3)$$

式中: u 和 v 为像素点; f 为相机焦距; $\text{Size}_{\text{real}}$ 为测量物体的实际尺寸,依此估计物体的真实位置 $\boldsymbol{p}_j$,构成视觉测量。

根据式(3),其测量模型为:

$$\boldsymbol{z}_k = h(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{n}_m \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{z}_k$ 为根据测量点得到的位置测量输出; $\boldsymbol{n}_m$ 为测量过程噪声,假设为协方差为 $\boldsymbol{R}_k$ 的高斯白噪声。

1.2.3 EKF 与序列化测量更新

组合位置估计模型如图 2 所示。

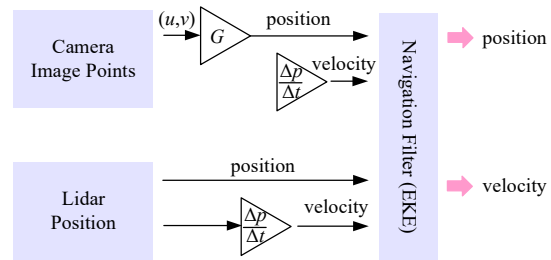


图 2 组合位置估计模型

Fig. 2 Fused position estimation model

本节采用 EKF^[9,10]对目标无人机状态变量进行估计。EKF 通常包括初始化、先验估计与测量更新 3 个环节。目标位置估计的 EKF 过程如下。

先验状态估计与协方差传播方程为:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1|k-1} \\ \hat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{P}_{k-1|k-1}\boldsymbol{F}^T + \boldsymbol{Q}_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1}$ 为对 k 时刻的先验状态估计,它是基于上一时刻的最优估计来预测当前时刻的结果; $\hat{\boldsymbol{x}}_{k-1|k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的后验状态估计值,是上一时刻的最优估计; $\hat{\boldsymbol{P}}_{k|k-1}$ 为 k 时刻的先验估计协方差,它表示状态估计的不确定性; $\boldsymbol{P}_{k-1|k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的后验估计协方差; $\boldsymbol{Q}_{k-1}$ 为状态预测的过程噪声。

测量更新方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^T(\boldsymbol{R}_k + \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^T)^{-1} \\ \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k} = \hat{\boldsymbol{x}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k[\boldsymbol{z}_k - h(\boldsymbol{x}_{k|k-1})] \\ \boldsymbol{P}_{k|k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k)\boldsymbol{P}_{k|k-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{K}_k$ 为卡尔曼增益矩阵; $\boldsymbol{H}_k$ 为观测模型矩阵,它将状态空间映射到测量空间; $\boldsymbol{R}_k$ 为测量噪声协方差矩阵,它表示测量值的不确定性; $\hat{\boldsymbol{x}}_{k|k}$ 为 k 时刻

的后验状态估计值,它是结合了预测值和测量值的最优估计; z_k 为 k 时刻的测量值向量; I 为单位矩阵。

激光雷达序列化测量更新与延迟补偿:对 x 的估计中,存在因测量频率不同而产生的传感器延迟,需要使用延迟补偿状态计算激光雷达位置和速度对应的测量估计分量:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [z_k - \hat{z}_k] \\ \hat{z}_k = h(\hat{x}_{k-L}) \\ L = \frac{\text{Aiding sensor latency}}{T_s} \end{cases} \quad (7)$$

2 轨迹预测拦截

无人机在面临拦截威胁时的瞬间机动一般为满舵面加速运动,即机体坐标系下的定加速机动。最大升力、最大横滚、最大俯仰都可达到最大速率,最大机动约等于圆周运动。基于此本文提出了对无人机大机动轨迹的命中点预测与最大速度拦截过程中动力的动态控制权限分配方法。

2.1 命中点预测

将运动轨迹离散化后,目标轨迹如图3所示。 k 表示时刻, p_k 、 V_k 分别为当前目标位置与运动速度,则相对于 k 时刻, $k+1$ 时刻的目标位置可以表示为:

$$p_{k+1} = p_k + V_{k+1} \cdot \Delta t \quad (8)$$

在 k 时刻目标的位置也可以采用积分表示:

$$p_k = p_0 + \sum_{n=1}^k V_n \cdot \Delta t \quad (9)$$

在经历 n 个步长后拦截到目标,则可以表示为:

$$\Delta t \cdot n = \frac{d}{\bar{v}_{\text{interceptor}}} \quad (10)$$

在实际的拦截中,拦截器通常以最大加速度迅速加速到预设的拦截速度,拦截过程可以看作限速为 v_l 的定速飞行,目标位置为 $p_k = (x_l, y_l, z_l)$,则对任意 k 步长有:

$$v_l \cdot k \Delta t = d_{k0} \quad (11)$$

设当前时刻为 $k\Delta t$,还有 $k\Delta t + T$ 为拦截器与目标相遇时刻,求解此过程可得:

$$\begin{cases} aT^2 + bT + c = 0 \\ \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_l^2 - v_{kx}^2 - v_{ky}^2 - v_{kz}^2 \\ 2v_l^2 k \Delta t - 2\Delta x v_{kx} - 2\Delta y v_{ky} - 2\Delta z v_{kz} \\ v_l^2 T^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

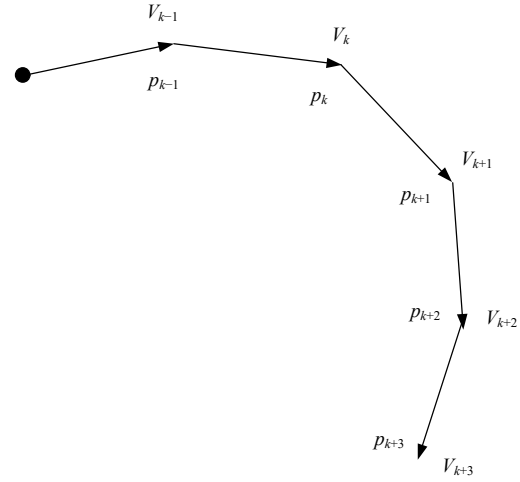


图3 目标运动轨迹

Fig. 3 Target motion trajectory

求解上式即可得到距离拦截时间的剩余步长 T 。依此完成对命中点的预测。对于未来时刻的目标速度则通过速度估计可得, $k+1$ 时刻速度可以通过 k 时刻速度左乘旋转矩阵 R 估计而得, R 为基于最小二乘法的速度预测矩阵:

$$V_{k+1} = R V_k \quad (13)$$

2.2 动态控制权限分配方法

为了在保持飞行器最大推力速度下消除拦截器当前位置与期望命中点之间的位置误差,设计动态控制权限分配^[11]。对于拦截器,控制其飞行方向为预测命中点方向,速度为预测命中点计算的速度(即最大速度),则飞行状态为:

$$\begin{cases} |\vec{v}| = v_{\max} \\ \vec{v} / |\vec{v}| = \vec{v}_{\text{target_predict}} - \vec{v}_{\text{interceptor}} \end{cases} \quad (14)$$

对于多旋翼飞行器,每个执行器的推力信号为:

$$T = \eta_x T_{\text{roll}} + \eta_y T_{\text{pitch}} + a_1 \eta_z T_{\text{yaw}} + a_2 T_{\text{tot}} T_{\text{hover}} \quad (15)$$

式中: η_x 、 η_y 、 η_z 为三轴效率系数; T_{roll} 、 T_{pitch} 、 T_{yaw} 为姿态控制输出推理分量; a_1 、 a_2 为耦合权重系数; T_{tot} 为理论总推力归一化项; T_{hover} 为悬停推力。

由于多旋翼无人机的动态特性,不同控制通道的响应需求不同。航向与垂直通道的自然响应较慢,不需要高带宽和速率的控制信号,而俯仰与横滚通道涉及飞行器的姿态,对挂载设备的稳定性起主要作用,因此需要优先考虑。动态控制权限分配通过优化算法调整 a_1 、 a_2 的数值实现, a_1 、 a_2 数值为1时不牺牲控制器性能,通过边界搜索,发现有可能触碰到执行器边界的执行器则降低该

执行器 a_1 、 a_2 的数值,从而起到暂时缓解姿态通道压力的目的。

算法 1 动态控制权限分配算法

```

1:  $a_1 = 1$ 
2:  $a_2 = 1$ 
3: for N 1 to MAXITER do
4: for i 1 to NACT do
5: if ( $T_i > T_{MAX}$ ) and ( $T_{tot} T_{hoveri} > 0$ ) then
6:  $\lambda_i = T_{MAX} - (\eta_x T_{rolli} + \eta_y T_{pitchi} + a_1 \eta_z T_{yaw_i}) / T_{tot} T_{hoveri}$ 
7: else
8:  $\lambda_i = 1.0$ 
9:  $a_2 = \min(\lambda)$ 
10:  $a_2 = \max(a_2, \min(T_{limit} T_{MAX}, T_{tot}, 1))$ 
11: for i 1 to NACT do
12: if ( $T > T_{MAX}$ ) and ( $\eta_z T_{yaw_i} > 0$ ) then
13:  $\lambda_i = T_{MAX} - (\eta_x T_{rolli} + \eta_y T_{pitchi} + a_2 T_{2tot} T_{hoveri}) / \eta_z T_{yaw_i}$ 
14: else
15:  $\lambda_i = 1.0$ 
16:  $a_1 H = \min(\lambda)$ 
17: for i 1 to NACT do
18: if ( $T < T_{MIN}$ ) and ( $\eta_z T_{yaw_i} < 0$ ) then
19:  $\lambda_i = T_{MIN} - (\eta_x T_{rolli} + \eta_y T_{pitchi} + a_2 T_{2tot} T_{hoveri}) / \eta_z T_{yaw_i}$ 
20: else
21:  $\lambda_i = 1.0$ 
22:  $a_{21} L = \min(\lambda)$ 
23:  $a_1 = \min(a_1 L, a_1 H)$ 

```

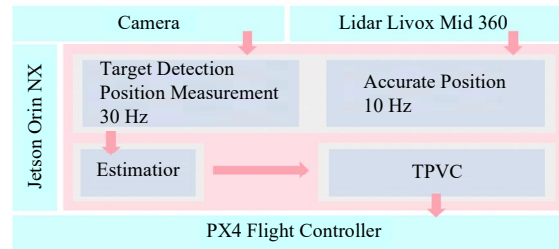
如算法 1 所示,边界搜索程序依次比较搜索可行的 a_1 、 a_2 ,然后迭代搜索,本课题的动态权限分配技术能够让控制器信号在振动情况下仍然保持良好的对称性,从而进一步抵抗外来干扰,以稳定实现控制目标。

3 实验设置及结果分析

3.1 实验基本设置

为了有效评估本文方法的可行性、准确性和实用价值,进行了一系列实验:①针对组合位置估计方法,本文采用 Python 仿真的方式证明了其有效性;②针对轨迹预测拦截方法,本文采用了实验的方式对其进行了验证,实验采用高速 UVC 摄像头与 Livox Mid 360 激光雷达作为传感器(无人机的上方与前方),采用 Jetson Orin NX 作为机载 AI 计算平台,采用 ROS^[12] 架构实现接口之间通信,无人机采用 PX4 作为飞控硬件,并通过 RVIZ 进行数据可视化,通过 MATLAB 对飞行数据进行了分析,基于实验成本的考量,采用无人机反制研究常用的气球拦截的方式进行拦截打击实验^[3],

拦截机采用 Unionsys-350,350 mm 轴距的无人机可以满足不小于 300 g 载荷下的高速飞行,携带气球的靶机采用云卓 MX450。经实测,大疆 Mavic 3、云卓 MX450 等民用无人机极速均为大约 12 m/s,本文实验采用的 Unionsys-350 飞行极速为 20 m/s,实验设置限速 12 m/s(与靶机速度相同)。



(a) 实验架构



(b) 实验拦截机

图 4 实验架构和实验拦截机

Fig. 4 Experiment frame and experiment interceptor UAV

3.2 数据融合与估计的有效性

在数据融合实验中,本文采用 10 s、30 Hz 的螺旋曲线模拟无人机机动,摄像头定位误差通过向真实数据添加均值 10 cm 的高斯噪声实现;激光雷达定位误差通过向真实数据添加均值 1 cm 的高斯噪声实现。图 5 展示了带误差的由摄像头解算的目标位置与位置估计后的目标运动曲线,可见其数据平滑,接近目标真实运动轨迹,数据融合算法收敛,且具有准确性。图 6 展示了序列化融合估计处理后对整体估计性能的提升,估计精度大约提高了 30%。

3.3 命中点预测与拦截的有效性

实验对 12 m/s 螺旋机动的模拟目标进行轨迹预测与拦截,拦截机起飞后锁定目标,对轨迹进行了预测,并成功完成拦截。

实验实测对空中目标的检测 50% 置信度火控锁定成功率 99.4%。图 7 展示了拦截过程中的

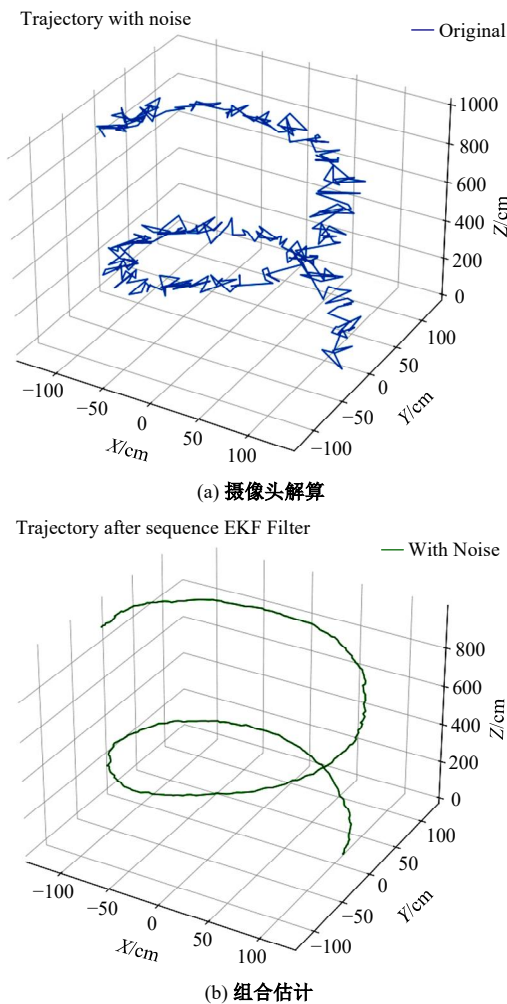


图 5 摄像头解算位置和组合估计位置
Fig. 5 Target position computed by camera and estimated position

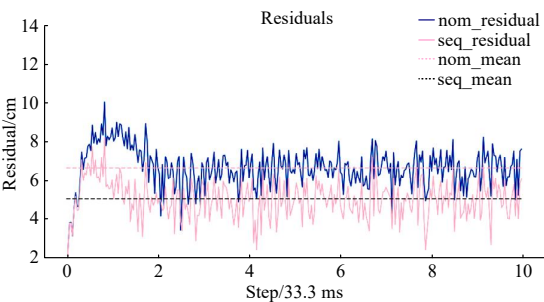


图 6 雷达数据对估计精度的提升
Fig. 6 Improvement of estimation accuracy by radar data

目标锁定,图 8 展示了预测的命中点(绿色为预测命中点,紫色点为无人机速度控制目标点,设置在预测命中点后方 5 m)。在第一阶段无人机起飞,其预测命中点为大致拦截方向,第二阶段进入末端,预测命中点接近拦截点,第三阶段完成拦截。

图 9 展示了进入拦截状态后的拦截器与目标的运动轨迹。通过视觉锁定后的目标仍然可以通过激光雷达进行锁定,通过融合估计实现了全向感知。本实验验证了本文算法的高速拦截性能。

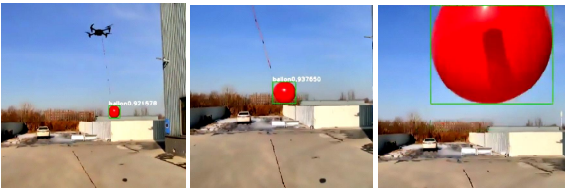


图 7 目标锁定
Fig. 7 Target lock-on

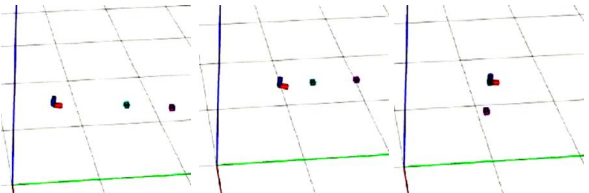


图 8 预测的命中点
Fig. 8 Predicted point

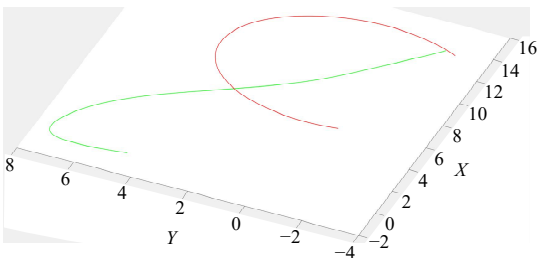


图 9 拦截轨迹图
Fig. 9 Trajectory of intercept

表 2 比较了本文算法与常用对撞方案的速度性能、感知角度、锁定成功率。表 3 展示了本实验的成功率,在仿真中所有拦截均成功,在实飞中由于气球在风中有较大抖动,且由于无人机桨叶对气流的影响,部分情况下气球会在接近桨叶时发生剧烈抖动导致一次拦截失败,由于激光雷达感知的全向性质,在一次拦截失败后算法会进行重规划,对目标重新进行拦截,直至拦截成功,实测

表 2 与现有方法的比较

Table 2 Comparison with existing methods			
拦截方式	拦截速度 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	感知角度 $/(^{\circ})$	锁定成功率 $/\%$
视觉伺服 ^[3]	2	120	75.23
光电吊舱+ PN制导律 ^[4,13]	<8	120	—
融合感知+ 轨迹预测拦截	>12	360	99.4

一次拦截成功率大于 85%。

表 3 仿真与实验的成功率

Table 3 Success rate of simulation and experiment

项目	一次拦截成功率/%	多次拦截成功率/%
仿真	100	100
实飞	>85	100

4 结束语

本文提出了一种用于拦截大机动无人机状态下的轨迹预测方法,在目标的大机动情况下有很好的适用性。本文采用的目标检测方案与传统光电吊舱方案相比,具有小型化、低成本的全向感知,目标不易丢失,且计算量较低。本文采用视觉与激光雷达两种传感器进行组合位置估计的方法实现对探测目标的感知,相对于传统的光电吊舱方案,其成本较低且体积较小,达到整体载荷小于 300 g,质量远小于现有的带激光测距的双光吊舱(约 1 kg);相对于常用的视觉感知方案,激光雷达可以通过组合位置估计带来高精度补偿。本文设计了轨迹预测的方法,以及基于此方法最大速度下的动态权限分配,并通过实验验证了其在高速目标大机动情况下的收敛性与有效性。实验表明本文方法可以有效解决最大机动状态下高速拒止无人机难以拦截的问题。从创新性上讲,本文方法在无人机拦截领域创新地融合了两种态势感知的方式,并采用轨迹预测的算法实现了拦截精度的提升,而且提出了一种高性能低成本的拦截载荷搭配方案,在性能指标与经济实用性方面均实现了创新性提升。

参考文献:

- [1] Jansen K, Tippenhauer N O, Pöpper C, et al. Multi receiver GPS spoofing detection: error models and realization[C]//The 32nd Annual Conference on Computer Security Applications, Suzhou, China, 2017: 237-250.
- [2] 陈立军, 潘正军, 陈孝如. 无人机 GPS 欺骗干扰攻击对策[J]. 全球定位系统, 2023, 48(4): 91-98.
Chen Li-jun, Pan Zheng-jun, Chen Xiao-ru. UAV GPS spoofing jamming attack countermeasures[J]. GNSS World of China, 2023, 48(4): 91-98.
- [3] Yang K, Quan Q. An autonomous intercept drone with image-based visual servo[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2020: 2230-2236.
- [4] Marina M, Endre P, Rodrigo V. Interception of Non-Cooperative UAVs[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Würzburg, Germany, 2019: 120-125.
- [5] 潘翔宇, 胡小敏, 刘琨. 基于预测命中点的微分几何制导律[J]. 电光与控制, 2021, 28(7): 41-47.
Pan Xiang-yu, Hu Xiao-min, Liu Kun. Differential geometric guidance law based on predicted hit point [J]. Electro-Optics and Control, 2021, 28(7): 41-47.
- [6] Wang M, Yang W Z, Wang L J, et al. FE-YOLOv5: feature enhancement network based on YOLOv5 for small object detection[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2023(90): No. 103752.
- [7] Yang Z T, Sun Y N, Liu S, et al. 3DSSD: point-based 3D single stage object detector[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, USA, 2020: No. 01105.
- [8] Seung M O, Eric J. Development of UAV navigation system based on unscented Kalman filter[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Keystone, USA, 2006.
- [9] Vasconcelos J F, Oliveira P, Silvestre C. Inertial navigation system aided by GPS and selective frequency contents of vector measurements[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Francisco, USA, 2005.
- [10] Kingston B, Derek B. Implementation issues of real-time trajectory generation on small UAVs[D]. Provo: Brigham Young University, 2004.
- [11] Che J X, Irene G, Cao C Y. Integrated flight/structural mode control for very flexible aircraft L1 adaptive output feedback controller[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Minneapolis, USA, 2012: 1-19.
- [12] Quigley M, Gerkey B P, Conley K, et al. ROS: An open-source robot operating system [J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Xi'an, China, 2009: 1-6.
- [13] Tao H, Lin D F, He S M, et al. Optimal terminal-velocity-control guidance for intercepting non-cooperative maneuvering quadcopter[J]. Field Robotics, 2022, 39: 457-472.