

基于单目视觉的无人机目标定位方法研究

宋俊^{1,2,3}, 郑会龙^{2,4}, 袁建平¹, 于子平^{2,4}, 周东琦³

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

3. 滨州魏桥国科高等技术研究院, 山东 滨州 256600;

4. 轻型涡轮动力全国重点实验室, 北京 100190)

摘要: 针对传统无人机单目视觉定位对先验背景信息高度依赖的问题, 提出一种无需目标先验尺寸信息的无人机单目视觉目标定位方法; 基于深度学习目标检测技术锁定目标以实时获取目标在相机画幅中的位置信息; 通过综合无人机运动信息和画幅中目标的宽高变化计算目标距离, 并用最小二乘拟合进行修正; 建立目标定位几何关系及坐标转换模型, 根据机载传感器与实际空间的比例对应关系来确定目标在相机坐标系下的位置; 结合无人机自身定位将目标位置转换为 WGS-84 坐标系下的经纬高信息; 在 ROS 框架下进行无人机单目视觉目标定位软件在环仿真, 仿真结果表明, 所提方法能够在缺乏有源高精度测距的环境下, 仅通过视觉对目标进行较高精度的测距定位。

关键词: 无人机; 目标定位; 单目视觉; 目标检测; 坐标变换

Research on Target Ranging and Localization Methods for UAVs Based on Monocular Vision

SONG Jun^{1,2,3}, ZHENG Huilong^{2,4}, YUAN Jianping¹, YU Ziping^{2,4}, ZHOU Dongyi³

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Binzhou Weiqiao Guoke Advanced Technology Research Institute, Binzhou 256600, China;

4. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Light-duty Gas-turbine, Beijing 100190, China)

Abstract: To address the issue of traditional unmanned aerial vehicles (UAVs) highly relying on prior background information for monocular visual positioning, a novel monocular visual target localization method for UAVs without the prior size information of targets is proposed. The method utilizes deep learning-based target detection technology to lock in the target, thereby obtaining its real-time positional information within the camera frame. The target's distance is calculated by integrating the UAV's motion data and the scale changes of the target within the frame, with a refinement through least squares fitting. A geometric relationship for target positioning and a coordinate transformation model are established. The target's position within the camera coordinate system is determined based on the proportional relationship between the on-board sensors and the actual spatial dimensions. By integrating the UAV's localization, the target's location is transformed into geographic coordinates in the WGS-84 coordinate system. To validate the effectiveness of the proposed method, the loop simulation for the UAV monocular visual target positioning software is conducted under the ROS framework, and simulation results demonstrate that with a lack of active high-precision ranging environment, the method can achieve high-precision ranging and localization of targets through vision.

Keywords: UAV; target localization; monocular vision; object detection; coordinate transformation

收稿日期:2024-04-25; 修回日期:2024-05-29。

作者简介:宋俊(1999-),男,硕士研究生。

通讯作者:郑会龙(1973-),男,博士,研究员,博士生导师。

引用格式:宋俊,郑会龙,袁建平,等. 基于单目视觉的无人机目标定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 215-222, 253.

0 引言

无人机具有灵活机动性强、成本低廉和隐蔽性能好等优点,被广泛应用于抵近侦察、空中打击等军事领域任务^[1]。对战场目标的精确定位是无人机军事应用中最重要方面之一^[2],在协同联合、新域新质作战模式大力发展的当下,获得目标位置信息对于把握战场态势、做出战略战术决策等方面有着重要意义^[3]。

无人机目标定位技术通过将机载传感器采集到的多源数据综合处理,以获得待测目标在指定坐标系中的精确三维坐标,根据采集过程是否主动发射辐射,可将其分为有源定位方法和无源定位方法^[4]。有源目标定位方法主要利用激光指示器或者红外传感器进行测距,结合无人机导航信息进行定位,然而其定位精度高度依赖于机载传感器,成本较高、小型化困难且降低了无人机自身隐蔽性^[5]。

利用视觉方法对目标进行无源定位解算越来越受到重视^[6]。基于基准图匹配的定位方法利用航拍获取目标区域图像与基准图进行配准后获得目标坐标位置^[7],但需要预先制备基准图因而具有一定局限性;基于单目视觉多点测量的目标定位通过在多个位置对目标进行测量,仅需无人机自身位姿和目标视觉信息便能进行定位,具有抗干扰能力强、安全性高的优点^[8-9]。单目视觉因具有结构简单、成本低、算法简单速度快等优势而受到广大学者关注,文献 [10] 基于已知标志参数利用无人机单目摄像头对农田飞艇进行定位,文献 [11] 矫正无人机图像畸变后根据参考物尺寸对设施间进行相对定位,文献 [12] 通过建立不同视角下坦克姿态字典库进行模板匹配从而实现单目图像的测距定位。以上传统基于单目视觉的定位方法都需要知道目标的尺寸参数或场景先验信息,这对于变幻莫测的战场环境非常不利。

针对以上问题,本文提出了基于单目视觉的无人机目标定位方法,根据目标在图像画幅中的尺寸变化与无人机运动数据近似线性特性的基本假设,研究目标到无人机的深度信息获取方法进而计算其相对位置,进一步实现目标相对坐标到大地坐标系下真实坐标的转化,最终获取到目标的精准导航位置信息。该方法不需要目标的先验尺寸信息或背景环境的基准图,也不会主动发射辐射源,能够快速准确地实现对目标定位解算,适用于小型无人机在未知环境下的抵近侦察。

1 目标信息获取与单目测距实现

1.1 基于深度学习的目标信息获取

对目标进行测距定位的前提是已经能够明确分辨出目标,并且在无人机静止或运动状态下,能够实时获取更新目标状态信息。采用计算机视觉方法是检测并获取目标信息的首选方案,传统的基于图像特征的方法如

Viola Jones、HOG、DPM 时间复杂度高^[13-15],面对目标特征多样鲁棒性低,而基于深度学习的目标检测方法精度高、速度快,能够实时高效地获取目标包围框,指导后续测距定位。

基于深度学习的目标检测技术主要分为以 RCNN 系列为代表的二阶段检测方法和以 YOLO (You Only Look Once) 为代表的单阶段检测方法^[16],前者检测精度高但对运算能力有着较高要求,后者将分类和回归一次完成,在牺牲一定检测精度的条件下提高了检测速度。无人机机载计算平台往往面临着算力有限的问题,因此在这一约束下需要尽可能提高检测帧率以达到实时性要求。

YOLO 是 Redmon 等人^[17]在 2016 年提出的一种基于深度学习的 one-stage 目标检测算法,与传统目标检测方法相比,YOLO 具有更快的检测速度和更好的准确性,其核心思想是将目标检测问题转化为一个回归问题^[18]。由于 YOLOv5-Lite 算法采用 shufflenetv2 作为主干特征提取网络替换 YOLOv5 的 CSPDarknet53,进一步减少了参数量,使用深度可分离卷积代替普通卷积,在轻量化的同时仍然能够保持较高的检测性能,适合部署在实时性较高、算力资源受限的设备上,图 1 为 YOLOv5-lite 网络结构图。

YOLOv5-lite 网络结构包含输入端 (Input)、骨干网络 (Backbone)、颈部网络 (Neck) 和预测 (Prediction) 共 4 个部分,在输入端采用 Mosaic 数据增强对输入图片进行随机缩放、随机裁剪和随机排布的方式进行拼接,增大网络鲁棒性的同时提高对小目标的检测效果,并且使用自适应锚框 (Anchor) 计算减少迭代网络参数;在 Backbone 部分去除了 Focus 以避免多次采用 slice 操作占用大量缓存,相对地造成通道数减少信息损失增加,因此本文加入 Conv-BatchNorm-ReLU 结构使得梯度在训练过程中更加稳定并提升网络训练速度,同时增加网络的非线性特性而不影响卷积层捕捉到的特征,此外,通过 SEnet (Squeeze-and-Excitation Networks) 引入通道注意力机制,对卷积层输出中各个通道的重要性进行动态调整,提高卷积神经网络处理小目标检测任务时的精度和效率;在 Neck 部分,YOLOv5-lite 使用 FPN+PAN 结构优化内存的访问和使用,进一步提高特征提取的能力;在 Prediction 部分采用 CIoU Loss 作为预测框回归损失函数,使用非极大值抑制去除冗余的检测框,提高检测结果的准确性。

为验证改进后的 YOLOv5-Lite 模型性能,将该模型与其他基于深度学习的主流目标检测算法模型进行对比,使用包含一个类别 11 451 张图片的自制坦克目标数据集,在相同实验环境下不同模型检测结果如表 1 所示。

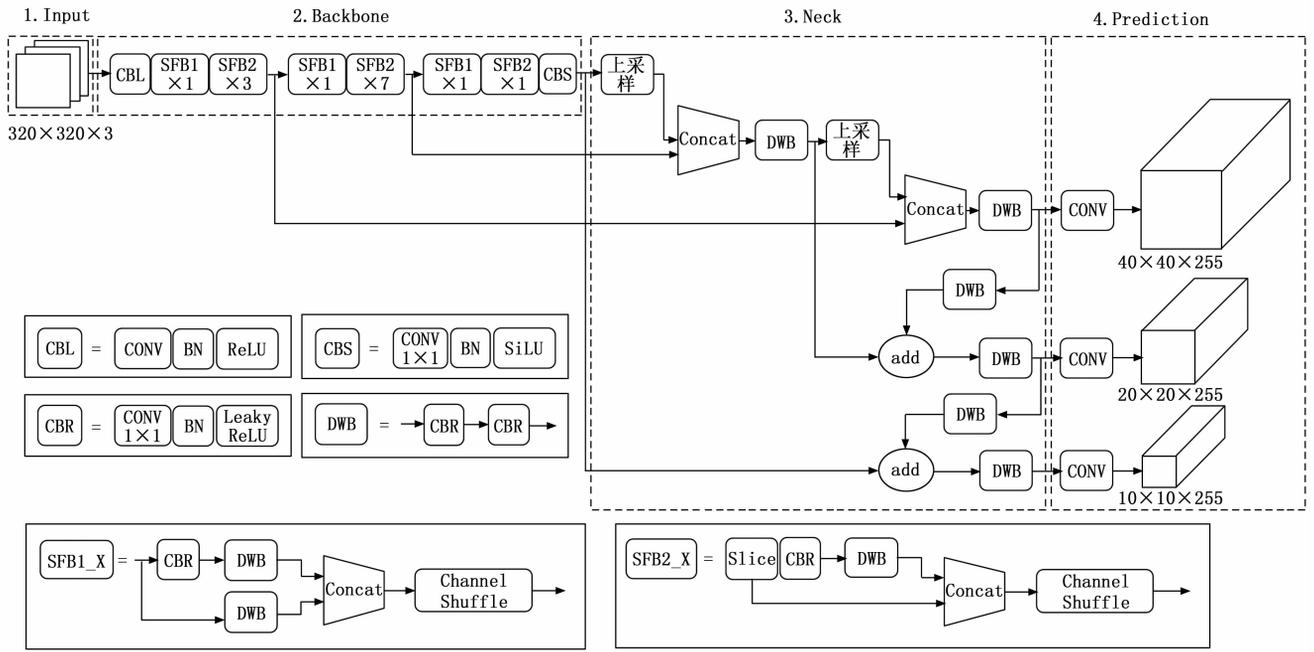


图 1 YOLOv5-Lite 网络结构图

表 1 不同模型结果对比

检测模型	准确率 / %	召回率 / %	平均准确率 / %	检测速度 / (f · s ⁻¹)
改进后的 YOLOv5-Lite	93.3	92.5	93.1	156.1
YOLOv5-Lite	91.2	90.3	90.5	140.5
YOLOv4-Tiny	88.4	87.4	85.9	165.2
YOLOv5s	90.1	89.5	89.6	106.5
Faster R-CNN	91.7	91.2	90.8	31.8

由表 1 可知, 改进后的 YOLOv5-Lite 模型相比原模型在加快检测速度的同时也提升了准确率和召回率。YOLOv4-Tiny 的检测速度最快但检测精度相对差, 容易出现错检、漏检等状况, Faster R-CNN 检测精度高但由于是二阶段模型, 运算速度远远低于 YOLO 系列的单阶段模型, 改进后的 YOLOv5-Lite 在精度较高的基础上有着不俗的检测速度, 适合部署在无人机平台上。

无人机搭载单目摄像头, 将获取到的图像实时传送给机载计算机进行目标检测, 若检测到目标便生成目标包围框, 输出目标的类别、置信度, 进一步可获得目标图像包围框的宽高以及中心坐标信息, 结合图像画幅大小便能计算出目标相对画幅中央的偏移值。图 2 为目标检测获取到的信息示意图。

图中“tank”和“0.90”指示目标种类和置信度, w 和 h 是目标包围框的宽度与高度, 用于描述目标尺度变化, Δx 和 Δy 是目标包围框中心坐标偏移图像中心的值, 表征出目标在图像画幅中的位置, 根据以上信息及其变化特征便能进行目标测距和相对定位。



图 2 目标检测信息获取

1.2 单目视觉测距实现方法

单目测距的前提是通过相机将测距目标投影在成像平面, 而相机获取图像基本原理是小孔成像^[19]。相机小孔成像过程便是把三维空间中的点向二维数字图像坐标系中成像平面的投影转换过程, 即世界坐标系到图像坐标系 (或像素坐标系) 的转换^[20], 可用以下公式表示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X & Y \\ Z_i & Z_i \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中: f_x 和 f_y 是相机 x 方向和 y 方向像素表示的焦距, c_x 和 c_y 表示图像中心点, X 和 Y 对应相机坐标系深度 Z_i 处目标的图像坐标 x 和 y , 深度 Z_i 是相机沿着光轴 Z_c 到离目标最近的垂直于光轴平面的距离, 根据公式可得 x 和 y 表达式:

$$x = \frac{f_x X}{Z_i} + c_x, y = \frac{f_y Y}{Z_i} + c_y \quad (2)$$

当无人机沿着光轴向目标靠近时, 目标在图像帧中的大小逐渐增大, 表现为所占像素逐渐增多, 目标包围框尺寸也随之增大, 如图 3 所示。

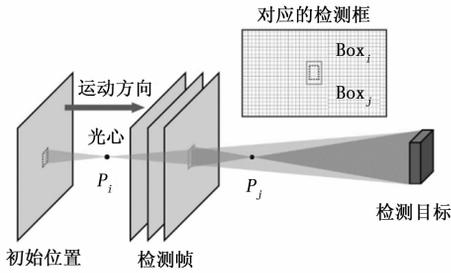


图 3 相机运动与检测框变化图

相机从 P_i 位置向 P_j 位置运动过程中, 检测框 Box_i 逐渐扩大到 Box_j , 由此可以建立起目标在二维图像坐标系中宽度 w_i 与三维现实中宽度 W 的关系:

$$w_i = x_{Ri} - x_{Li} = \frac{f_x X_{Ri}}{Z_i} + c_x - \frac{f_x X_{Li}}{Z_i} - c_x = \frac{f_x W}{Z_i} \quad (3)$$

其中: x_{Li} 和 x_{Ri} 是图像中目标包围框左右坐标值, 对应 3D 空间中实际物体的 X_{Li} 和 X_{Ri} , 在小时间尺度内, 对无人机来说目标朝向无人机的宽度 W 为常数, 因此在 i 时刻的 $w_i Z_i$ 与 j 时刻的 $w_j Z_j$ 都等于常数 $f_x W$, 加入相机在两个时刻下的位置信息, 能够建立起相机位置变化与目标距离的关系:

$$Z_i + C_{Zi} = Z_j + C_{Zj} \quad (4)$$

即 Z_i 的变化只由相机位置变化引起, 联立式 (3) 与式 (4) 能够得到计算目标距离公式:

$$w_i Z_i = w_j (Z_i + C_{Zi} - C_{Zj}) = f_x W \quad (5)$$

$$Z_j = \frac{C_{Zj} - C_{Zi}}{\left(\frac{w_j}{w_i}\right) - 1} \quad (6)$$

公式 (6) 根据目标包围框的尺寸信息变化 $\frac{w_j}{w_i}$ 和相机在 Z_c 光轴上运动位置信息变化 $(C_{Zj} - C_{Zi})$, 能够计算出 j 时刻目标到相机的距离 Z_j 。其中, $\frac{w_j}{w_i}$ 可以替换成用 $\frac{h_j}{h_i}$ 表征的高度变化, 为了不丢失画面提供的尺度信息, 结合这两者来表征随着相机运动目标在画幅中的映射变化更具优势; 由于相机和无人机是固连的, 因此 $(C_{Zj} - C_{Zi})$ 可通过由无人机自身位置改变记录获取, 可以用本地坐标系的坐标值变化值表示。

在实际应用中, 相机运动测量和目标检测会存在误差, 因此在获取一定初始数据之后, 通过合并之前所有的 n 个观测值, 利用最小二乘法对观测数据进行拟合修正, 使得基于检测的深度估计更加准确且提高鲁棒性。对于前 n 个观测值, 将式改写为 $w_j Z_j - f_x W = w_j (C_{Zj} - C_{Zi})$, 同理依据检测框高度尺度变化可得 $h_j Z_j - f_x H = h_j (C_{Zj} - C_{Zi})$ 。至此, 可联系前 n 次观测值将深度估计 Z_j 的计算表示为线性方程 $Ax = b$ 的形式:

$$\begin{bmatrix} w_1 & 1 & 0 \\ h_1 & 0 & 1 \\ w_2 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_j \\ -f_x \hat{W} \\ -f_y \hat{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 (C_{Zj} - C_{Zi}) \\ h_1 (C_{Zj} - C_{Zi}) \\ w_2 (C_{Zj} - C_{Zi}) \\ \vdots \\ h_n (C_{Zj} - C_{Zi}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解 \hat{Z}_j 作为深度 Z_j 的最小二乘近似值, 对观测值进行滤波处理, 减小随机误差提高测距精度进而用于后续目标定位。

2 单目视觉目标定位方法

2.1 坐标系建立

无人机通过各传感器数据对目标进行定位过程中, 涉及许多姿态与位置的转变, 建立合适的坐标系是进行定位解算的基础。本文从目标信息的获取到最后输出绝对位置, 共建立了 7 个坐标系, 分别是像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系、载机坐标系、载机地理坐标系、地心空间直角坐标系以及大地坐标系。

无人机上搭载的摄像头将获取到的图像信息首先呈现在 COMS 传感器上, 画幅中的尺度信息由像素坐标系 $O-uv$ 和图像坐标系 $O-xy$ 分别用像素单位和物理单位来表征, 这两种坐标系定义在像平面, 坐标轴 u, v 和坐标轴 x, y 的方向定义是一致的, 而像素坐标的原点在影像左上角, 公制的像平面坐标的原点定义为像主点即画幅中央。相机坐标系 $C(O_c - X_c Y_c Z_c)$ 将三维世界的场景映射到二维影像中, 相机坐标系与像素坐标系和图像坐标系的关系如图 4 所示。

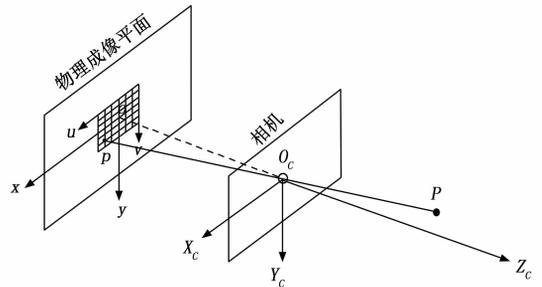


图 4 相机成像坐标系

P 为空间上一点, 其反射自然光可视为光源, 从 P 点发出的光沿直线传播通过光心 O_c 被相机传感器接收, 在成像平面上呈现为点 P' , 相机坐标系原点在相机光心处, X 轴和 Y 轴平行于相面的两边, Z 轴为光轴与相平面垂直。

载机坐标系 $B(O_b - X_b Y_b Z_b)$ 与飞行器固连, 是无人机惯性导航的基础坐标系, 原点在飞行器重心处, X_b 轴指向飞行器机头前进方向, Y_b 轴由原点指向飞行器右侧, Z_b 轴方向通过 X_b, Y_b 由右手法则确定。载机地理坐标系 $V(O_v - X_v Y_v Z_v)$ 为以无人机位置为原点的北东地 (NED) 坐标系, 载机地理坐标系与载机坐

标系的关系如图 5 所示。

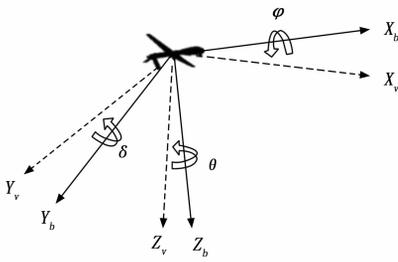


图 5 载机坐标系与载机地理坐标系

地心空间直角坐标系 $E(O_e - X_e Y_e Z_e)$ 原点为地球质心, Z_e 轴指向地球北极与地球旋转轴重合, X_e 轴指向本初子午线和赤道的交点, Y_e 轴与其他两轴形成右手法则。大地坐标系即经纬高坐标系 (LLA 坐标系), 本文所指的大地坐标系为 WGS-84 坐标系 $G(O - BLH)$, 将地心直角坐标系用在 GPS 中, 以大地纬度 (B)、大地经度 (L) 和大地高程 (H) 更加直观地表示任意一点在地球中的位置, 可以通过获取 GPS 数据对无人机进行定位。WGS-84 坐标系与地心空间直角坐标系的关系见图 6。

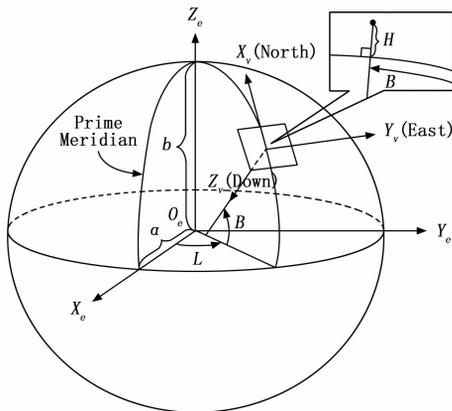


图 6 地心空间直角坐标系与大地坐标系

2.2 坐标系转换

无人机对目标定位的过程就是各个坐标系转换的过程。图 7 展示了无人机通过单目相机进行目标定位的坐标转换流程。

为维持飞行画面稳定, 机载云台相机一般会有横滚角 α 与高低角 β 的可转动角度, 以此保持视角始终朝无人机行进方向或是正下方, 用矩阵 C 表示从相机坐标系到载机坐标系的转换; 通过机载惯性导航系统能够获得无人机三轴姿态角 (横滚 φ 、俯仰 δ 、偏航 θ), 载机坐标系绕 Z_b 轴、 Y_b 轴与 X_b 轴分别旋转 $-\theta$ 、 $-\delta$ 和 $-\varphi$ 度, 可转换为载机地理坐标系, 此转换由矩阵 B 来完成, 载机地理坐标系将无人机的方向与地球各轴线方向联系起来, 用于导航与控制故又称导航坐标系, 对于飞

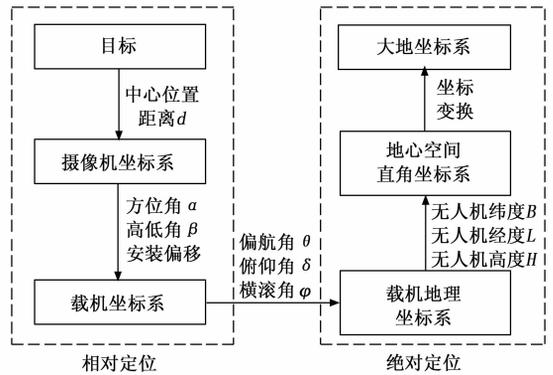


图 7 坐标转换流程

行安全和导航至关重要; 载机地理坐标系到地心空间直角坐标系的转换过程 A 为: 绕 Z_b 轴旋转角度 $-L_u$ 后绕 Y_b 轴旋转 $(90^\circ + B_u)$, 再沿着载机地理坐标系下的 3 个轴平移 (X_u, Y_u, Z_u) 。

获取目标在相机坐标系 C 下的坐标后, 根据各坐标系的几何转换关系建立坐标转换矩阵, 逐步计算目标像点在不同坐标系中的坐标, 最终确定其在地心空间直角坐标系 (ECEF) 中的位置。公式为从相机坐标系 C 到地心空间直角坐标系 E 的组合计算式, 其中, (x_T^e, y_T^e, z_T^e) 、 (x_T^c, y_T^c, z_T^c) 分别为待测目标在地心空间直角坐标系 E 与相机坐标系 C 下的坐标, A 、 B 、 C 为坐标变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} x_T^e \\ y_T^e \\ z_T^e \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{ABC} \begin{bmatrix} x_T^c \\ y_T^c \\ z_T^c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos L_u \sin M_u & -\sin L_u & -\cos L_u \cos M_u & X_u \\ -\sin L_u \sin M_u & \cos L_u & -\cos M_u \sin L_u & Y_u \\ \cos M_u & 0 & -\sin M_u & Z_u \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \theta & \sin \varphi \sin \delta \cos \theta - \cos \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \delta \cos \theta + \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \delta \sin \theta & \sin \varphi \sin \delta \sin \theta + \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \delta \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta \\ -\sin \delta & \sin \varphi \cos \delta & \cos \delta \cos \delta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T^c \\ y_T^c \\ z_T^c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

无人机通过全球定位系统获得经纬高信息 (B_u, L_u, H_u), 并根据下式计算出其在坐标系 E 下的坐标:

$$\begin{bmatrix} X_u \\ Y_u \\ Z_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H_u) \cos B_u \cos L_u \\ (N + H_u) \cos B_u \sin L_u \\ [(N(1 - e^2) + H)] \sin B_u \end{bmatrix} \quad (9)$$

对于 WGS-84 坐标系定义的地球椭球模型^[21], 长

半轴 $a = 637\ 813\ 7\ \text{m}$, $b = 635\ 675\ 2\ \text{m}$, 第一偏心率 e 和卯酉圈曲率半径 N 分别为:

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} / a \quad (10)$$

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (11)$$

通过上述坐标转换流程, 能够确定目标的绝对位置。然而, 以地心空间直角坐标系来表示目标位置信息在直观性上存在局限。因此, 本文进一步采用如下公式, 旨在将目标位置从空间直角坐标系转换至大地坐标系, 以获得更直观的地理坐标表示和更方便的信息交互:

$$L = \arctan(y_e / x_e) \quad (12)$$

$$L = \begin{cases} \arctan(y_e / x_e) & x_e > 0 \\ \pi + \arctan(y_e / x_e) & x_e < 0, y_e > 0 \\ -\pi + \arctan(y_e / x_e) & x_e < 0, y_e < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$B = \arctan\left(\frac{z_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}} \left(1 - \frac{e^2 N}{N + H}\right)^{-1}\right) \quad (14)$$

$$H = \frac{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}}{\cos B} - N \quad (15)$$

根据式 (8)、(12) ~ (15) 可以解算出目标在大地坐标系中的坐标, 实现对目标的绝对定位。

2.3 目标相对位置获取

在 1.2 节中阐释了无人机搭载单目相机对目标进行测距的方法, 获得目标距离 D 后, 可根据预估距离和相机已知的 FOV 参数来实现目标相对定位, 目标在相机坐标系中的坐标 X_c 、 Y_c 和 Z_c 由公式~计算。

$$X_c = \frac{2xD \sin \frac{FOV_h}{2}}{W_c} \quad (16)$$

$$Y_c = \frac{2yD \sin \frac{FOV_v}{2}}{H_c} \quad (17)$$

$$Z_c = D \cos \beta \quad (18)$$

其中: x 和 y 是目标包围框中心偏移图像中心的像素值, W_c 和 H_c 是用像素表示的图像画幅宽度和高度, 相机的水平方向视场角 FOV_h 和垂直方向视场角 FOV_v 已知, 便可以根据比例关系确定目标的相对位置。机载相机方向水平朝前时, 俯仰角 β 为 0° , 深度 D 就是无人机与目标在机头方向的距离。

3 仿真与分析

3.1 仿真平台配置

为验证所提出定位方法的有效性, 设计软件在环仿真测试获取目标坐标信息。仿真所用硬件平台为联想 Y7000P 笔记本, CPU: Intel i7-1300H, GPU: RTX4060, 内存 16 G, 软件运行环境为 Ubuntu20.04。使用 PX4 固件 (v1.13.1) 模拟实际的飞控运算, Gazebo 提供仿真运行的环境及物理引擎, Mavros 连接 PX4 与外部程序提供信息交互, 在 ROS 框架下实现无

人机对目标定位仿真。仿真系统框架如图 8 所示。

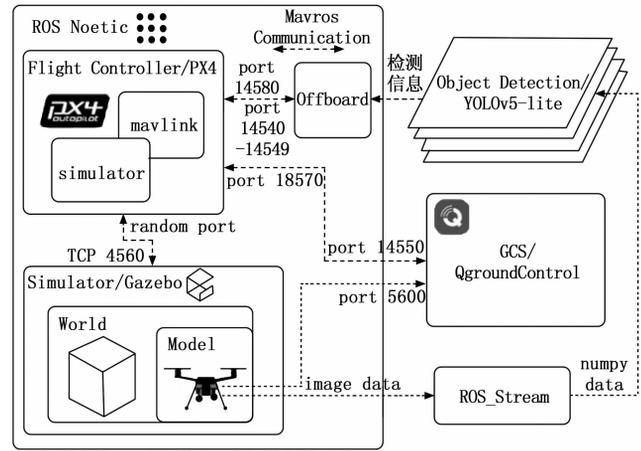


图 8 仿真系统框架图

仿真选择的无人机模型为 Yuneec 公司的 TyphoonH480 六旋翼无人机, 在模型中添加相机插件通过 /typhoon_h480/usb_cam/image_raw 话题发布视频流, 撰写 ROS_Stream 程序将原始图片数据转换为 numpy 格式数据以便输入检测网络, 采用 offboard 模式以设定速度的方式控制无人机按照既定侦察任务飞行。启用云台以减小无人机飞行时角度倾斜与震动对画面的影响, 云台相机俯仰角设置为 0° 即朝向无人机飞行方向, 图 9 展示了目标定位仿真环境。

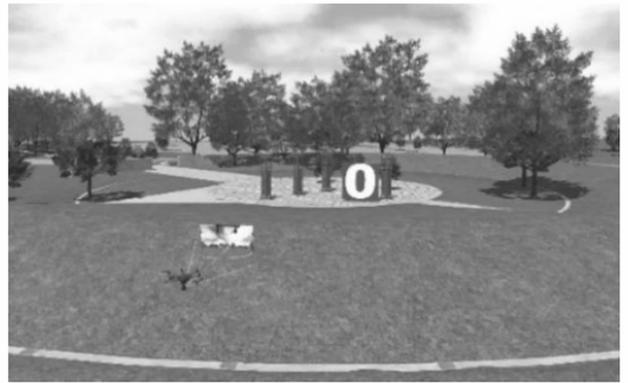


图 9 目标定位仿真场景

仿真选用一个长宽 1 m 的数字牌作为检测定位目标, 其在仿真世界中的 GPS 坐标为 $37.413\ 538\ 1^\circ\text{N}$, $-121.996\ 714^\circ\text{E}$, 无人机本地坐标系中位置为 $(-20.5, 0, 2)$ 。

3.2 任务流程设计

根据侦察任务需求设计无人机目标定位仿真。整个定位任务流程如图 10 所示。

无人机首先按照预设的航线进行侦察, 检测到目标后调整航向将目标置于画幅中部, 朝向目标以 3 m/s 恒定的速度飞行, 在向目标飞行的过程中对目标进行定

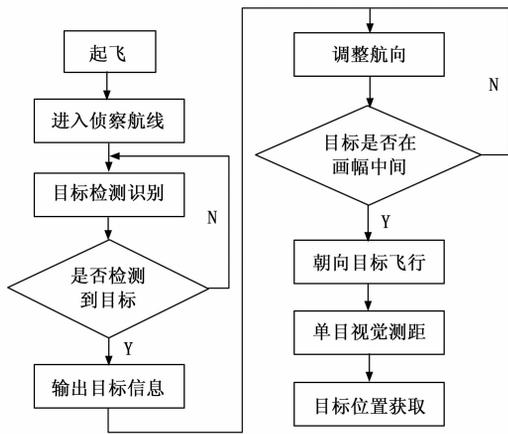


图 10 任务流程图

位, 根据本文所述方法首先测算出目标距离, 然后确定在无人机坐标系下的相对坐标, 计算获取目标 GPS 位置并与真实值比较得出定位误差。

无人机飞控与机载计算机之间通过 mavros 通讯, 其发送的 IMU 数据频率为 50 Hz, 部署的目标检测模型亦能达到每秒 50 帧, 若记录频率太高将增加算力负荷, 前后两次数据变化小且存在扰动, 而记录频率太低难以反映出无人机的位置变化信息造成数据断层, 故采用 20 Hz 的频率记录无人机自身移动距离、本地与 GPS 坐标等位姿数据。

3.3 仿真结果与分析

在无人机完成目标检测朝向目标抵近过程中, 无人机时刻计算与目标的距离, 初始十次测量作为拟合原始数据, 原始测量值进行最小二乘拟合修正。不同时刻无人机至目标的距离测量值与真实值变化如图 11 所示, 可以看出在未知目标先验尺寸的前提下, 计算出的目标距离经修正后与真实值相差迅速减小, 刚检测到目标时因目标太小检测框扰动频繁, 输出距离原始值跳动较大, 随着测量的次数增多达到较好拟合效果使得其趋于稳定, 在距离目标 15 m 时, 距离误差已经小于 0.4 m, 相对误差小于 3%。

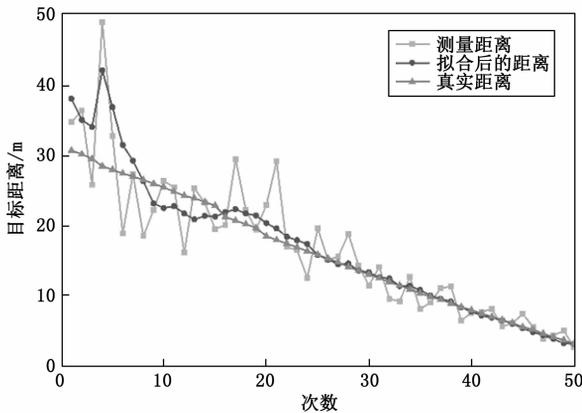


图 11 测量距离与真实距离关系变化图

根据距离信息利用公式 (16) ~ (18) 实时计算出目标相对无人机的位置 (X_c, Y_c, Z_c) , 表 2 中展示部分测量定位结果, 图 12 展示对应序号无人机云台相机视角下目标测距定位图像。

表 2 距离测量与目标定位部分结果

序号	真实距离 /m	测量距离 /m	修正后的测量距离/m	距离误差 /m	定位坐标	水平定位误差 /m
1	27.97	32.71	36.80	8.83	(-29.33, -0.85, -0.71)	9.55
2	25.48	26.37	22.56	2.92	(-17.58, -0.78, 0.26)	3.52
3	23.42	23.28	21.46	1.96	(-18.54, -0.10, 1.49)	2.96
4	20.29	22.30	21.80	1.51	(-22.00, -0.85, 1.59)	2.23
5	17.52	17.07	18.50	0.98	(-21.48, -0.52, 1.62)	1.25
6	15.44	19.69	15.02	0.42	(-20.07, -0.38, 1.65)	0.56
7	13.20	11.61	13.50	0.30	(-20.80, -0.32, 1.67)	0.41
8	11.62	9.41	11.83	0.21	(-20.71, -0.12, 1.70)	0.23
9	9.12	11.48	9.35	0.23	(-20.74, -0.56, 1.76)	0.24
10	7.24	8.30	7.08	0.16	(-20.34, -0.01, 1.90)	0.16
11	6.31	6.33	6.22	0.09	(-20.41, 0, 1.95)	0.10
12	5.40	5.80	5.29	0.11	(-20.40, 0.01, 2.01)	0.10

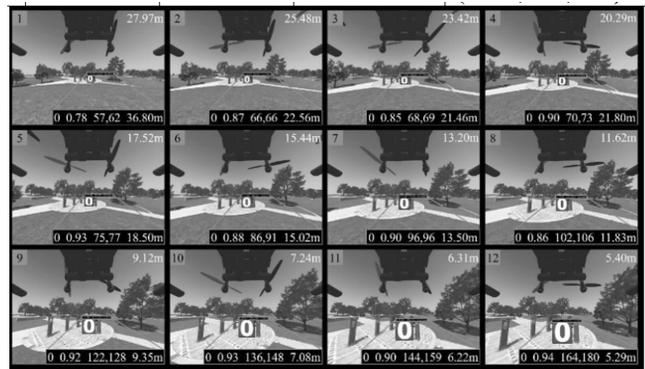


图 12 无人机视角下序列图像

图 12 中, 右上角为目标到无人机的真实距离, 检测框标签分别为类别、置信度、包围框宽高和修正后的预测距离。为模拟实际环境仿真中添加了运动模糊, 画幅边缘的图像因运动速度快存在畸变, 而目标所在画幅中间位置不受影响。无人机由 offboard 通过控制速度的方式飞行, 因此在帧间位移变化较为稳定, 检测框宽高呈现逐渐增大的趋势。在距离较远时相同时间内检测框变化小, 生成的框宽高值扰动可能大于帧前后变化, 故而在实际计算时使用前后间隔 5 帧的宽高值与对应两帧间的运动距离变化来预测距离; 随着无人机朝向目标飞行, 目标在图像中占据的像素面积增大且变化更加明显, 对距离的测算以及定位解算也越来越接近真实值。为了较为直观地感受目标定位坐标的变化, 将目标定位结果以及目标真实坐标在空间中的位置分布绘制于图 13 中。

由三维图可见随着测量定位过程进行, 对目标相对

位置估计的水平逐渐提升, 预测坐标逐渐逼近目标真实坐标, 在距离目标 15 m 时定位水平误差已小于 0.6 m, 最终保持在一个较小的范围中浮动。

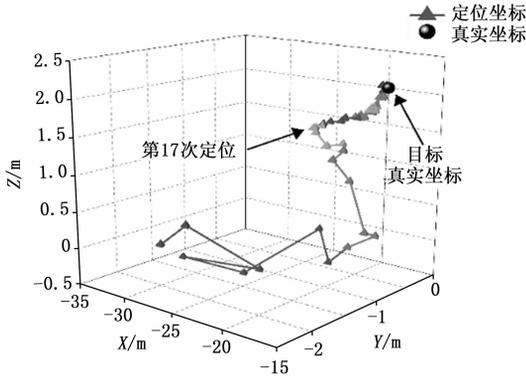


图 13 目标定位坐标变化图

在获取到目标相对位置后, 根据/mavros/global_position/global话题的无人机自身全局位置信息, 计算目标在 WGS-84 坐标系下的 GPS 坐标, 将经纬度误差以及高度误差呈现在图 14 中, 不难发现, 前 10 次的定位估计处于数据积累阶段, 对于目标距离的预估误差较大导致定位效果欠佳, 此后误差下降趋势明显, 直到进行 16 次定位计算后趋于平稳。最后 10 次计算经纬度偏差小于 0.000 01°, 高度值偏差小于 0.2 m。

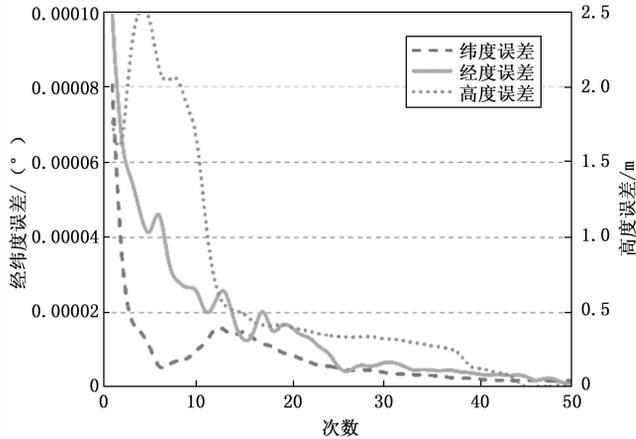


图 14 经纬度与高度误差变化图

为消除仿真过程中的随机误差, 确保结果的可靠性与有效性, 在恒定的环境条件下重复进行 10 次测距定位仿真实验, 通过对比修正后的预测距离与实际目标距离, 计算得出误差值, 将误差数据呈现于图 15 中。可以观察到误差值整体上表现出一种下降的趋势, 同时误差的波动范围也得到了显著的压缩, 这一现象表明所采用的方法具备较强的鲁棒性。仿真实验初期测量次数较少且因距离远目标物体的尺度较小时, 检测框的不稳定性对距离的拟合造成了不利影响导致误差值相对较高;

而随着测量次数增加, 特别是当测量次数达到 20 次之后, 误差值开始趋于稳定, 并在一个较低的范围内波动。最终距离误差被控制在 0.5 m 以内, 相对误差降至 3% 以下, 偏差维持在大约 2% 的水平。这些结果说明本文所提出方法的定位精度满足既定的要求。

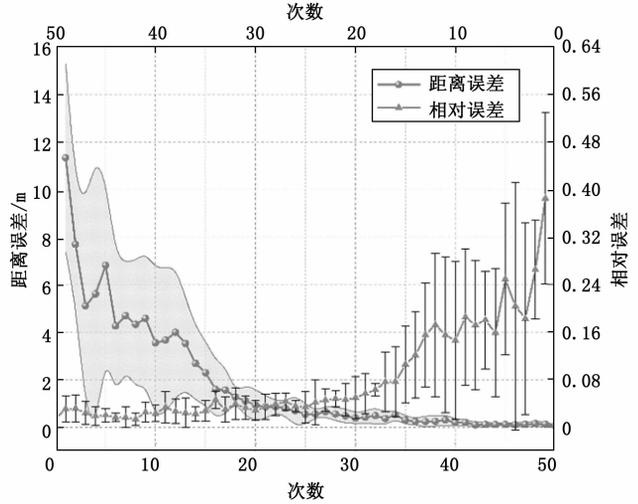


图 15 测距定位仿真实验误差曲线

综上所述, 本文提出的无人机单目视觉目标定位方法, 在未知目标先验尺寸参数情况下也能计算出其与无人机之间的距离进行相对定位, 结合无人机自身位置信息能获取目标 GPS 坐标, 且经纬度误差可以稳定在 0.000 01° 以内, 验证了该方法的有效性与准确性。

4 结束语

本文针对传统无人机无源目标定位需要已知目标或背景先验尺寸信息的局限性, 提出一种基于单目视觉测距获取目标坐标的定位方法。该方法使用深度学习目标检测锁定目标, 利用图像画幅中目标尺寸变化与无人机自身运动信息近似线性的关系, 引入最小二乘法求解出无人机到目标的距离进而获取目标相对坐标; 建立了一系列坐标系将目标从相对坐标转化到大地坐标系下真实坐标, 实现无人机对目标的绝对位置估计; 最后通过软件在环仿真验证该方法能在未知目标信息情况下有效实现对目标的绝对定位, 具有一定工程应用价值。

参考文献:

[1] 陈丹琪, 金国栋, 谭立宁, 等. 无人机载光电平台目标定位方法综述 [J]. 飞航导弹, 2019 (8): 43-48.

[2] 王海峰. 高性能协同作战无人机的发展与思考 [J/OL]. 航空学报, [2024-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240313.0931.002.html>.

[3] 陈丹琪, 金国栋, 谭力宁, 等. 基于非线性最小二乘法的无人机机载光电平台目标定位 [J]. 光电工程, 2019, 46 (9): 84-92.

(下转第 253 页)