

文章编号 1004-924X(2026)18-2858-14

利用单目观测的无人机对地目标定位方法

夏晓华^{1*}, 周艳茹¹, 马新哲¹, 曹 彬¹, 谢季宸²

(1. 长安大学 陕西省高速公路施工机械重点实验室, 陕西 西安, 710064;

2. 西交利物浦大学 数理学院, 江苏 苏州, 215123)

摘要:针对传统无人机单目视觉对地目标定位方法依赖目标或场景先验信息、定位精度不高的问题,提出一种最多使用双观测点的无人机对地目标精确定位方法。首先考虑了无人机位姿与云台姿态变化、云台转动中心偏离无人机重心以及成像系统光心偏离云台转动中心等影响定位精度的因素,建立了地面目标在载机地理坐标系下的投影模型,提高了模型对无人机观测地面目标的通用性;其次根据地面是否平坦设计了单观测点和双观测点对地目标定位算法,通过构建几何方程高效求解目标位置坐标。以 Phantom 4-RTK 无人机为例,通过蒙特卡洛仿真与实际实验,分析了无人机对地目标定位精度的影响因素及效果,并验证了提出方法的有效性。仿真结果表明,Phantom 4-RTK 无人机对地目标的最高定位精度可达分米级,高程与云台姿态角的测量精度是影响定位误差的主导因素,双观测点与目标之间交会角大于 60° 时可保证定位的稳定性;实际实验结果表明,无人机距地高度为 10~20 m 时,提出的方法对平坦地面单观测点定位的误差为 0.34 m,较现有方法定位误差减小 60%,对非平坦地面双观测点定位的误差为 0.47 m,较现有方法定位误差减小 92.27%。提出的方法在平坦与非平坦地面场景均能实现目标精确定位,具有良好的应用前景。

关键词:无人机;目标定位;单目视觉;双观测点

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263418.2858

CSTR: 32169.14.OPE.20263418.2858

UAV ground target localization method using monocular observation

XIA Xiaohua^{1*}, ZHOU Yanru¹, MA Xinzhe¹, CAO Bin¹, XIE Jichen²

(1. Key Laboratory of Expressway Construction Machinery of Shaanxi Province,

Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Mathematics and Physics, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

* Corresponding author, E-mail: xhxia@chd.edu.cn

Abstract: To address the limitations of traditional UAV monocular vision-based ground target localization methods, which relied on prior information of the target or scene and suffered from insufficient positioning accuracy, a precise ground target localization method using up to two observation points was proposed. First, considering factors that affected positioning accuracy—including UAV pose and gimbal attitude variations, deviation of the gimbal rotation center from the UAV center of gravity, and deviation of the imaging system optical center from the gimbal rotation center—a projection model of ground targets in the air-

收稿日期: 2026-04-01; 修订日期: 2026-04-27.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(No. 2025CY-YBXM-545); 陕西省交通运输科研项目(No. 25-31X)

craft geographic coordinate system was established, enhancing the model's generality for UAV-based ground target observation. Subsequently, based on ground flatness, single-observation-point and dual-observation-point ground target localization algorithms were designed, efficiently solving target position coordinates through geometric equations. Using the Phantom 4-RTK UAV as an example, Monte Carlo simulations and actual experiments were conducted to analyze the influencing factors and effects on UAV ground target localization accuracy, thereby validating the effectiveness of the proposed method. Simulation results indicated that the maximum positioning accuracy of the Phantom 4-RTK UAV for ground targets reached the decimeter level, with measurement accuracy of altitude and gimbal attitude angle being the dominant factors affecting positioning error. Positioning stability was ensured when the intersection angle between the dual observation points and the target exceeded 60° . Experimental results demonstrate that at UAV altitudes of 10-20 meters, the proposed method achieves a positioning error of 0.34 m for flat ground using a single observation point, representing a 60% reduction compared to existing methods. For non-flat ground using dual observation points, the positioning error is 0.47 m, a 92.27% reduction relative to existing methods. The proposed method achieves precise target localization in both flat and non-flat ground scenarios, demonstrating strong application potential.

Key words: UAV; target localization; monocular vision; dual observation points

1 引 言

现代信息化战争背景下,无人机凭借部署灵活、隐蔽性强及低成本等优势,已成为战场侦察与精确打击的重要装备^[1-3]。其中,对地目标的精确定位能力直接影响作战效能,在地空协同作战、战场态势感知与火力引导中具有重要战略意义^[4-5]。当前,基于单无人机平台的对地目标定位因其机动性强、部署简便且成本效益高,避免了多机协同的通信、同步与任务分配等复杂问题,已成为无人机对地目标定位的主流应用方式^[6]。

无人机对地面目标的定位方法可以分为融合有源测距的定位方法、基于基准图匹配的定位方法和基于单目视觉的定位方法。融合有源测距的定位方法通过机载激光测距仪等主动设备直接获取无人机与目标的距离,进而结合无人机位姿解算目标位置^[7-8]。此类方法精度较高,但主动激光辐射易暴露无人机位置,降低了其战场生存能力。基于基准图匹配的定位方法通过将实时图像与预存的高精度卫星基准图或数字高程模型进行特征匹配确定目标的位置^[9-11],此方法依赖高精度卫星基准图,在基准图缺失或地形地貌发生显著变化的复杂战场中应用受限。基于单目视觉的定位方法具有系统结构简单、成本低廉、隐蔽性强且无需主动发射信号等显著优势,

能够有效满足复杂战场环境下的定位需求^[12]。

现有研究中,在基于单目视觉的定位方法研究中,利用光电稳定跟踪平台对同一地面目标进行多次观测并建立非线性系统模型,结合基于数字高程模型近似的初始位置估计,实现了在复杂地形区域显著提升目标定位精度的效果^[13],但多次观测和复杂的迭代计算难以满足战场实时性定位的要求;文献^[14]提出了一种利用DeepSORT算法计算目标视线向量,在已知目标长度尺寸的前提下,采用交互式多模型粒子滤波算法实现对运动车辆的高精度定位;文献^[15]提出了一种基于层次化的定位方法,结合卫星与航拍图像的特征匹配构建2D-3D对应关系,并利用PnP算法进行求解,提升了GPS拒止环境下的定位精度;文献^[16]提出了一种融合无人机位姿信息的定位方法,结合位姿信息与3个控制点构建几何模型,建立像素与地面目标的映射关系,提升了定位精度;文献^[17]利用一个已知控制点进行连续跟踪,通过融合无人机姿态与平台视轴指向的多维姿态自适应感知算法,辨识并补偿目标定位中的五个主要系统误差,使目标的平均定位精度提升81.1%;文献^[18]提出一种结合自注意残差神经网络与高斯混合滤波的算法,解决了无人机远距离斜角观测中定位精度低的问题,显著提升了地面目标的定位精度与鲁棒性;文献^[19]通过无人机沿

着光轴向目标飞行,建立了目标图像尺寸变化与无人机位置变化的线性关系,从而计算目标距离,实现了对未知尺寸地面目标的定位;文献^[20]通过将光电平台安装于机腹垂直向下探测的方法,解决了投影过程中丢失深度信息的问题,最后利用坐标系转换进行目标定位。以上传统基于单目视觉的定位方法需要预先获取目标或场景的先验信息,以及严格限制云台角度、无人机飞行轨迹,增加了对未知战场的目标定位难度和无人机的生存风险。近年来,深度学习方法在无人机视觉定位领域取得了显著进展,文献^[21]提出的 OBTPN 网络通过平衡自注意力与交叉注意力机制,在多海拔场景中取得高精度定位;文献^[22]提出的 RVIO 框架融合测距-视觉-惯性里程计与图像配准,通过自适应权重分配实现无漂移全局估计;文献^[23]提出的 RTAPM 方法融合模板配准、点线特征匹配与视觉-惯性联合优化,在灾害救援等复杂环境中表现出较高鲁棒性。上述利用深度学习的方法实现了对无人机位置信息的有效估计,为目标定位提供了一种新的思路,但其高度依赖大规模标注数据进行训练,或需预构建三维地图和卫星影像数据库,在未知战场环境下的快速部署仍受到制约。

针对以上问题,本文提出了一种基于单目观测的无人机对地目标定位方法。该方法利用无人机位姿、云台姿态及目标像点坐标,建立无人机在地理坐标系下的对地目标定位投影模型,并且根据地面是否平坦设计了单观测点和双观测点定位算法,通过构建几何方程解算目标位置。该方法不依赖大规模标注数据及预建地图,无需目标和场景的先验信息,避免了主动辐射带来的暴露风险,对待测区域地形也无特殊要求,符合低成本小型无人机在未知复杂环境中的侦察要求。

2 目标定位算法

基于单目观测的无人机对地目标定位方法通过视觉投影变换原理,整合无人机位姿、云台姿态及目标像点坐标,构建统一的几何模型以解决图像深度信息丢失的问题,最终实现目标在大地坐标系下的三维坐标解算。

已知无人机在大地坐标系中的位置(B_{uav} ,

$L_{\text{uav}}, H_{\text{uav}}$)、无人机相对于起飞点水平面的高度、无人机姿态角以及云台姿态角,定位任务的目的是求解目标点的大地坐标(B_p, L_p, H_p)。

2.1 定义坐标系

为明确各物理量的空间映射关系,无人机对地面目标的定位系统需定义以下 7 个核心坐标系,各坐标系间的转换关系为后续投影模型构建的基础:

大地坐标系为全球导航卫星系统定位数据采用的坐标系,坐标(B, L, H)分别表示大地纬度 B 、经度 L 和高程 H 。地球直角坐标系 $E(O_e-X_e-Y_e-Z_e)$ 以地球质心为原点, Z 轴指向国际时间局定义的协议地极方向, X 轴在赤道面内指向格林尼治本初子午线与赤道的交点方向, Y 轴垂直于 XOZ 平面构成右手坐标系。载机地理坐标系 $V(O_v-X_v-Y_v-Z_v)$ 是以无人机质心为原点的北东地坐标系, X 轴指向正北方向, Y 轴指向正东方向, Z 轴垂直于 XOY 平面向下指向地面,如图 1 所示。

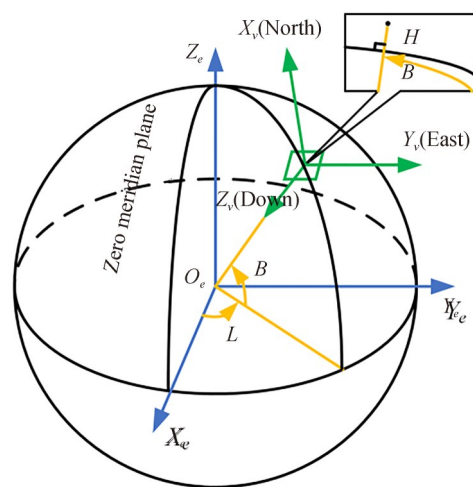


图 1 大地坐标系、地球直角坐标系和载机地理坐标系
Fig. 1 Geodetic coordinate system, Earth-centered Earth-fixed coordinate system, and aircraft geographic coordinate system

机体坐标系 $B(O_b-X_b-Y_b-Z_b)$ 以无人机质心为原点,坐标系与无人机固连, X 轴平行于机体轴线指向机头, Y 轴垂直于无人机竖直对称面指向机身右方, Z 轴与 X 轴垂直并指向机身下方。相机坐标系 $C(O_c-X_c-Y_c-Z_c)$ 以相机的光心为原点, Z 轴沿相机光轴方向指向前方, X 轴与图像物理坐标系水平轴平行指向右, Y 轴与图像物理坐标系

水平轴平行指向下。像素坐标系 $U(O_u-X_uY_u)$ 以图像左上角为原点, X 轴沿图像上边沿指向右, Y 轴沿图像左边沿指向下, 如图 2 所示。云台坐标系 $G(O_g-X_gY_gZ_g)$ 以云台的旋转中心为原点, X 轴与相机坐标系的 Z 轴平行且同向, Y 轴与相机坐标系的 X 轴平行且同向, Z 轴与相机坐标系的 Y 轴平行且同向, 如图 3 所示。

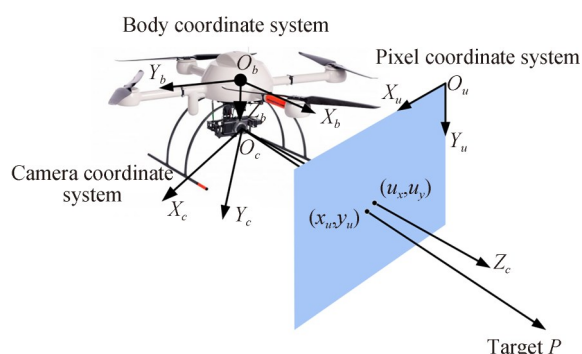


图 2 机体、相机与像素坐标系

Fig. 2 Body coordinate system, camera coordinate system, and pixel coordinate system



图 3 云台坐标系

Fig. 3 Gimbal coordinate system

2.2 构建投影模型

本模型充分考虑无人机位姿、云台姿态角、云台转动中心偏离无人机重心及相机光心偏离云台转动中心等关键几何因素, 建立目标从像素坐标系到载机地理坐标系的投影转换关系。

假设 O_c 点为相机光心的位置, D 点为无人机垂直于地面的投影点, P 点为目标的位置; 高 H 为无人机距离地面的相对高度。对于像平面 M_1 , 以光轴和像平面的交点为原点 $O_1(u_x, u_y)$, X 轴平行于像素坐标系 X 轴指向右, Y 轴平行于像素坐标系指向上, 建立坐标系, 记为 $O_1-X_1Y_1$ 。对于目

标所在地面 M_2 , 以光轴和地面的交点为原点 O_2 , X 轴和 Y 轴分别与像平面的 Y 轴、 X 轴平行且反向, 记为 $O_2-X_2Y_2$, 如图 4 所示。

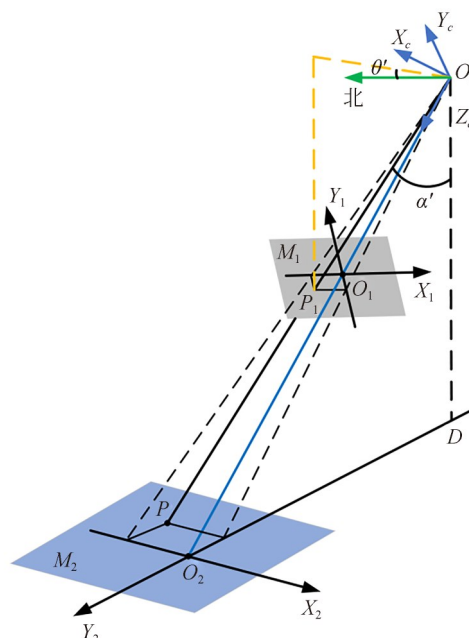


图 4 三维定位原理图

Fig. 4 Schematic diagram of three-dimensional positioning principle

由于目标不一定在相机视场中心, 目标视线向量相对于光轴在水平及垂直方向上的偏转角为:

$$\begin{cases} x_{op_1} = (x - u_x) \times l \\ y_{op_1} = (u_y - y) \times l' \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \arctan\left(\frac{y_{op}}{f}\right) \\ \theta_p &= \arctan\left(\frac{x_{op}}{f}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中: x_{op_1}, y_{op_1} 分别表示在像平面的 $O_1-X_1Y_1$ 坐标系中目标 P 对应的 P_1 的位置; x, y 分别表示目标点的像素坐标; l 为一个像素的大小; α_p 为垂直方向的偏转角度; θ_p 为水平方向的偏转角度; f 为焦距。

设 α, θ 分别表示云台的俯仰角和偏航角, 由于云台旋转中心和相机光心的位置相对固定, 所以 α, θ 也是相机的俯仰角和偏航角, 计算得到 O_c 为原点的新的偏转角度:

$$\begin{aligned}\alpha' &= \alpha + \alpha_p, \\ \theta' &= \theta + \theta_p,\end{aligned}\quad (3)$$

其中: α' 为目标视线向量与水平面的夹角; θ' 为目标视线向量在水平面的投影与正北方向的夹角。

载机地理坐标系下,无人机、相机和目标在 O_vAP 平面的投影如图 5(a)所示,无人机质心和相机光心的距离(O_vO_c)已知,记为 L ,计算得到光心和目标在水平面上的距离为:

$$h = -L \sin(\eta + \beta), \quad (4)$$

$$DP = \frac{H - h - h_p}{\tan \alpha'}, \quad (5)$$

其中: β 为无人机俯仰角; η 为无人机质心和相机光心连线与水平面 $X_vO_vY_v$ 的夹角; h 为无人机质心和相机光心的竖直距离; h_p 为目标相对于无人机起飞点水平面的高度差; H 为无人机相对于地面的高度。

无人机、相机和目标在 $X_vO_vY_v$ 平面的投影如图 5(b)所示,目标在 NED 坐标系的坐标为:

$$\begin{cases} x_v = -L \cos(\eta + \beta) \cos \gamma - DP \cos \theta' \\ y_v = -L \cos(\eta + \beta) \sin \gamma - DP \sin \theta' \\ z_v = H - h_p \end{cases}, \quad (6)$$

其中, γ 为无人机的偏航角。

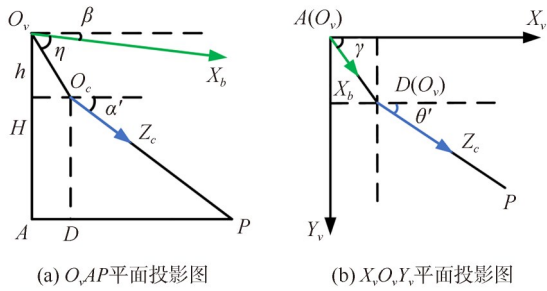


图 5 无人机、相机和目标在载机地理坐标系中的投影图
Fig. 5 Projection diagram of UAV, camera, and target in the aircraft geographic coordinate system

2.3 两观测点几何约束定位求解

对于平坦地面,令高度差 $h_p=0$,单观测点即可求解目标的大地坐标;若目标位置附近地势复杂,无人机起飞点和目标不在同一水平面上,利用双观测点几何约束进行目标定位。

已知无人机的纬度 B_{uav} 、经度 L_{uav} 和高程 H_{uav} ,以及载机地理坐标系中目标点的坐标(x_v, y_v, z_v),目标的大地坐标为:

$$\begin{cases} B_p = B_{\text{uav}} + \frac{x_v}{R_M} \\ L_p = L_{\text{uav}} + \frac{y_v}{R_N \cos B_{\text{uav}}} \\ H_p = H_{\text{uav}} - z_v \end{cases}, \quad (7)$$

其中: R_M 为子午圈曲率半径; R_N 为卯酉圈曲率半径,计算如式(8)所示:

$$\begin{cases} R_M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2(B_{\text{uav}}))^{3/2}} \\ R_N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2(B_{\text{uav}})}} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: a 为长半轴, e 为第一偏心率。

对于第 i 次观测,无人机大地坐标为($B_{\text{uav},i}, L_{\text{uav},i}, H_{\text{uav},i}$),设无人机起飞点所在水平面和目标所在水平面的高度差为 h_p ,如图 6 所示,图中以蓝色水平面表示无人机起飞点所在水平面,目标点 P 位于该水平面上方 h_p 处。利用投影模型(1.2 节)的公式,可计算出目标在载机地理坐标系下的坐标($x_{v,i}(h_p), y_{v,i}(h_p), z_{v,i}(h_p)$),进一步,将其转换为大地坐标($B_{p,i}(h_p), L_{p,i}(h_p), H_{p,i}(h_p)$)。

两次观测($i=1,2$)可建立以下约束方程组:

$$\begin{cases} B_{p,1}(h_p) = B_{p,2}(h_p) \\ L_{p,1}(h_p) = L_{p,2}(h_p) \\ H_{p,1}(h_p) = H_{p,2}(h_p) \end{cases}. \quad (9)$$

采用数值方法求解关于未知数 h_p 的非线性方程组,将绝对求解问题转化为最优逼近问题:寻找最优的 h_p 使得两次观测计算出的目标位置差异最小,该目标等价于最小化经度、纬度和高程三个坐标分量残差的平方和,将经纬度残差转换为当地水平面内的距离残差,并引入基于测量误差的权重,由此构造的目标函数如下:

$$h_p^* = \arg \min \left[\frac{(R_M \Delta B)^2}{\epsilon_x^2} + \frac{(R_N \cos B_{\text{uav}} \Delta L)^2}{\epsilon_y^2} + \frac{(\Delta H)^2}{\epsilon_H^2} \right], \quad (10)$$

其中: ϵ_x, ϵ_y 与 ϵ_H 分别为无人机水平与高程方向的位置测量误差;经度、纬度和高程三个坐标分量残差如式(11)

$$\begin{cases} \Delta B = B_{p,1}(h_p) - B_{p,2}(h_p) \\ \Delta L = L_{p,1}(h_p) - L_{p,2}(h_p) \\ \Delta H = H_{p,1}(h_p) - H_{p,2}(h_p) \end{cases}. \quad (11)$$

通过迭代更新高度差估计值,直至目标函数

收敛至预设的阈值或满足迭代次数限制,从而获得最优高度差 h_p^* ,利用共线方程精确解算目标位置。

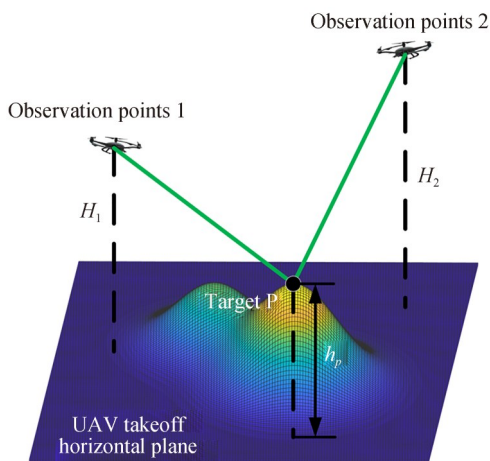


图 6 两观测点几何约束定位原理

Fig. 6 Positioning principle based on geometric constraints of two observation points

3 仿真实验与误差影响因素分析

3.1 蒙特卡洛误差仿真方法

蒙特卡洛方法^[24-25]是一种基于大数定律的统计模拟技术,通过引入服从特定分布的随机扰动,有效分析非线性误差传播机制并模拟系统不确定性。在无人机对地目标定位问题中,由于定位模型涉及多维非线性变换,传感器测量误差通过复杂的几何耦合机制影响定位结果,使得解析法难以直接获得误差的精确统计特性,而蒙特卡洛方法则提供了一种可行且高效的数值分析途径。

本研究将蒙特卡洛方法应用于单目观测无人机对地目标定位的误差分析,其核心思想是:根据误差源的物理特性及传感器精度构建误差概率模型,通常假设各误差分量相互独立且服从均值为零的正态分布 $N(0, \sigma_i^2)$,其中 σ_i 为第 i 个参数的测量标准差;利用伪随机数生成器产生 N 组符合上述正态分布的随机数序列,每组序列对应一次独立仿真的误差向量 δ ,将误差向量叠加至参数的真值向量 X_{true} 上,构建含噪观测向量 $X_{\text{obs}} = X_{\text{true}} + \delta$;将含噪向量代入定位解算方程,经 N 次独立重复试验获得定位结果的样本集合,通过分

析数据及分布形态,实现对定位算法精度与可靠性的定量评估。

基于单目观测的无人机对地目标定位的计算方程可以表示为:

$$(B_r, L_r, H_r) = F[(x, y), (f), (B_{\text{uav}}, L_{\text{uav}}, H_{\text{uav}}), (\alpha, \theta), (\beta, \gamma)]. \quad (12)$$

目标定位误差模型可以表示为:

$$(\Delta B_p, \Delta L_p, \Delta H_p) = F(X + \Delta X) - F(X), \quad (13)$$

其中: ΔX 表示目标定位误差模型中各参数的测量误差,包括目标像平面的坐标、无人机的位置和姿态角以及云台的姿态角。

3.2 定位精度仿真分析

为验证本文定位模型的有效性,并定量评估该定位算法在典型传感器噪声环境下的实际性能,本节基于蒙特卡洛方法开展数值仿真实验。考虑到后续实地飞行验证将以大疆 Phantom 4-RTK 无人机作为搭载平台,仿真参数设置依据该机型的传感器精度指标及实际实验数据确定,以确保仿真环境贴近实际实验,避免因参数选取主观性导致的理论偏差。实验共构建 100 组独立几何场景,每组场景中无人机在双观测点对同一地面目标进行定位,并对无人机测量值叠加随机误差进行 100 次蒙特卡洛模拟,统计该几何配置下的定位误差特性。仿真场景的几何参数设置如表 1 所示,传感器误差模型参数如表 2 所示。

表 1 仿真场景几何参数设置
Tab. 1 Target localization result

参数	范围
目标水平距离/m	5~15
基线长度/m	5~15
交会夹角/(°)	60~150
相对飞行高度/m	10~25
像素偏移范围/px	0~400

仿真过程中,首先依据表 1 所示参数生成目标的真实位置及观测几何构型。在每次蒙特卡洛模拟中,分别对双观测点无人机的经纬度、高度、姿态角及云台姿态角叠加服从表 2 所示标准差的独立高斯噪声,进行定位解算。图 7 与图 8 分别展示了 100 组独立实验的定位误差分布直方图及所有模拟样本的三维定位误差散点分布。

表 2 传感器测量误差模型参数

Tab. 2 Positioning simulation data

类型	分布	误差
云台俯仰角/(°)	正态分布	0.01
云台偏航角/(°)	正态分布	0.01
无人机俯仰角/(°)	正态分布	0.1
无人机偏航角/(°)	正态分布	0.1
无人机纬度/(°)	正态分布	6.36×10^{-7}
无人机经度/(°)	正态分布	7.34×10^{-7}
无人机高度/m	正态分布	0.1

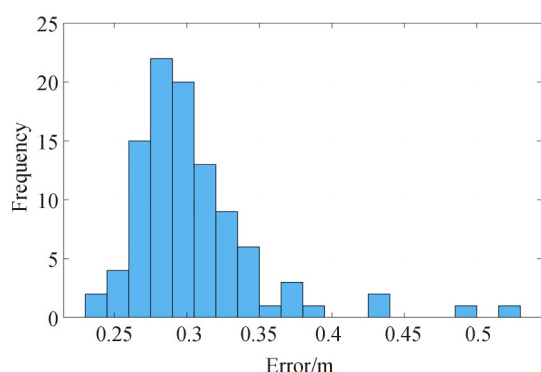


图 7 定位误差分布直方图

Fig. 7 Histogram of positioning error distribution

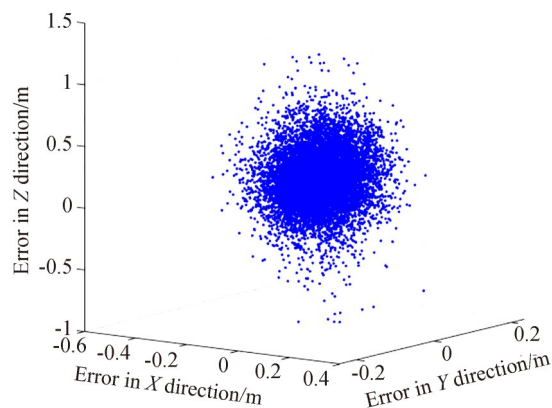


图 8 定位误差三维空间分布

Fig. 8 Three-dimensional spatial distribution of positioning errors

图 7 直观反映了不同精度水平下的场景分布特征,由图可见,绝大多数场景的误差集中在 0~0.4 m 范围内,仅少量场景受基线和交会角的影响出现较大误差,所以在合理选择作业参数的前提下,该方法能够稳定提供可靠的定位

结果。图 8 展示了所有蒙特卡洛模拟样本的三维定位误差散点分布,其中 X, Y, Z 轴分别对应纬度、经度与高度方向的定位误差,由图可见,样本误差集中于坐标原点附近,无明显偏移。这一特征与仿真输入的零均值高斯噪声特性一致,验证了定位模型无显著系统偏差,误差主要源于传感器测量噪声,模型具有良好的无偏性与可靠性。

经统计计算,该方法在 Phantom 4-RTK 无人机典型工况下的空间平均定位误差为 0.34 m,这一结果确立了该定位模型在现有传感器精度及实验条件约束下的理论精度基准,为后续实际飞行实验的精度预期提供了参照。按照上述仿真参数加入目标测量误差项,仿真结果表明,测量误差为 10 pixels 时,定位误差增大了 0.03 m,当无人机高度增大时,测量误差对定位误差的影响随之增大,所以实际应用中应采用高精度目标检测算法,控制像素坐标提取误差。为验证高空作业适用性,在 800~1 000 m 高度范围开展蒙特卡洛仿真实验,得到平均定位误差为 1.28 m,能够达到一般战场打击的定位要求。本节仿真验证了该定位模型的正确性,为后续 2.3 节中误差影响因素的分析提供了理论支撑。

3.3 误差影响因素分析

为探究无人机定位系统中各误差源对三维空间位置误差的影响规律,本节以 Phantom 4-RTK 无人机为例,分别利用单观测点和双观测点定位模型进行无人机对地目标定位误差影响因素分析。

首先利用单观测点定位模型,通过正交实验设计分析七个无人机观测参数误差(无人机纬度、无人机经度、无人机高程、云台俯仰角、云台偏航角、无人机俯仰角、无人机偏航角)对定位误差的敏感性。考虑到实际飞行实验受场地与空域限制,难以通过有限架次的飞行覆盖全高度范围内的误差演变规律,且难以对单一误差源进行剥离分析,因此建立仿真模型,旨在探究 10~600 m 范围内各因素对定位误差的影响机理,为实际作业参数设置提供理论依据。考虑到飞行高度是实际作业中的重要变量,且可能改变各因素的相对重要性,实验在 10~600 m 范围内以 50 m 为间隔设置 12 个高度梯度,在每个高度上分别进行

7 因素 3 水平正交仿真实验,计算各因素极差并归一化得到相对重要性(RI),从而获得各因素 RI 随高度变化的规律。

图 9 为全高度范围内各因素 RI 的平均值,直观反映了各因素在整体上的相对影响程度。无人机高程与云台俯仰角的 RI 均值分别为 0.34 和 0.32,合计占比为 66%,是影响定位误差的主导因素。其中,无人机高程直接决定无人机到地面目标的空间投影距离,其误差直接传递至三维定位结果;云台俯仰角作为姿态角核心参数,通过改变相机视轴指向与像点偏移,经几何关系放大并传导至定位误差。无人机纬度、无人机经度及云台偏航角的 RI 均值都低于 0.15,属于次要影响因素。而无人机俯仰角和无人机偏航角的 RI 均值仅为 0.01,其观测波动主要源于随机误差,对系统定位精度无显著影响。

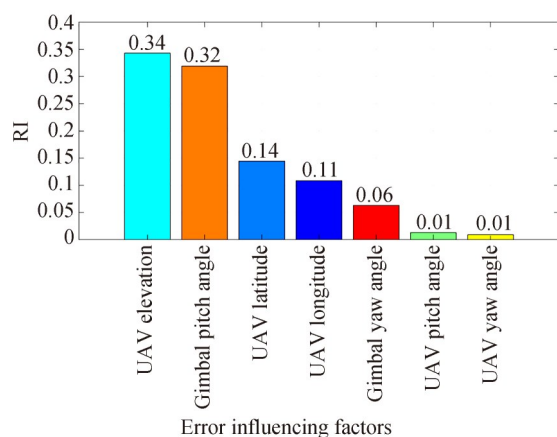


图 9 全高度范围内各因素对定位误差的影响程度

Fig. 9 Impact level of various factors on positioning error across the entire altitude range

考虑到飞行高度不同,各因素对定位精度影响效果不同,因此进一步给出了各因素 RI 随飞行高度的变化趋势,如图 10 所示。云台俯仰角的 RI 随高度增加显著上升,这是由于随着视距增长,微小的俯仰角偏差通过三角函数关系被放大为地面上的较大位置误差,且放大效应随高度增加而增强。无人机高程的 RI 则随高度上升明显下降,原因在于低空时高程误差对定位结果的直接贡献较大,随着高度增加,角度误差的贡献相对上升,导致其重要性降低。无人机经度的 RI 随高度缓慢下降,无人机纬度的 RI 缓慢上升,二

者作为位置参数,其影响变化较为平缓,未表现出显著非线性特征。无人机俯仰角、偏航角及云台偏航角在不同高度保持相对稳定,说明这些姿态误差对定位精度的影响基本不随高度变化。

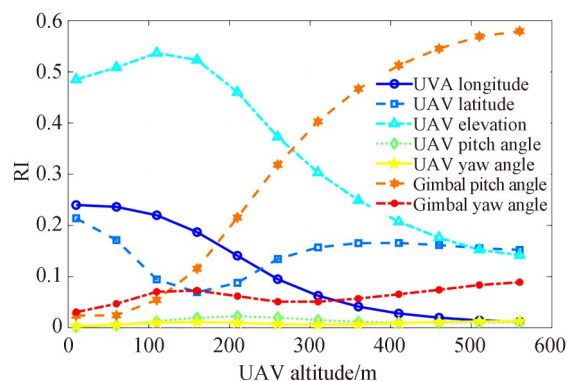


图 10 各因素对定位误差的影响随高度变化趋势图

Fig. 10 Variation trend of the influence of various factors on positioning error with altitude

综上,无人机观测参数误差对目标定位误差的影响中,无人机高程与云台俯仰角为全高度范围内的主导因素,合计贡献为 66%,如果需要调整无人机参数实现更高精度的定位,应予以重点考虑,并且云台俯仰角表现为强高度敏感因素,高空作业时其误差放大效应尤为显著,需严格约束;无人机俯仰角、偏航角及云台偏航角对定位误差影响较小,且在不同高度误差贡献保持稳定。因此,在实际作业中,优先控制无人机高程与云台俯仰角的测量精度,如使用 RTK 厘米级定位模块降低高程误差,选用高精度云台并实施定期校准;高空作业时,应格外关注云台俯仰角测量精度的控制,通过硬件优化与作业前校准降低其偏差。

此外,为评估相机内参标定误差对定位精度的影响,在原有蒙特卡洛仿真框架中加入内参误差项,参考张正友标定法的标定误差,设置焦距误差为 0.008 mm、主点误差为 1.5 pixels。仿真结果表明,在 10~600 m 高度范围内,引入内参误差后平均定位误差由 0.25 m 增大至 0.45 m,并且随着高度的增加内参误差的影响也越来越大,具体的定位误差增量如图 11 所示。将焦距与主点误差纳入敏感性分析体系,按本节设置的条件进行仿真,结果表明,全高度范围内主点的 RI 均

值为 0.35, 成为主导因素之一; 焦距的 RI 为 0.07, 其影响程度小于主点、无人机高程及云台俯仰角。进一步分析各因素 RI 随高度变化趋势, 焦距的 RI 随高度变化相对稳定, 而主点的 RI 随高度增加显著上升, 并且其在整个高度范围都超过了云台俯仰角。这是因为主点误差直接导致目标视线向量在像平面上发生绝对平移, 等效于引入了视线角度的固定偏差, 经计算, 1.5 像素的主点误差等效于约 0.023° 的视线角度偏差, 这一数值大于仿真中设定的云台俯仰角测量误差 (0.01°), 所以主点的 RI 一直大于云台俯仰角。所以, 相机内参标定误差对无人机对地目标定位的影响也至关重要, 实际应用中如需更高精度的定位, 除了对无人机高程与云台姿态精度控制外, 也需对相机内参标定精度进行严格约束与定期校验。

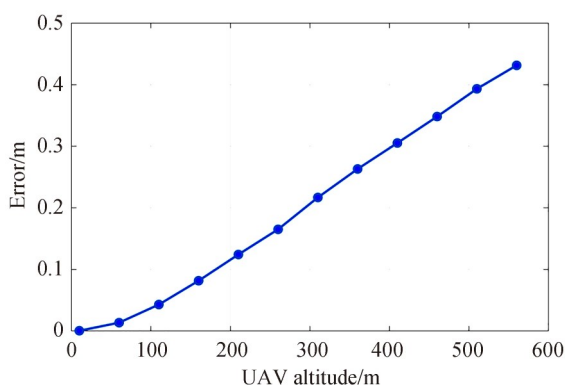


图 11 内参误差引起的定位误差增量随高度变化曲线

Fig. 11 Positioning error increment caused by intrinsic error varying with altitude

关于双观测点间空间位置关系对定位误差的影响, 采用蒙特卡洛仿真方法开展实验。考虑到目标距离、基线长度与交会角之间存在几何耦合, 且交会角作为构型的综合表征对误差起主导作用, 仿真设定双观测点无人机的飞行高度保持一致, 目标距离与基线长度均在 100~500 m 范围内变化, 交会角覆盖 $0^\circ \sim 180^\circ$ 区间, 通过随机生成 100 组仿真场景进行定位, 探究交会角对定位误差的影响。

固定无人机飞行高度为 250 m, 交会角对三个方向定位误差的影响如图 12 所示, 当交会角处于 $57.8^\circ \sim 173.6^\circ$ 区间时, 定位误差比较稳定且均

小于 1 m, 最小误差为 0.47 m。交会角较小时因视线向量几何约束衰减, 定位误差急剧增大, 最终平均误差达到 26.41m。分别控制无人机的飞行高度在 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m 得到的误差随交会角的变化如图 13 所示, 满足分米级精度的交会角区间约 $60^\circ \sim 174^\circ$, 随高度变化未发生明显偏移, 表明几何构型对误差的主导作用显著强于高度变化的影响。从数学上分析, 定义交会角为 ϕ , 定位误差放大因子与 $1/\sin(\phi/2)$ 成正比, 因此当交会角较小时数值解算趋于病态, 导致定位误差很大, 从几何关系来看, 交会角较小时空间几何约束变弱, 定位模型放大了云台角度的测量误差, 微小的角度误差导致解算目标位置的严重偏离。因此, 在实际非平坦地面双观测点目标定位作业中, 建议控制交会角在 60° 以上, 实现稳定可靠的地面目标定位。

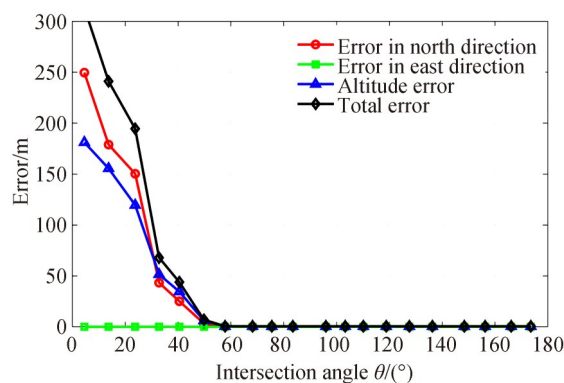


图 12 定位误差随交会角变化曲线

Fig. 12 Positioning error as a function of intersection angle

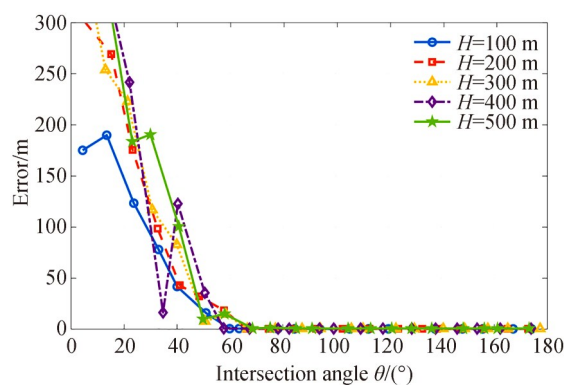


图 13 不同高度下定位误差随交会角变化曲线

Fig. 13 Positioning error as a function of intersection angle at different altitudes

4 定位测量实验与分析

4.1 实验内容

为验证本文提出的利用单目观测的无人机对地目标定位方法的有效性与定位精度,进行室外实地定位实验。实验场地选取视野开阔、无高大遮挡物的标准操场,该环境可有效减少建筑物、树木等对无人机 GPS 信号及图像采集的干扰,同时降低复杂电磁环境对 RTK 定位精度的影响,确保实验数据的可靠性。在数据采集过程中,无人机 RTK 模块全程保持固定解状态,水平定位精度稳定在厘米级;实验时段天气晴朗、光照均匀、无强风,目标成像清晰无过曝。良好的硬件信号质量与光照条件,有效排除了环境干扰对定位精度的潜在影响,确保了实验数据的纯粹性与可靠性。实验目标选用厚度为 1 cm 的绿色方形薄板(长 60 cm×宽 55 cm),其几何特征规则,便于后续图像处理中对目标像素坐标的提取。

实验平台采用 Phantom 4-RTK 无人机,其相机内参出厂前已完成标定,焦距 $f=8.8\text{ mm}$,主点坐标 $(u_x,u_y)=(2\ 726,1\ 845)\text{ px}$ 。该平台集成 RTK 定位模块,水平与竖直方向定位误差均 $\leq 0.1\text{ m}$,可提供可靠的无人机位置与姿态数据,为定位模型的解算提供基础保障。为获取目标真实位置坐标,将无人机平稳放置于目标薄板中心,通过无人机飞控系统记录该点的经度、纬度与大地高程,并将其作为后续定位结果精度评估的基准。

实验流程设计如下:首先规划 15 个不同的无人机观测点,观测点设计覆盖目标区域的多个观测角度及不同飞行高度,以全面验证方法在多样观测条件下的稳定性;无人机在各观测点悬停后,保持云台姿态稳定对目标进行连续拍摄,每个观测点采集 5 组图像数据及对应的无人机状态信息;最后提取目标中心在图像中的像素坐标,利用本文提出的定位模型解算目标位置。为模拟并验证本文方法针对非平坦地面的定位能力,实验中设定了无人机起飞点与目标之间存在高程差,以此检验定位模型对高程变化的适应性与解算精度。实验采集的示例图如图 14 所示。

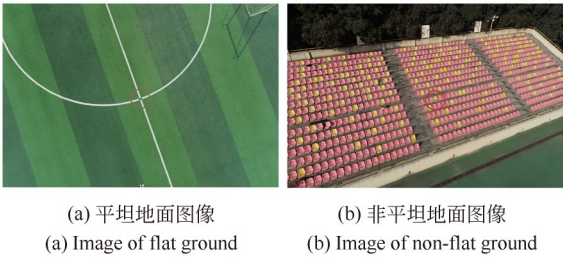


图 14 实验采集图像
Fig. 14 Captured images during experiments

4.2 实验结果

通过上述实验流程,获得目标的实际纬度为 $34.235\ 377\ 41^\circ$ 、经度为 $108.952\ 050\ 80^\circ$ 、大地高程为 382.00 m 。固定其中 1 个观测点的参数作为第一个观测点,无人机在其余 14 个观测点的具体位置信息详见表 3,基于这些数据,利用本文方法对目标进行多次定位解算,计算结果及其对应的定位误差如表 4 所示。

表 3 无人机观测点位置			
Tab. 3 Locations of UAV observation points			
序号	纬度/(°)	经度/(°)	高度/m
1	34.235 332 48	108.952 300 67	16.55
2	34.235 387 36	108.952 280 32	16.87
3	34.235 383 88	108.952 258 92	16.79
4	34.235 321 06	108.952 178 58	15.87
5	34.235 322 49	108.952 179 69	13.43
6	34.235 294 46	108.952 164 51	13.49
7	34.235 315 83	108.952 187 54	11.94
8	34.235 315 95	108.952 188 14	16.9
9	34.235 340 50	108.952 259 21	19.02
10	34.235 340 78	108.952 259 42	18.91
11	34.235 404 08	108.952 220 18	12.56
12	34.235 398 34	108.952 186 39	12.55
13	34.235 387 81	108.952 222 18	20.24
14	34.235 388 33	108.952 221 24	16.42

对表 4 中列出的 14 组定位结果进行统计分析,得到平均定位误差为 0.47 m ,标准差为 0.14 m ,较小的标准差反映出本方法在不同观测角度和距离下具有良好的稳定性和一致性,目标定位误差的波动范围与集中趋势可通过图 15 的固定单观测点的目标定位误差分布图进一步直观呈现。结合误差分布图进一步分析,定位误差整体

表 4 目标定位结果

Tab. 4 Target positioning results

序号	纬度/(°)	经度/(°)	误差/m
1	34.235 380 81	108.952 052 42	0.410
2	34.235 381 02	108.952 053 90	0.518
3	34.235 381 54	108.952 057 61	0.782
4	34.235 380 65	108.952 051 27	0.458
5	34.235 380 18	108.952 047 90	0.408
6	34.235 380 39	108.952 049 41	0.363
7	34.235 380 41	108.952 049 58	0.356
8	34.235 380 49	108.952 050 11	0.363
9	34.235 380 19	108.952 048 01	0.413
10	34.235 380 38	108.952 049 34	0.359
11	34.235 380 47	108.952 050 01	0.380
12	34.235 380 56	108.952 050 60	0.430
13	34.235 380 19	108.952 047 99	0.524
14	34.235 381 56	108.952 057 74	0.864

呈现集中趋势,但极差为 1.01 m,存在个别误差显著偏大的离群点,这是由于实验中存在无人机传感器测量的偶然误差导致定位误差较大。

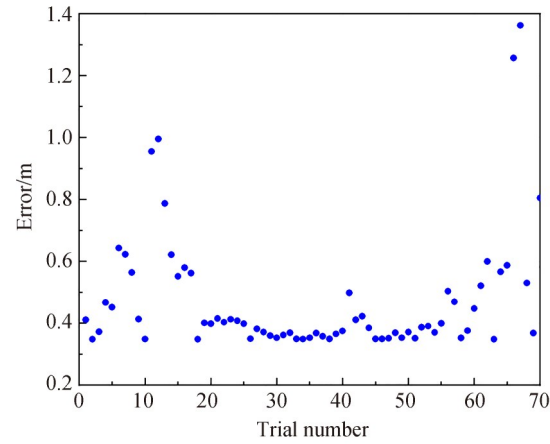


图 15 固定单观测点的目标定位误差分布图

Fig. 15 Error distribution map of target positioning based on a fixed single observation point

为进一步验证非平坦地面下两观测点定位方法的适用性与稳定性,提升实验的充分性,分别从 14 个观测点中选取 1 组有效图像与姿态数据,进行不重复的任意两观测点组合定位实验,分别解算目标位置并统计定位误差,得到的平均定位误差为 0.50 m,标准差为 0.22 m,极差为

1.32 m,相较于固定单观测点的目标定位误差分布更离散,误差波动更大,由于此实验没有控制两观测点的空间位置关系,而两观测点视线交会角过小会导致空间几何约束变弱,定位误差增大。该模式下的具体定位结果分布如图 16 所示。

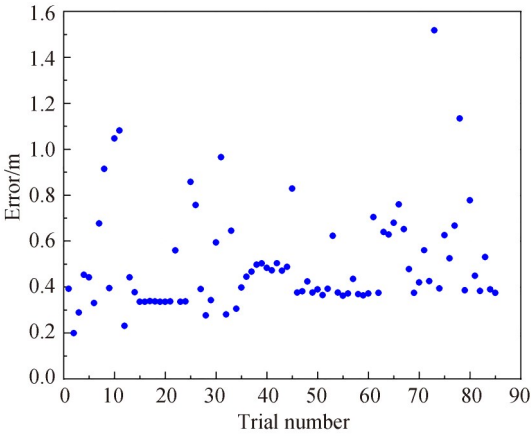


图 16 任意两观测点组合的目标定位误差分布图

Fig. 16 Target positioning error distribution for any two observation points

为评估本文方法在实际无人机任务中的适用性,对其计算复杂度与计算耗时进行分析。本文提出的无人机地面目标定位算法基于纯几何解析模型,时间复杂度为 $O(1)$,平坦地面单观测点定位模式平均耗时 13 ms,非平坦地面双观测点定位模式平均耗时 30 ms,具备良好的实时性与工程实用性。

4.3 对比实验分析

为验证本文方法的有效性,分别选取文献^[26](对比方法 1)和文献^[20](对比方法 2)两种先进的无人机对地定位方法作为对比方法,分别在平坦地面和非平坦地面两种工况下进行实验,与本文方法对比的实验定位误差结果如表 5 所示。

对比方法 1 通过构建图像坐标系与地理坐标系间的空间三角几何映射模型,计算目标在地面

表 5 对比实验定位误差

Tab. 5 Positioning errors of comparative experiments(m)

	本方法	对比方法 1	对比方法 2
平坦地面误差	0.34	0.85	2.24
非平坦地面误差	0.47	6.08	6.88

的经纬度偏移并逆变换实现目标的定位,但其未考虑无人机质心和相机光心的位置偏差对定位的影响,因此本文方法相较于该方法在平坦地面的定位误差减小 60%;对比方法 2 是一种垂直投影定位法,通过控制云台俯仰角,使相机光轴垂直于水平地面,从而通过无人机相对高度和目标在图像上的位置得到相机坐标系下的目标坐标,与该方法相比,本文方法在平坦地面的定位误差减小 84.82%。由于两种对比方法均需利用无人机与目标所在地面的相对高度补充深度信息,而在非平坦地面无法获取无人机相对于目标的垂直距离,因此本文方法相较于对比方法 1 和对比方法 2 定位误差分别减小了 92.27% 和 93.17%,更适用于复杂多变的战场环境。

5 结 论

本文提出了一种基于单目观测的无人机对地目标定位方法,建立了载机地理坐标系下的目标定位投影模型,根据地面是否平坦设计了单观测点和双观测点定位算法。该方法有效摆脱了传统单目视觉无人机对地目标定位方法对目标

或场景先验信息的依赖,不局限于平坦地面,提升了定位模型的通用性。实际实验结果表明,无人机距地高度为 10~20 m 时,提出的方法对平坦地面单观测点定位的误差为 0.34 m,对非平坦地面双观测点定位的误差为 0.47 m,较现有方法定位精度均明显提升,验证了该方法在不同地形条件下的有效性与优越性。

基于 Phantom 4-RTK 无人机的蒙特卡洛仿真实验误差分析表明,高程与云台姿态角的测量精度是影响定位误差的主导因素,其中,云台俯仰角对高度具有强敏感性,高空作业时其误差放大效应尤为显著;非平坦地面双观测点与目标之间交会角大于 60°时可保证定位的稳定性;非平坦地面平均定位误差仿真与实际实验结果一致,为无人机定位系统的误差抑制与观测策略优化提供了依据。

作者贡献说明:

夏晓华:方法提出,实验设计及论文修改;
周艳茹:方法提出,算法开发及论文撰写;
马新哲:实验数据分析和处理;
曹彬:实验指导;
谢季宸:论文修改。

参考文献:

- [1] 刘雅宁,卢浩,程彦汇.一种基于机器学习的无人机集群协同定位方法[J].自动化与信息工程,2025,46(2):32-37.
LIU Y N, LU H, CHENG Y H. A cooperative localization method for unmanned aerial vehicle swarm based on machine learning[J]. *Automation & Information Engineering*, 2025, 46(2): 32-37. (in Chinese)
- [2] PAN T W, GUI J J, DONG H B, *et al.* Vision-based moving-target geolocation using dual unmanned aerial vehicles[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 389.
- [3] MICHALAK J. Accuracy of 3D ground radio station location by a single unmanned aerial vehicle (UAV) as a function of an increasing number of received signal strength indicator (RSSI) measurements[J]. *Sensors*, 2025, 25(17): 5452.
- [4] 傅晋博,张栋,王孟阳,等.面向目标定位精度提升的无人机航迹规划[J].兵工学报,2023,44(11):3394-3406.
FU J B, ZHANG D, WANG M Y, *et al.* Unmanned aerial vehicle path planning for improved target positioning accuracy[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(11): 3394-3406. (in Chinese)
- [5] 刘淑青,高永新,韩德强.采用相对位置量测的紧耦合式多无人机协同定位算法[J].西安交通大学学报,2024,58(10):178-187.
LIU S Q, GAO Y X, HAN D Q. Tightly coupled cooperative localization algorithm for multiple unmanned aerial vehicles based on relative position measurements[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(10): 178-187. (in Chinese)
- [6] 朱得禄,李东泽,郭鸿博,等.无人机视觉地理定位研究综述[J].导航与控制,2023,22(3):21-33,20.
ZHU D K, LI D Z, GUO H B, *et al.* A review of vision-based geolocation using UAVs[J]. *Navigation and Control*, 2023, 22(3): 21-33, 20. (in Chinese)

- nese)
- [7] YANG X W, LIN D F, ZHANG F B, *et al.* High accuracy active stand-off target geolocation using UAV platform[C]. 2019 *IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*. December 11-13, 2019. Chongqing, China. IEEE, 2019: 1-4.
 - [8] 郭润泽, 孙晓永, 孙备, 等. 无人机载激光测距仪校准和引导定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 44-55.
 - GUO R Z, SUN X Y, SUN B, *et al.* Calibration and guidance-positioning method for UAV-mounted laser rangefinders[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(4): 44-55. (in Chinese)
 - [9] ZHANG X F, YUAN G Q, ZHANG H W, *et al.* Precise target geo-location of long-range oblique reconnaissance system for UAVs[J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 1903.
 - [10] 周嘉星, 陈志高, 高登巍, 等. 基于图像匹配的无人机侦察目标定位方法[J]. 弹箭与制导学报, 2025, 45(3): 287-294.
 - ZHOU J X, CHEN Z G, GAO D W, *et al.* A UAV reconnaissance target localization method based on image matching[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2025, 45(3): 287-294. (in Chinese)
 - [11] REN K, DING L, WAN M J, *et al.* Target localization based on cross-view matching between UAV and satellite[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(9): 333-341.
 - [12] PAN T W, DENG B S, DONG H B, *et al.* Monocular-vision-based moving target geolocation using unmanned aerial vehicle[J]. *Drones*, 2023, 7(2): 87.
 - [13] GUO Z J, ZHAO F, SUN Y, *et al.* Research on target localization in airborne electro-optical stabilized platforms based on adaptive extended Kalman filtering[J]. *Measurement*, 2024, 234: 114794.
 - [14] LIU X, ZHANG Z Y. A vision-based target detection, tracking, and positioning algorithm for unmanned aerial vehicle[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 5565589.
 - [15] QIU X, LIAO S Y, YANG D F, *et al.* High-precision visual geo-localization of UAV based on hierarchical localization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2025, 267: 126064.
 - [16] 罗卿莉, 张书斌, 蒋鑫涛, 等. 融合无人机位姿信息的地面目标定位方法[J]. 测绘通报, 2025(8): 19-25.
 - LUO Q L, ZHANG S B, JIANG X T, *et al.* Ground target localization method combining unmanned aerial vehicle pose information[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2025(8): 19-25. (in Chinese)
 - [17] 凌智城, 雷仲魁, 黄大庆, 等. 融合多维姿态自适应感知的无人机目标定位[J]. 光学精密工程, 2024, 32(14): 2272-2285.
 - LING Z C, LEI Z K, HUANG D Q, *et al.* UAV target positioning integrating multi-dimensional attitude adaptive sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(14): 2272-2285. (in Chinese)
 - [18] XIN X L, CHEN X R, ZHOU H Y, *et al.* Gaussian mixture filter-incorporated self-attention residual neural network for UAV joint error identification and target localization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 6509914.
 - [19] 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.
 - SONG J, ZHENG H L, YUAN J P, *et al.* Research on target ranging and localization methods for UAVs based on monocular vision[J]. *Computer Measurement & Control*, 2025, 33(6): 215-222, 253. (in Chinese)
 - [20] 王宁, 李哲, 梁晓龙, 等. 无人机单载荷目标检测及定位联合实现方法[J]. 光电与控制, 2021, 28(11): 94-100.
 - WANG N, LI Z, LIANG X L, *et al.* A joint realization method for UAVs with single load in object detecting and locating[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(11): 94-100. (in Chinese)
 - [21] CHEN N X, FAN J Q, YUAN J Y, *et al.* OBTPN: a vision-based network for UAV geo-localization in multi-altitude environments[J]. *Drones*, 2025, 9(1): 33.
 - [22] HAO Y, HE M F, LIU Y Z, *et al.* Range - visual - inertial odometry with coarse-to-fine image registration fusion for UAV localization[J]. *Drones*, 2023, 7(8): 540.
 - [23] TONG P F, YANG X R, PENG X Z, *et al.* RTAPM: a robust top-view absolute positioning method with visual-inertial assisted joint optimization

- tion[J]. *Drones*, 2025, 9(1): 37.
- [24] 罗鑫磊,姜卫平. 一种修正的自适应蒙特卡洛法用于非线性函数误差传播[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 36-41, I0001.
- LUO X L, JIANG W P. A modified adaptive Monte Carlo method for nonlinear function error propagation[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(1): 36-41, I0001. (in Chinese)
- [25] YE J, ZHANG Y, CHEN Y J. An improved Monte Carlo tree search algorithm with dynamic classification for multi-spacecraft multi-target allocation[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 76(1): 412-428.
- [26] 姚雨,宋春林,邵江琦. 无人机航拍军事车辆实时检测及定位算法[J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 354-360.
- YAO Y, SONG C L, SHAO J Q. Real-time detection and localization algorithm for military vehicles in drone aerial photography[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(S1): 354-360. (in Chinese)

通讯作者:



夏晓华(1987—),男,山东临沂人,博士,副教授,2009年于中国石油大学(华东)获得学士学位,2015年于西安交通大学获得博士学位,主要从事机器视觉与光机电一体化方面的研究。

E-mail:xhxia@chd.edu.cn

作者简介:



周艳茹(2002—),女,陕西西安人,硕士研究生,2024年于长安大学获得学士学位,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:2370632817@qq.com