

文章编号 1004-924X(2025)19-3009-12

无人机光电成像目标定位与精度影响因素

王欢庆, 韩裕生, 薛模根, 王 峰, 黄勤超*
(陆军兵种大学 信息工程系, 安徽 合肥 230031)

摘要:为提高无人机光电成像目标定位精度,进一步优化光电成像定位方法及系统设计。构建了光电成像目标定位模型,通过坐标转换实现空间几何定位,运用误差合成理论评估误差敏感性。采用蒙特卡洛法结合实际测量评估定位模型精度,探究测角定位误差耦合效应。蒙特卡洛法表明,随着测量次数增加,定位误差在大地直角坐标系上服从均值为 0 的正态分布,空间定位误差从单次定位的 18.71 m 减小到 0.28 m,接近测量真值。经过精度影响因素分析,定位误差和测距误差的影响主要取决于误差数值本身,而角度误差和姿态误差的影响还与测量状态密切相关。本文评估了多源异质误差的耦合效应,揭示了各误差源对定位精度的影响机制,为无人机光电成像定位的误差抑制策略制定提供了理论依据,对提升目标定位测量精度具有重要意义。

关键词:光电成像定位;定位精度;目标定位模型;误差分析

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253319.3009

CSTR:32169.14.OPE.20253319.3009

UAV-borne photoelectric imaging target localization and precision-influencing factors

WANG Huanqing, HAN Yusheng, XUE Mogen, WANG Feng, HUANG Qinchao*

(Department of Information Engineering, Army Arms University of PLA,
Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: 1802019569@qq.com

Abstract: To improve target positioning accuracy in UAV-based electro-optical imaging and to inform localization methodology and system design, an electro-optical imaging target localization model is developed. Spatial geometric positioning is performed via coordinate transformation, and error sensitivity is quantified using error synthesis theory. Model accuracy is evaluated through Monte Carlo simulations combined with experimental measurements, with emphasis on the coupling effects of angular positioning errors. Monte Carlo results indicate that, as the number of measurements increases, positioning errors in the geodetic Cartesian coordinate system converge to a normal distribution with zero mean. The spatial positioning error is reduced from 18.71 m for a single measurement to 0.28 m with multiple measurements, approaching the actual measurement value. Analysis of accuracy-influencing factors shows that the effects of positioning and ranging errors are predominantly determined by their magnitudes, whereas the impacts of angular and attitude errors are also strongly dependent on the measurement state. This study therefore

收稿日期:2025-06-28;修订日期:2025-08-08.

基金项目:安徽省科技创新平台重大科技项目(No. S202305a12020020)

quantifies the coupling of multi-source heterogeneous errors, clarifies the mechanisms by which distinct error sources affect positioning accuracy, and provides a theoretical foundation for developing error suppression strategies in UAV electro-optical imaging localization, thereby contributing to improved target positioning and measurement precision.

Key words: photoelectric imaging localization; positioning accuracy; target localization model; error analysis

1 引 言

目前,无人机光电侦察平台在现代战争中扮演着至关重要的角色,它能够为指挥中心提供实时的战场信息和目标定位数据,对战局发展起到关键作用^[1-2]。目标侦察定位功能,可为指挥员在态势地图上精确标注目标位置提供关键信息支撑,进而实现目标的精准跟踪或打击。随着光电成像技术的快速发展,光电设备成像稳定性及清晰性都得到了显著提升^[3-5],这为实现高精度目标定位提供了硬件保障。然而,除了成像设备,光电定位测量的精度还受到其他多种因素影响,如测角和测距误差等,导致目前光电定位精度普遍不高。因此,研究无人机光电成像定位方法及其精度影响因素对于提升其在现代军事作战中的效能至关重要。

当前,光电成像目标高精度定位研究主要集中在三个方向。其一,基于地球椭球模型或数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)构建更精确的几何定位模型^[6],如 DEM 算法显著降低了地球曲率和地形起伏引入的定位误差^[7]。其二,通过策略设计(如多次成像、多传感器融合、多无人机协同)获取冗余信息以提升定位精度^[8-10]。其三,利用卡尔曼滤波、移动平均滤波以及粒子滤波等技术对定位结果进行后处理优化,提高定位结果的稳定性和可靠性^[11-13]。

然而,综合分析现有研究可见,上述方法主要着眼于提升输入数据质量或宏观层面优化定位算法模型本身,对于定位链路中关键误差源的精细溯源、各类误差(如位置、测角、姿态、测距误差)之间的动态耦合效应及其对最终精度的差异化影响机制尚未进行系统性的深入探究。具体而言,DEM 模型优化主要解决地球形状和地形

带来的系统性偏差,但对传感器自身测量误差及其相互作用关注不足。冗余信息获取策略通过平均或互补效应降低随机误差影响,但并未深入剖析误差产生的根源和不同类型误差在特定测量状态下的传播特性与耦合关系。滤波优化技术主要平滑输出结果或估计状态,但对输入误差的内在关联性和非线性传递过程缺乏清晰的机理分析。

因此,针对现有研究在误差耦合机制分析方面的不足,本文聚焦于无人机光电成像定位链路中的多源异质误差问题,根据光电成像目标定位模型系统梳理与精确溯源主要误差源;基于误差合成理论深入评估各误差源间的耦合效应及其对定位精度的敏感性;采用蒙特卡洛法结合定位数据量化验证模型精度并揭示关键误差影响状态依赖性。通过明晰误差产生、传递与耦合的内在规律,可为后续设计针对性的误差抑制策略,从根本上提升定位精度提供坚实的理论基础。

2 原 理

2.1 定位系统总体结构

无人机目标定位的目的是求取目标在大地直角坐标系下三维坐标或经纬度信息。图 1 所示为无人机光电成像定位过程示意图。在定位过程中,光电图像与遥测数据实时传输至地面站并进行显示。操作员控制飞行系统及光电成像设备对目标进行搜索跟踪^[14-15]。当目标出现在成像视场内时,将目标稳定保持在图像中心位置。此时截取图像帧,并将飞机平台的航空姿态测量数据、飞机 GPS 接收机信息、光电载荷自身的视轴位置以及其激光测距值等关键信息发送至地面

站计算机。地面站计算机接收这些数据后,计算出目标在空间中的三维坐标,从而实现目标的精确定位。



图1 无人机目标定位过程

Fig. 1 Target positioning process of UAV

2.2 空地协同光电成像目标定位模型

在空间几何学的框架下,已知一点坐标及其至另一点的方向与距离,即可计算出另一点的三维空间坐标,无人机光电侦察目标的快速定位正是基于这一原理。该定位过程需定义以下坐标系:

(1)相机物理坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$: 原点在相机的光心, $O_c X_c$ 轴为光轴方向,满足右手法则坐标系。

(2)光电吊舱坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$: 原点为光电吊舱方位回转轴与俯仰回转轴的交点; $X_T O_T Z_T$ 为方位回转平面, $O_T X_T$ 轴为方位角零位线,指向光电吊舱前方为正; $O_T Y_T$ 轴为方位回转轴,指向天空为正; $O_T Z_T$ 轴与 $O_T X_T$ 、 $O_T Y_T$ 轴构成右手坐标系。

(3)地理坐标系 $O_G X_G Y_G Z_G$: 原点定义在无人机的质心, $O_G Y_G$ 轴在无人机所处位置的当地水平面内,指向正北, $O_G Z_G$ 轴平行于当地地理垂线,指向天顶。

(4)大地直角坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ 、大地坐标系: 大地直角坐标系原点 O_W 为地球质心; $O_W X_W$ 轴由地心指向 BIH 1984.0 的零度子午面和 BIH 1984.0 协议地球赤道的交点; $O_W Y_W$ 轴由地心指向 BIH 1984.0 定义的协议地球极的方向; $O_W Z_W$ 轴与 $O_W X_W$ 轴、 $O_W Y_W$ 轴垂直,构成右手坐标系,其与大地坐标系(经纬度坐标系)可以相互转换^[16]。

无人机的位置、姿态角及目标成像点等确定

后,结合激光测距仪测得的无人机到目标的距离,即可计算出目标点在大地直角坐标系中的坐标值^[17-18]。在锁定跟踪状态下,目标通常被稳定在像平面中心,此时其在相机物理坐标系中的坐标为 $(R, 0, 0)$ 。

目标定位计算模型的变换过程如图2所示。

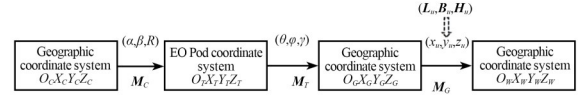


图2 目标定位过程坐标转换关系

Fig. 2 Coordinate transformation relationship in target positioning process

2.2.1 相机物理坐标系到光电吊舱坐标系

目标锁定并稳定跟踪后处于像面中心,经激光测距仪测量目标到相面中心的距离为 R ,因此在相机物理坐标系中目标的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

光电吊舱用于对地观测,其坐标系为 $O_T X_T Y_T Z_T$ 。光电吊舱坐标系与相机物理坐标系之间的关系如图3所示。 P 为目标点, α 和 β 分别为光电吊舱的方位角和俯仰角。其中, α 为目标 P 与 O 点的连线在 $X_T O_T Z_T$ 平面的投影线与 $O_T X_T$ 轴正向的夹角, β 为目标 P 与 O 点的连线与

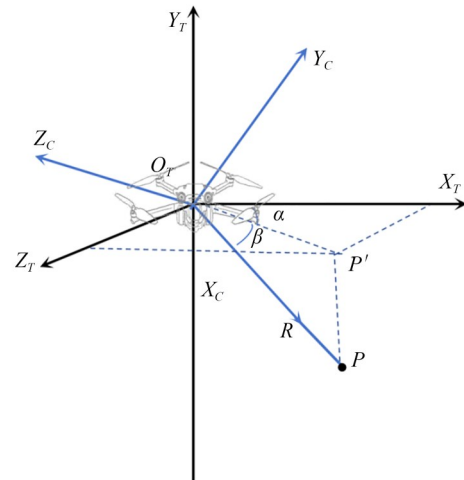


图3 相机物理坐标系和光电吊舱坐标系关系

Fig. 3 Relationship between physical coordinate system of camera and coordinate system of photoelectric pod

$X_T O_T Z_T$ 平面的夹角,目标 P 在 $X_T O_T Z_T$ 平面下方(Y_T 轴负半轴)为负,反之为正。

坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ 到坐标系 $O X_T Y_T Z_T$ 的变换

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = M(\alpha, \beta) = M(\alpha) \cdot M(\beta) \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2.2.2 光电吊舱坐标系到地理坐标系

光电吊舱坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 与地理坐标系 $O_G X_G Y_G Z_G$ 之间由无人机姿态角即俯仰角

首先需要坐标系 $O_C X_C Y_C Z_C$ 绕 $O_C Z_C$ 轴逆时针旋转 β 角,然后再 $O_C Y_C$ 轴逆时针旋转 α 角,得到坐标系 $O_T X_T Y_T Z_T$ 。因此可表示为:

θ 、偏航角 ϕ 以及横滚角 γ 确定。同上,光电吊舱体轴坐标系到地理坐标系转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = M(\gamma, \theta, \phi) = M(\phi) \cdot M(\theta) \cdot M(\gamma) \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.2.3 地理坐标系到大地直角坐标系

地理坐标系 $O_G X_G Y_G Z_G$ 与大地直角坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 之间由3个参量确定——经度 L_u 、纬

度 B_u 和高度 H_u ,如图4所示。

根据经纬度与大地直角坐标系之间的转换关系,需要经过以下矩阵转换:

$$\begin{bmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ z_{w1} \end{bmatrix} = M(B_u, L_u, H_u) = M(H_u) \cdot M(L_u) \cdot M(B_u) \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin L_u & \cos L_u \\ 0 & -\cos L_u & \sin L_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

则目标 T 在下坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 的坐标 (x_{Tw}, y_{Tw}, z_{Tw}) 如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} x_{Tw} \\ y_{Tw} \\ z_{Tw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ z_{w1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

即:

$$\begin{bmatrix} x_{Tw} \\ y_{Tw} \\ z_{Tw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{bmatrix} + M(H_u, L_u, B_u) \cdot M(\alpha, \beta) \cdot M(\gamma, \theta, \phi) \cdot M(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: (x_u, y_u, z_u) 为无人机大地直角坐标,可根据式(7)进行经纬高 (L_u, B_u, H_u) 与直角坐标 (x_u, y_u, z_u) 之间的转换。

$$\begin{cases} x_u = (N + H_u) \cos B_u \cos L_u \\ y_u = (N + H_u) \cos B_u \sin L_u \\ z_u = [N(1 - e^2) + H_u] \sin B_u \end{cases}, \quad (7)$$

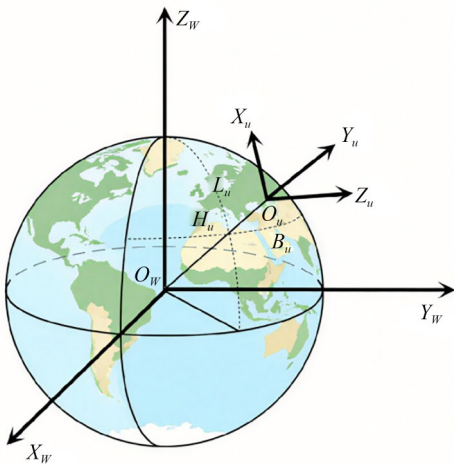


图4 地理坐标系到大地直角坐标系关系

Fig. 4 Relationship from the geographic coordinate system to the geodetic rectangular coordinate system

其中 $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_u}$ 。

$$\begin{cases} B_u = \arctan [z_u + be'^2 \sin^3 u / p - ae^2 \cos^3 u] \\ L_u = \arctan [y_u / x_u] \\ H_u = p \cos B_u + z \sin B_u - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_u}, (8) \\ p = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \\ u = \arctan [az_u / bp] \end{cases}$$

其中: a 为地球参考椭球长半轴, b 为地球参考椭球短半轴, e 为第一偏心率, e' 为第二偏心率, N 为卯西圈曲率半径。

3 定位精度影响因素

3.1 误差溯源

根据前述目标定位方程式(6)可知,目标位置是关于光电吊舱位置,方位角、俯仰角,平台俯仰角、偏航角、滚转角以及目标距离等的函数。根据误差理论与数据处理中误差传递关系,总的定位误差如下:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \quad (9)$$

其中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 x_{Tw}, y_{Tw}, z_{Tw} 的测量误差。且有:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial x_u}\right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial y_u}\right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial z_u}\right)^2 \sigma_{z_u}^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \gamma}\right)^2 \sigma_\gamma^2 + \\ \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2 \\ \sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial x_u}\right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial y_u}\right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial z_u}\right)^2 \sigma_{z_u}^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \gamma}\right)^2 \sigma_\gamma^2 + \\ \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2 \\ \sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial x_u}\right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial y_u}\right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial z_u}\right)^2 \sigma_{z_u}^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \gamma}\right)^2 \sigma_\gamma^2 + \\ \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \phi}\right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2 \end{cases}. \quad (10)$$

由上式可以得出,误差源主要有位置误差 $\sigma_{x_u}^2, \sigma_{y_u}^2, \sigma_{z_u}^2$,测角误差 $\sigma_\alpha^2, \sigma_\beta^2$,姿态误差 $\sigma_\gamma^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\phi^2$,测距误差 σ_R^2 4种。

载相定位误差主要是定位装置对光电吊舱位置测量的精度,另外还包括光电吊舱与无人机平台中心的安装误差等。

吊舱伺服测角误差因光电吊舱由伺服转台连接并控制而产生,具体包括方位角测量误差和俯仰角测量误差。该角度误差受多种因素影响,如角度编码器测量精度不足、角度编码器与航空平台初始对准偏差、航空平台轴系误差、光学成像系统与轴系对准误差、跟踪脱靶测量误

差等。

三轴姿态误差是无人机相对当地水平面姿态角产生的误差,涵盖俯仰角、偏航角和滚转角测量误差,主要由姿态测量设备的测量精度不足和初始安装偏差造成。

激光测距误差主要是激光测距测量的目标相对光电吊舱的距离误差,主要受测距机精度、光轴平行度等因素影响。

3.2 误差源耦合效应评估与敏感性分析

根据前文分析构建了光电成像定位模型,基于上述模型分别对误差溯源结果进行偏导运算以探究误差耦合效应及误差源对定位误差的敏

感性。其中,经度 L_u 、纬度 B_u 、高度 H_u 是平台位置 (x_u, y_u, z_u) 的函数,可视为常数。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_{Tw}}{\partial R} \\ \frac{\partial y_{Tw}}{\partial R} \\ \frac{\partial z_{Tw}}{\partial R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_u}{\partial R} \\ \frac{\partial y_u}{\partial R} \\ \frac{\partial z_u}{\partial R} \end{bmatrix} + M(\alpha, \beta) \cdot M(\gamma, \theta, \phi) \cdot M(B_u, L_u, H_u) \begin{bmatrix} \frac{\partial x_c}{\partial R} \\ \frac{\partial y_c}{\partial R} \\ \frac{\partial z_c}{\partial R} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: $M(\alpha, \beta)$, $M(\gamma, \theta, \phi)$, $M(B_u, L_u, H_u)$ 均为坐标系旋转矩阵,不会改变空间中矢量的长度,因此可得:

$$E_R = \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial R} \right)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial R} \right)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial R} \right)^2 \sigma_R^2 = \sigma_R^2. \quad (12)$$

3.2.2 目标定位误差与位置误差的关系

同理,将式(6)分别对 x_u, y_u, z_u 求偏导:

$$\begin{aligned} E_D &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial x_u} \right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial y_u} \right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial z_u} \right)^2 \sigma_{z_u}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial x_u} \right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial y_u} \right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial z_u} \right)^2 \sigma_{z_u}^2 + \\ &\quad \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial x_u} \right)^2 \sigma_{x_u}^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial y_u} \right)^2 \sigma_{y_u}^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial z_u} \right)^2 \sigma_{z_u}^2 = \\ &\quad \sigma_{x_u}^2 + \sigma_{y_u}^2 + \sigma_{z_u}^2 = \sigma_D^2. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E_\gamma &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2 = [(R \cos \gamma \sin \beta - R \sin \gamma \cos \beta \sin \alpha)^2 + \\ &\quad (R \sin \gamma \sin \beta + R \cos \gamma \cos \beta \sin \alpha)] \sigma_\gamma^2 = R^2 [1 - (\cos \beta \cos \alpha)^2] \sigma_\gamma^2, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_\theta &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \theta} \right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \theta} \right)^2 \sigma_\theta^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \theta} \right)^2 \sigma_\theta^2 = [(R \cos \beta \cos \alpha \sin \theta + (R \sin \beta \cos \gamma - \\ &\quad R \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma) \cos \theta)^2 + (R \cos \beta \cos \alpha \cos \theta - (R \sin \beta \cos \gamma - \\ &\quad R \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma) \sin \theta)] \sigma_\theta^2 = R^2 [1 - (\sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma)^2] \sigma_\theta^2, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E_\phi &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \phi} \right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \phi} \right)^2 \sigma_\phi^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \phi} \right)^2 \sigma_\phi^2 = \{ [(R \cos \beta \cos \alpha \cos \theta + (R \sin \beta \cos \gamma - \\ &\quad R \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma) \sin \theta) \sin \phi - (R \sin \beta \sin \gamma + R \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma) \cos \phi]^2 + \\ &\quad [(R \cos \beta \cos \alpha \cos \theta - (R \sin \beta \cos \gamma - R \cos \beta \sin \alpha \sin \gamma) \sin \theta) \cos \phi - \\ &\quad ((R \sin \beta \sin \gamma + R \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma) \sin \phi)]^2 \} \sigma_\phi^2 = \\ &\quad R^2 [1 - (\cos \beta \cos \alpha \sin \theta + \sin \beta \cos \theta \cos \gamma - \cos \beta \sin \gamma \sin \alpha \cos \theta)^2] \sigma_\phi^2. \end{aligned} \quad (18)$$

3.2.5 目标定位误差与各误差源误差的关系

综合式(12)~式(18)对单个误差源偏导数

3.2.1 目标定位误差与测距误差的关系

将式(6)对 R 求偏导可得:

3.2.3 目标定位误差与吊舱俯仰角和方位角误差的关系

将式(6)分别对 β 和 α 求偏导:

$$\begin{aligned} E_\beta &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 = \\ &\quad [(-R \sin \beta)^2 + (R \cos \beta)^2] \sigma_\beta^2 = R^2 \sigma_\beta^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E_\alpha &= \left(\frac{\partial x_{Tw}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial y_{Tw}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left(\frac{\partial z_{Tw}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 = \\ &\quad [(-R \cos \beta \sin \alpha)^2 + (R \cos \beta \cos \alpha)^2] \sigma_\alpha^2 = \\ &\quad R^2 \cos^2 \beta \sigma_\alpha^2. \end{aligned} \quad (15)$$

3.2.4 目标定位误差与三轴姿态角误差的关系

将式(6)分别对 γ, θ, ϕ 求偏导并进行上述运算,有:

的分析结果,根据误差合成公式可得目标定位总误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_R^2 + R^2 \{ \sigma_\beta^2 + \cos^2 \beta \sigma_\alpha^2 + [1 - (\cos \beta \cos \alpha)^2] \sigma_\gamma^2 + [1 - (\sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \sin \alpha \cos \gamma)^2] \sigma_\theta^2 + [1 - (\cos \beta \cos \alpha \sin \theta + \sin \beta \cos \theta \cos \gamma - \cos \beta \sin \gamma \sin \alpha \cos \theta)^2] \sigma_\phi^2 \}}. \quad (19)$$

根据式(19)推导可见,定位误差和测距误差对目标定位的影响仅取决于其误差数值大小,与测量状态无关。而角度误差和姿态误差的影响,除与误差数值相关外,还受测量状态影响。相同误差条件下,不同测量状态可能导致定位误差不同。此外,在同等测量误差条件下,随着目标与平台距离增大,定位误差也会越大。

4 误差定位模型实验与精度分析

机载光电定位测量系统的定位精度是衡量其性能优劣的关键指标,通过分析定位过程的误差旨在研制出更高精度的光电测量系统,从而得

$$\Delta E_r = C(R + \Delta R, \alpha + \Delta\alpha, \beta + \Delta\beta, \gamma + \Delta\gamma, \phi + \Delta\phi, \theta + \Delta\theta, B_u + \Delta B_u, L_u + \Delta L_u, H_u + \Delta H_u) - C(R, \alpha, \beta, \gamma, \phi, \theta, B_u, L_u, H_u), \quad (20)$$

其中: ΔE_r 为误差量, C 为目标定位模型, Δ 表示各参数的测量误差。

为评估目标定位模型的准确性,本研究在陆军某试验基地进行了飞行实验,为避免环境因素对实验数据干扰,选择通视条件良好、风力小于2级的晴朗天气条件下进行实验,获取飞行数据,通过控制变量法解耦多源误差。首先,依据无人机实测数据确定各参数名义值,再结合设备精度指标标注误差范围生成含误差参量,即先按参数0误差输入各个参数名义值,求得目标无误差时的定位结果,保存结果作为定位真值,再运用randn()函数,生成各个参量的伪随机序列。鉴于实际传感器特性,各测量误差参数符合正态分布规律。表1汇总了各误差参数的名称、误差参数的实际值和其正态概率密度的标准差值^[22]。

为了验证本文定位方案的准确性,开展了模拟定位与实际定位的对比实验。鉴于测量误差多属随机误差,为降低单次测量的随机性影响,同时综合考虑定位实验的数据量,本实验进行100次重复测量。在仿真环境下,借助合作信标进行100次模拟定位实验,获得X,Y,Z方向的平均定位误差分别为1.10,-0.63和-0.73 m,空间位置误差约为1.47 m。在此基础上,尽可能保证相同测试条件下又进行了100次定位实验,并采用同一模型计算定位结果,其X,Y,Z方向的平均误差分别为2.68,1.74和2.24 m,空间位置

到更高精度的定位结果,因此,可采用蒙特卡洛法分析模型的正确性和准确性^[19]。

4.1 蒙特卡洛法定位模型误差验证

蒙特卡洛方法^[20-21](或称随机模拟方法)是计算机技术进步催生的一种研究手段。其核心在于利用符合概率分布的随机抽样,替代实际中难以直接获取的数据,从而求解目标问题。本研究将该方法应用于成像定位模拟,通过设定充足样本量,并将输出结果以图表形式直观呈现,便于理解分析。

在对目标定位误差分析时,需要知道机载光电测量系统坐标转换过程中各参数的测量值及其测量误差对定位结果的影响,所以运用蒙特卡洛法建立的误差传递模型为:

表1 定位参数及误差数据

Tab. 1 Positioning parameters and error data

Parameter category	True value of measurement	Variable error σ
UAV latitude $B_u/(^{\circ})$	30	0.000 01
UAV longitude $L_u/(^{\circ})$	120	0.000 01
UAV altitude H_u/m	350	0.2
Pod azimuth $\alpha/(^{\circ})$	40	0.1
Pod pitch angle $\beta/(^{\circ})$	-25	0.1
UAV roll angle $\gamma/(^{\circ})$	-6	0.1
UAV yaw angle $\phi/(^{\circ})$	5	0.1
UAV pitch angle $\theta/(^{\circ})$	-4	0.1
Laser ranging R/m	3 000	0.5

误差约为3.90 m。对比结果表明,本文定位模型具有较高的准确性,而实际误差高于模拟误差的主要原因在于实际环境中存在的系统误差及其他未建模环境干扰因素在理想仿真条件下未被纳入考虑。

为进一步探究定位误差数据特性,对加入误差的定位方程进行了蒙特卡洛模拟实验及仿真结果分析。根据大数定律收敛性验证和实际工程效率平衡,分别针对实测数据结合蒙特卡洛法进行100次、500次以及1 000次循环后得到目标在大地直角坐标系的定位结果的空间位置分布和大地直角坐标系定位结果的误差分布,如图

5~图 7 所示。

纵向比较图 5、图 6 和图 7 可知,随着蒙特卡洛模拟次数的增加,目标定位点空间三向定位误差的空间分布呈现出向中心聚集的趋势,且分布形态逐渐趋近于正态分布。这表明增加测量次数能有效减小随机误差的影响,使定位结果的统计均值逐渐趋近于测量真值。以 1 000 次循环定位为例,根据图 7(a)的仿真结果可以看到无人机光电成像目标定位数据呈现出明显的中心聚集

效应,符合正态分布特征,中心区域数据占比最高,概率密度向两侧递减。依据数理统计原理,概率密度较大的区域更有可能包含目标的真实位置。将 1 000 次定位结果累加求和后进行平均计算结果值作为模拟定位结果,将不存在随机误差的定位结果作为真实定位结果,均值分析显示,大地直角坐标 X 约为 $-2\,765\,089.92\text{ m}$, Y 约为 $4\,785\,159.34\text{ m}$, Z 约为 $3\,171\,537.66\text{ m}$ 。真实大地直角坐标 X 约为 $-2\,765\,089.66\text{ m}$, Y 约为

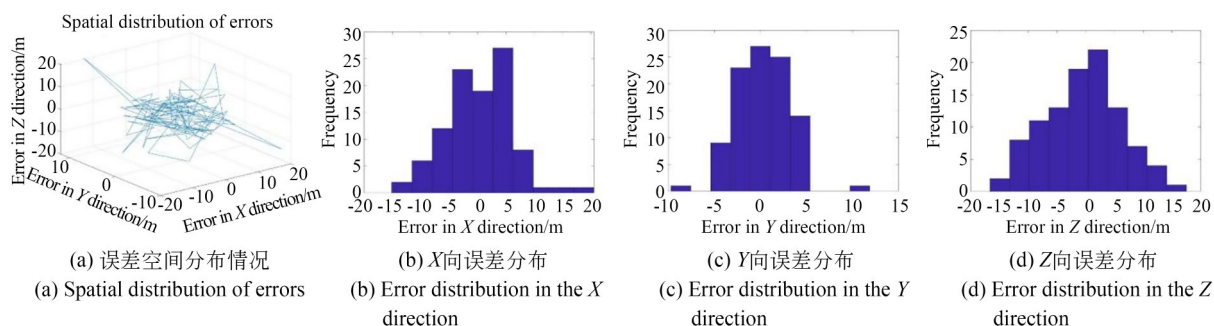


图 5 循环 100 次测量误差分布

Fig. 5 Distribution of measurement errors after 100 cycles

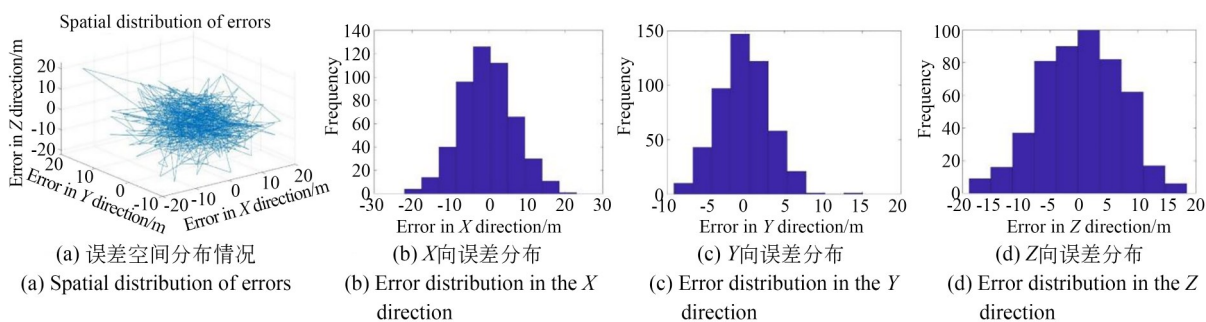


图 6 循环 500 次测量误差分布

Fig. 6 Distribution of measurement errors after 500 cycles

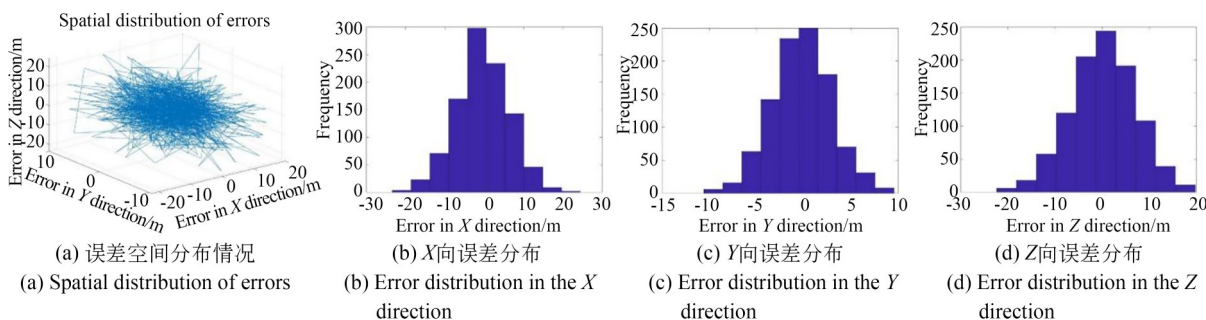


图 7 循环 1 000 次测量误差分布

Fig. 7 Distribution of measurement errors after 1 000 cycles

4 785 159.26 m, Z 约为 3 171 537.68 m。因此,仿真结果与未考虑误差时的理想定位结果高度一致。

从图 7(b)、图 7(c)和图 7(d)可以看出,目标定位误差在大地直角坐标系的 3 个方向上均近似服从均值 μ 为 0 的正态分布。比较真实定位结果与模拟定位结果,由于 1 000 次模拟的随机误差累加平均效应,模拟定位结果与真实定位结果极为接近。经统计分析得出,目标模拟定位的 X 向误差约为 -0.26 m, Y 向误差约为 0.08 m, Z 向误差约为 -0.02 m,空间位置误差约为 0.28 m。实验结果表明,所提出的无人机目标定位模型具有较高的精度,能够满足多数定位任务的需求。

4.2 误差源耦合效应及敏感性验证

为验证前文理论分析结果的正确性,采用表 1 数据分别采取控制变量法探究各误差源对总体定位误差的敏感性。由于无人机定位误差由 GPS 定位精度决定非直接测量量,因此这里不予考虑。针对测距误差,保证其他测量值不变以 3 m 步长增加测距误差,得到测距误差与定位误差之间的关系,然后以一固定值依次单独改变其中一项测量参量,再对测距值进行步长为 3 m 的误差增量,探究测距误差与各参量之间的耦合关系,如图 8 所示。通过图 8 及其局部放大图显示,当改变其他参数数值时,定位误差不随其他测量参数改变而改变,各曲线仍保持严格的一致性,只随测距误差本身的增加而线性增加,由此证明了测距误差对定位误差的影响

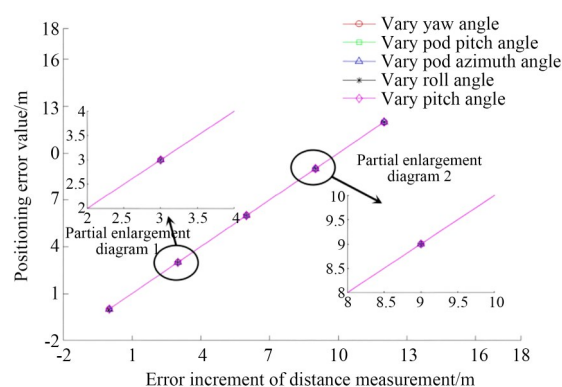


图 8 测距误差导致定位误差与各测角值耦合效应

Fig. 8 Coupling effect of positioning error and each measured angle value caused by ranging error

与测量状态无关推论。

为验证无人机偏航角与其他测量角度在进行定位测量时的耦合关系,同样保证其他测角角度不变,以 0.1° 的增量仅改变无人机偏航角,得到定位误差值,再以 0.1° 的增量改变无人机偏航角的同时依次单独定量改变吊舱俯仰角测量值、吊舱方位角测量值、无人机横滚角测量值以及无人机俯仰角测量值,分别记录目标定位误差情况。最终得到偏航角与定位误差之间的关系,如图 9 所示。

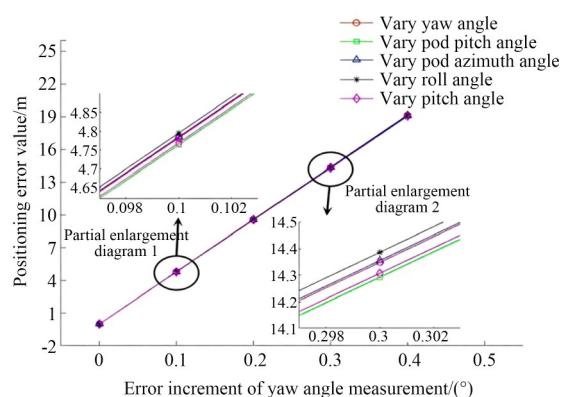


图 9 偏航角误差导致定位误差与各测角值耦合效应

Fig. 9 Coupling effect of positioning error and each measured angle value caused by yaw angle error

通过图 9 可见,定位误差随偏航角误差的增大而增大,这符合误差增长原理。通过局部放大图发现,随着其他测角值的固定量改变,定位测量误差也会跟随其他角度值的改变而改变,误差增长曲线并非与单独改变偏航角误差时完全重合。定义耦合效应所引起的定位误差偏差量与增量角度的比值为该角度的增量角度耦合系数,那么以吊舱俯仰角为例,对于 β 改变量为 0.5° 时,吊舱俯仰角的偏航角耦合系数最大处达到 0.744,验证了姿态角误差的状态依赖性。因此,偏航角的测量误差与光电吊舱俯仰角、光电吊舱方位角以及无人机三轴姿态角存在耦合关系受其他测角值的影响,说明偏航角误差对于目标定位测量的影响与测量状态有关。类似的,也可以通过同样的方法得出平台滚转角误差、平台俯仰角误差、吊舱方向角误差、吊舱俯仰角误差引入的目标定位误差与测量状态之间的关系结果,明确各测角误差与测量状态之间

的关系。

此外,为验证当同等测量条件下定位误差随平台与目标距离的增大而增大,同样采取表 1 中测量数据进行验证实验。首先给各参量加上一定量系统误差,这样定位系统具备了一定量的初始误差,目标与平台初始距离设为 3 000 m,然后以 500 m 步长依次增加定位测量距离,最后得到距离增量与误差关系的曲线,如图 10 所示。由图 10 可知,在保证其他参量与误差状态不变的测量条件下,目标定位误差随着目标与平台距离的增长呈现上升趋势,说明目标总体定位误差在同等测量条件下会随着测量距离的增大而增大。

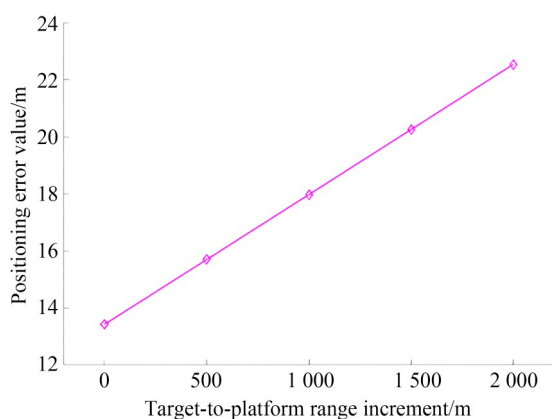


图 10 目标与平台的距离增量与定位误差的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve of distance increment between target and platform with positioning error

参考文献:

- [1] 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 ZH CH, LEI ZH 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)
- [2] LV G M, LI Q, CHEN Y T, *et al.* An improved scheme and numerical simulation of segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance[J]. *Optical Review*, 2019, 26(6): 664-675.
- [3] 熊玉朋,陈适宇,黄斌,等. 基于自由曲面光学元

5 结 论

本文针对无人机光电成像目标定位精度问题,构建光电成像目标定位模型,系统梳理并有效溯源了定位转换过程中的主要误差源,运用误差合成理论与蒙特卡洛法深入分析定位误差。结果表明,定位误差和测距误差影响取决于误差数值本身,角度误差和姿态误差影响与测量状态密切相关,其中吊舱俯仰角改变 0.5° 时偏航角耦合系数最大处达到了 0.744。蒙特卡洛法显示,随着测量次数的增加,定位误差分布趋近正态分布,均值接近测量真值。定位误差在大地直角坐标系 3 个方向上近似服从均值为 0 的正态分布,空间位置误差降低为 0.28 m,证明了模型的正确性。本文通过误差溯源和耦合效应分析,揭示了各误差源对于定位精度的敏感性及其耦合关系,展示了测角、测距误差影响的状态依赖性,为误差抑制策略制定提供理论依据,对提升目标定位测量精度,增强无人机光电成像定位效能具有重要意义。

作者贡献声明:

王欢庆:测量方法提出,实验设计及论文构思和撰写;

韩裕生:问题提出,技术指导;

薛模根:研究资源提供,论文写作指导;

王 峰:提供项目支持,理论指导;

黄勤超:调查研究,理论指导及实验验证。

件的大视场光学成像系统[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1261-1272.

XIONG Y P, CHEN SH Y, HUANG CH, *et al.* Large field optical imaging system based on freeform surface optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1261-1272. (in Chinese)

- [4] 宋力奇,李洪文,王鸣浩,等. 场景切换感知的地基成像系统电子稳像技术[J]. 光学精密工程, 2024, 32(22): 3383-3394.

SONG L D, LI H W, WANG M H, *et al.* EIS for ground-based imaging systems supporting scene switching perception [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(22): 3383-3394. (in Chinese)

- [5] DING D, SHI F, LI Y. Low-illumination color im-

- aging: progress and challenges[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 184: 112553.
- [6] 戴栋晨, 郑丽娜, 张宇, 等. 基于数字高程模型的航空相机图像清晰度检测方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(6): 0610001.
- DAI D CH, ZHENG L N, ZHANG Y, *et al.* Sharpness detection method for aerial camera images based on digital elevation model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0610001. (in Chinese)
- [7] QIAO CH, DING Y L, XU Y S, *et al.* Ground target geolocation based on digital elevation model for airborne wide-area reconnaissance system [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12 (1): 1.
- [8] 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.
- [9] SHI K, YANG H T, PENG J W, *et al.* High-speed target location based on photoelectric imaging and laser ranging with fast steering mirror deflection [J]. *Photonics*, 2025, 12(2): 108.
- [10] ZHANG Z Y, LI N, YANG G M, *et al.* The development of distributed cooperative localization algorithms for Multi-UAV systems in the past decade [J]. *Measurement*, 2025, 256: 118040.
- [11] TANG X S, YANG L, WANG D, *et al.* A collaborative navigation algorithm for UAV Ad Hoc network based on improved sequence quadratic programming and unscented Kalman filtering in GNSS denied area [J]. *Measurement*, 2025, 242: 115977.
- [12] ZHENG J Y, DING F. A filtering-based recursive extended least squares algorithm and its convergence for finite impulse response moving average systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2024, 34(9): 6063-6082.
- [13] 闫啸家, 朱惠民, 孙世岩, 等. 基于改进变异萤火虫优化粒子滤波的无人机目标定位[J]. *兵工学报*, 2025, 46(5): 76-88.
- YAN X J, ZHU H M, SUN SH Y, *et al.* An improved mutant firefly algorithm optimized particle filter algorithm for UAV target positioning [J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46 (5) : 76-88. (in Chinese)
- [14] 李志健, 李聪, 刘浩, 等. 空天目标光电跟踪系统研究综述[J]. *中国激光*, 2025, 52(6): 0600002.
- LI ZH J, LI C, LIU H, *et al.* Review of optoelectronic tracking systems for aerospace targets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52 (6) : 0600002. (in Chinese)
- [15] 张志豪, 杜丽霞, 侯越, 等. 跨层注意力交互下的多特征交叉无人机图像检测[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(24): 3616-3631.
- ZHANG ZH H, DU L X, HOU Y, *et al.* Multi-feature cross UAV image detection algorithm under cross-layer attentional interaction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(24): 3616-3631. (in Chinese)
- [16] 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. *光学精密工程*, 2019, 27 (1): 8-16.
- ZHANG H, QIAO CH, KUANG H P. Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 8-16. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] XING X Y, ZHONG Z W, LI X T, *et al.* Node selection and path optimization for passive target localization via UAVs [J]. *Sensors*, 2025, 25 (3): 780.
- [19] 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328003.
- DU Y L, DING Y L, XU Y S, *et al.* Geo-location algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (3) : 0328003. (in Chinese)
- [20] 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.
- 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. (in Chinese)

- [21] 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.
- [22] 金兆飞, 雷仲魁, 许莺. 基于无人机光电成像平台的目標定位精度分析[J]. 光学仪器, 2014, 36 (4): 346-351.
- JIN ZH F, LEI ZH K, XU Y. Target orientation accuracy analysis based on UAV photoelectric imaging platform[J]. *Optical Instruments*, 2014, 36 (4): 346-351. (in Chinese)

作者简介:

王欢庆(1995—),男,安徽亳州人,博士,讲师,2023年于合肥工业大学获得博士学位,现为陆军兵种大学兵器科学与技术博士后科研流动站博士后,主要从事视觉测量及目标定位方面的研究。E-mail:1435434521@qq.com

通讯作者:

黄勤超(1976—),男,安徽全椒人,博士,副教授,2006年于中国科学院等离子体物理研究所获得博士学位,主要从事光电信息处理技术方面的研究。E-mail:1802019569@qq.com