

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2513820

无人机载激光测距仪校准和引导定位方法

郭润泽, 孙晓永, 孙 备, 党昭洋, 苏绍璟
(国防科技大学智能科学学院 长沙 410072)

摘要:激光测距因其优异的方向性、长距离传输能力及抗干扰性能,已成为高精度空间感知领域的主流技术手段,特别是近年来智慧城市建设与军事侦察需求的增长促使无人机载高精度测距和定位技术成为研究热点。针对机载激光测距仪误差来源广泛和定位误差大的问题,提出了多维度联合校准和引导定位方法。首先,系统地研究和分析了机载测距仪校准和定位的误差来源、产生机制和时空相关性,为算法研究提供了理论基础;其次,设计了一种联合机械对齐、吊舱空间校准和传感器时间同步的机载激光测距仪校准方法,减少了无人机在低空飞行场景下的测距误差;随后,提出了一种基于双机协同交会的无人机载激光测距仪引导定位算法,通过主动探测—激光引导—几何解算的方式,实现了高精度的目标定位;最后,在变速运动和转弯运动场景下进行了校准和定位方法的实验验证。实验结果表明,校准后对 10 000 m 内目标测距时,距离测量值与真实值的差值 <2 m。相较于单无人机定位方法,引导定位算法在变速运动情况下的平均距离误差为 2.22 m,且定位精度提升 80%,满足无人机探测的高精度校准和定位需求。

关键词:机载激光测距仪;测距;多维度联合校准;引导定位

中图分类号: TP391.4 TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Calibration and guidance-positioning method for UAV-mounted laser rangefinders

Guo Runze, Sun Xiaoyong, Sun Bei, Dang Zhaoyang, Su Shaojing

(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: Laser ranging has become the mainstream technology in the field of high-precision spatial perception due to its excellent directionality, long-distance transmission capability, and anti-interference performance. Especially in recent years, the growth of smart city construction and military reconnaissance demands have driven the technology of high-precision ranging and positioning for UAV-mounted systems to become a research hotspot. Addressing the issues of wide-ranging error sources and large positioning errors in airborne laser rangefinders, this paper proposes a multi-dimensional joint calibration and guidance-positioning method. First, the error sources, generation mechanisms, and spatiotemporal correlations of airborne rangefinder calibration and positioning are systematically studied and analyzed, providing a theoretical basis for algorithm research. Second, a calibration method for airborne laser rangefinders is designed, which integrates mechanical alignment, pod spatial calibration, and sensor time synchronization, reducing the ranging error of unmanned aerial vehicles in low altitude flight scenarios. Subsequently, a guidance-positioning method is proposed, which achieves high-precision target positioning through active detection, laser guidance, and geometric calculation. Finally, the calibration and positioning methods are experimentally validated in scenarios of variable speed and turning motion scenarios. The experimental results show that when measuring targets within a 10 000 m range, the proposed method yields a distance measurement error of less than 2 m. Compared with the single drone positioning method, the average distance error of the guided positioning algorithm in variable speed motion is 2.22 m, and the positioning accuracy is improved by 80%, meeting the high-precision calibration and positioning requirements of drone detection.

Keywords: UAV-mounted laser rangefinders; ranging; multi-dimensional joint calibration; guidance-positioning

0 引言

相较于其他测距技术,激光测距因其优异的方向性、长距离传输能力及抗干扰性能,已成为高精度空间感知领域的主流技术手段^[1-3]。一方面,单点激光测距系统的低发散角特性(通常 $<0.1\text{ mrad}$)使得发射光束的能量密度在远距离传播中仍保持高度集中,进而实现高灵敏度与分辨率的探测,其误差范围仅为传统光学测距系统的 $1/100\sim 1/5$,显著优于基于多普勒效应或相位测量的替代方案^[4]。另一方面,单点激光测距系统的紧凑型设计使其便于集成集成至无人机的光电吊舱中,形成多模态感知平台^[5]。该系统不仅支持高分辨率光学成像,还可通过飞行路径规划算法实现高精度的动态目标测距^[6],在灾害应急测绘、数字地形建模及火力引导定位等领域得到广泛应用。

无人机载激光测距仪的测量精度直接决定着无人机对目标距离测量的准确性,在目标位置空间解算时,距离误差会直接传递到坐标计算中,导致目标的位置偏差。特别是近年来智慧城市建设与军事侦察需求的增长促使无人机载激光测距仪高精度校准技术成为研究热点。机载激光测距仪校准一般通过误差校正和时间同步方法实现,传统误差校正方法主要依赖经验公式^[7],旨在静态条件下实现误差最小化。针对无人机飞行中高频振动和位姿变化引入的测距误差和反射光频率的偏移,Wisth等^[8]提出了一种集成视觉、激光和惯性信息的模型,通过同步异构将模型部署在机器人、无人机等平台上;Nguyen等^[9]引入异构传感器的相对平移和旋转约束,通过多源信息的融合有效解决了漂移问题。作为核心技术瓶颈,时间同步的研究重点在于硬件延迟的量化与补偿。邓雪峰等^[10]设计了一种基于光电延时模拟法的时序补偿系统,通过引入参考光路与信号处理算法,精确抵消了光路传输延迟。余浩等^[11]从时钟周期稳定性角度出发,通过建立计时芯片温度漂移与输出周期的非线性模型,显著提升了时间同步精度。Wu等^[12]通过传感器的帧变换,以及扫描帧和子图的最佳对齐,实现不同传感器时间的同步和数据的融合。尽管如此,现有校准策略未能全面涵盖机载系统的多源误差耦合机制,研究表明,非线性误差项可达总误差的30%以上,而现有模型大多基于理想假设条件,其局限性日益凸显,对环境扰动的鲁棒性不足,导致误差在时序传递过程中持续增长,严重制约了无人机平台的泛化应用能力。

现有无人机对地目标定位技术主要依赖于机载探测系统与多源传感器,如惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)、视觉传感器的数据融合实现位置解算。孙聪等^[13]提出基于投影几何理论的仿射近似模型,通过引入多视图几何约束与低秩矩阵分解,显著提

升了视觉信息的利用效率。针对动态环境下的定位需求,鲁亚飞等^[14]提出了一种基于卡尔曼滤波的多帧图像配准算法,通过建立状态转移方程与观测模型间的时序关联性减小对动态目标的定位误差。在此基础上,Zhang等^[15]针对远程无人机目标定位问题,提出了一种加权滤波方法,通过处理重投影误差来获得优化的目标地理位置。尽管上述方法通过多传感器联合解算实现了定位性能的提升,但受限于无人机自身位姿和观测距离对定位误差的影响,单机定位精度难以满足实时性与可靠性需求。因此,研究机载环境下激光测距仪校准与定位技术,已成为仪器科学和遥感科学领域的关键突破方向。

基于此,本研究聚焦于无人机载激光测距仪校准与定位技术,核心贡献可归纳为:首先,系统地研究和分析了无人机载场景下校准定位误差的来源、产生机制和时空相关性,为后续校准方法的设计提供了理论基础;其次,设计了一种联合机械基准对齐、光电吊舱空间校准和异构传感器时间同步的机载激光测距仪校准方法,减少机载系统在低空飞行与机动场景引起的误差;随后,提出了一种基于双机协同交会的无人机载激光测距仪引导定位算法,通过主动探测-激光引导-几何解算的方式,实现了高精度的目标定位;最后,基于旋翼无人机在不同距离和不同场景(变速运动和转弯运动)下进行校准和定位方法的实验验证。实验结果表明:经过校准,距离在 $10\,000\text{ m}$ 内时测量值与真实值的差值 $<2\text{ m}$ 。相较于单无人机定位方法,引导定位算法在变速运动情况下的平均距离误差为 2.22 m ,且定位精度提升80%,初步验证了机载场景下激光测距仪校准和引导定位的可行性。

1 误差分析

如图1所示,无人机载激光测距仪的校准和定位误差来源复杂,涉及硬件、时序、环境等多个维度的相互作用^[16]。基于此,从硬件固有误差、时序对准误差、动态环境干扰等3个核心维度,明确低空飞行环境下机载激光测距仪校准和定位的误差来源及其时间-时间相关性,为后续校准方法的设计提供理论和量化依据。

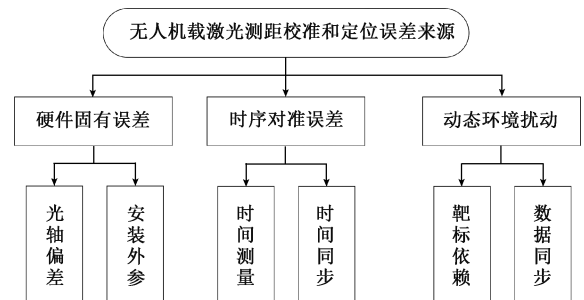


图1 误差来源分析

Fig. 1 Analysis of error source

1.1 硬件固有误差

机载激光测距仪的硬件固有误差由光轴对准误差、安装外参误差及时序测量噪声构成。光轴对准误差被定义为测距仪发射光轴与接收光轴未严格平行或重合导致的系统性偏差,这种偏差源于仪器制作时的精密加工不足或光学组件的安装角度偏离^[17],并表现为光斑的横向位置偏差,其定义为:

$$\Delta L_{gz} = L \cdot \theta \quad (1)$$

其中, L 为目标距离, θ 为光轴夹角。通过计算可知,当 $\theta = 1^\circ$ 时, 1 000 m 处目标的距离误差可达 17.5 m, 该误差幅度显著超过一般场景下目标的半径范围, 降低了系统最大测程, 使得目标难以定位。同理, 安装外参误差源于测距仪与机体间的空间平移及姿态偏差角, 属于系统性误差范畴, 直接影响着地理坐标系中激光测距点的定位精度。实验表明, 1° 的姿态偏差角在 1 000 m 距离下亦会导致 17.5 m 的位置偏移, 其误差传播特性与光轴对准误差呈现高度相似性。

1.2 时序对准误差

时序对准误差由时间测量噪声和时间同步误差组成。时间测量噪声作为激光脉冲往返测量过程中产生的随机性误差源, 主要通过时间抖动及产生的分辨率误差影响测量精度, 导致激光飞行时间估算偏离真实值^[18], 通常情况下 1 ns 的时间分辨率误差对应于 15 cm 的距离测量偏差。此类误差与电子器件固有噪声及时钟信号相位噪声密切相关, 时间测量噪声的误差传播规律可通过式(2)描述, 即:

$$\Delta L_t = c \cdot \Delta t \quad (2)$$

其中, c 为光速, Δt 为时间测量误差。这一线性关系表明, 微小的时序扰动会在远距离测量场景中被显著放大, 从而严重制约系统的信噪比与有效测程。时间同步误差作为机载系统异构传感器校准过程中的关键误差源, 主要由系统内部时钟、触发信号或外部协同设备间的时序基准不一致及同步机制失效引起, 导致激光发射时刻、回波接收时序及数据处理阶段的偏差。例如, 无人机飞行过程中的时间基准不统一会导致时钟源稳定性衰减(如 ± 10 ppm 频率偏移)并触发信号传输延迟(如 10 ns 级时序不确定性), 导致时间同步误差呈非线性增长。实验结果表明, 当激光发射触发信号与时间计数器启动存在 10 ns 同步偏差时, 测量误差将直接增加 1.5 m。

1.3 动态环境扰动

动态环境扰动是指无人机在测量过程中, 由于外部条件变化(如大气折射率扰动、机械振动等)对激光传播路径、激光信号质量产生干扰, 进而导致测距数据偏离真实值^[19], 这类扰动通常具有时变性、多物理耦合性和不可预测性, 是影响机载测距和定位精度的核心因素之一。飞行过程中, 大气温度、压力、温湿度实时变化导致空气

折射率 n 非均匀分布, 由此产生的大气折射效应会引发激光传播路径的弯曲, 其计算过程如式(3)所示。

$$\Delta L_{dq} = \int_0^D (n(s) - 1) ds \quad (3)$$

其中, D 为实际测量距离, ΔL_{dq} 为测量偏差, $n(s)$ 为空气折射率的数学表达式。例如, 标准大气条件下 $n \approx 1.000\ 293$, 1 000 m 路径的折射误差约 2.3 m。同理, 飞行过程中测距仪的机械振动也会导致光学元件、电子组件或机械结构的动态形变或位移, 进而引起激光发射/接收路径偏差。50~200 Hz 的振动频率可使得光轴偏移 0.5 rad, 1 000 m 距离处目标的测量误差约为 0.5 m。综上, 相同测试条件下, 机载激光测距仪校准与定位误差的主导源按降序排列为硬件固有误差、时间对准误差及动态环境扰动。

2 机载激光测距仪多维度联合校准方法

机载激光测距仪的校准技术需克服硬件固有误差、环境扰动及多传感器协同偏差等多重挑战。传统单一维度校准方法难以满足机载场景下对定位精度与实时性的双重要求。因此, 提出一种多维度联合校准框架, 通过机械基准对齐、光电吊舱空间校准、异构传感器时间同步 3 个子模块的联合优化, 构建覆盖硬件误差、空间几何偏差与时序扰动的闭环体系。

2.1 机械基准对齐的激光光轴粗校准

光轴粗校准作为激光测距系统误差补偿的关键环节, 旨在消除机械安装偏差与光学系统误差对测量精度的系统性影响。光轴的粗校准主要针对两类核心误差: 硬件机械偏差(包括俯仰角、偏航角及平移偏移)与光学系统误差(如透镜畸变、分光镜角度偏差)。如图 2 所示。

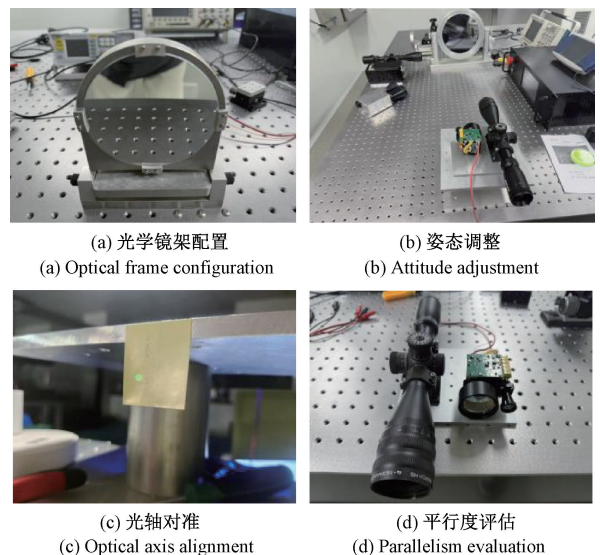


图2 光轴校准步骤

Fig. 2 Coarse calibration steps for optical axis

粗校准流程的步骤为:

1) 光学镜架的标准化配置。准直仪参考光束的发射装置与待校准激光测距仪的光学组件被集成至刚性支撑框架中,建立稳定的光路基准环境。

2) 多自由度姿态调整机制。测距仪通过六自由度调整支架实现空间姿态固定,其刚体位姿的可调范围覆盖 $\pm 5^\circ$ 旋转自由度与 ± 3 mm 平移容限。

3) 静态光轴对准优化。参考光束与目标光束的共线度通过精密对准平台完成,静态条件下两光束的波前偏差量被控制在 $5 \mu\text{rad}$ 以内。该过程采用闭环反馈机制,通过微调旋钮实现位移修正。

4) 光路平行度量化评估。激光干涉仪作为精密测量工具,用于检测光路间平行度偏差。基于干涉条纹相位差的解析结果,系统通过平移自由度补偿模块消除毫米级残余误差,最终达到光轴平行度误差 $< 10 \mu\text{rad}$ 的校准目标。

需注意,光轴粗校准需要周期性维护,每6个月复校1次,极端环境(如沙漠、极地)可缩短至3个月。

2.2 联合解算的光电吊舱空间校准

光电吊舱空间校准的目标是通过坐标转换建立激光测距值与视觉图像像素中心的空间映射关系。光电吊舱的空间校准需要测距仪与视觉传感器的位移量 (ρ_x, ρ_y, ρ_z) 和旋转角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 共6个参数。基于旋转参数的维度约简特性,仅需5个参数 $(\theta_x, \theta_y, \rho_x, \rho_y, \rho_z)$ 即可实现吊舱空间姿态的完全表征。

$$\cos \theta_z = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} \quad (4)$$

设 $q_{xyz} = (q_x, q_y, q_z)$ 为激光光斑在相机坐标系下的坐标, $q_w = (q_u, q_v, 1)$ 为其在像素坐标系下的投影, L 为激光测距值,则测距值和光斑在相机坐标系下坐标的映射关系可表示为:

$$\begin{cases} q_x = L \cos \theta_x + \rho_x \\ q_y = L \cos \theta_y + \rho_y \\ q_z = L \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} + \rho_z \end{cases} \quad (5)$$

由式(5),可实现基于非线性最小二乘法的优化框架,通过3组目标激光测距值与相机坐标的联合观测即可实现空间校准。由于相机成像为针孔成像原理,则激光光斑相机坐标和像素坐标的关系可表示为:

$$q_w = \lambda \mathbf{K} \cdot q_{xyz} \quad (6)$$

式中: \mathbf{K} 代表相机的内参矩阵,是和相机焦距相关的已知值; λ 为比例因子。由此得到测距值和像素坐标的关系为:

$$\begin{cases} q_u = \frac{f_x(L \cos \theta_x + \rho_x)}{L \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y}} + x_0 \\ q_v = \frac{f_y(L \cos \theta_y + \rho_y)}{L \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y}} + y_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: (f_x, f_y) 是相机的焦距; (x_0, y_0) 是目标投影的中心点。由此通过激光测距值即可计算光斑位于可见光传感器上的位置。为便于引导定位和跟踪,将激光光斑的位置置于图像的中心点,其视觉效果如图3所示,矩形框所标注区域为激光光斑所在位置。



图3 空间校准后的视觉效果

Fig. 3 Visual effects after spatial calibration

2.3 异构传感器的时间同步校准

异构传感器的时间同步校准作为机载系统数据融合的核心环节,旨在消除硬件延迟、信号处理滞后及时钟漂移引发的时序偏差,确保激光测距仪数据与视觉传感器的时间戳在毫秒级精度内实现同步对齐。首先,需实现基于激光测距仪的时间基准统一,如图4所示。

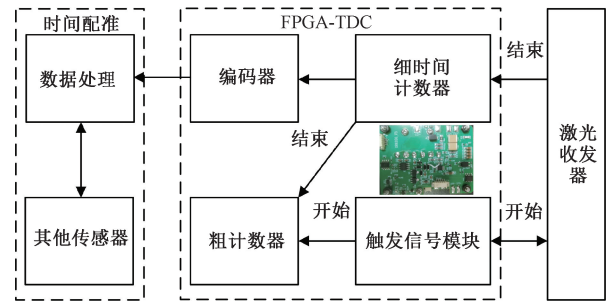


图4 时间同步校准方案

Fig. 4 Scheme of time synchronization calibration

具体流程为:激光发射器触发信号的同时,频率同步信号与时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)时钟基准被激活,粗计数器在此时开始计数周期;当激光脉冲经目标反射后返回并被光电探测器接收,产生的停止信号触发细计数器的启动,并在其后续上升沿完成计数锁存,同时粗计数器同步执行数据捕获操作;处理端接收到粗/细计数器的联合输出后,通过时序校准算法计算飞行时间数据,并与视觉传感器的时间戳进行配准,最终实现异构传感器数据的时间一致性。

其次,由于激光测距仪和视觉传感器属于异构传感器,采样周期不同,所以需要进行时间配准。基于最小二乘法和内插外推的时间配准算法是典型的时间配准算法。然而,当传感器的采样时间关系不是整数倍时,使用最小二乘时间配准法精确度较低。基于此,采用内插外

推法完成时间配准。选取时间段长度为测量数据,根据传感器测量周期大小按增量排序,以低频传感器的测量时间作为参考序列,利用内插、外推的方法实现高频传感器的测量数据推算到低频传感器测量时刻,进而实现各个传感器的时间同步性。

在实验中设置测距仪的工作频率为 1~10 Hz,可见光传感器的采集帧率为 30 Hz。完成数据接收后,使用内插外推法构建逼近函数,进而得到目标在近似同时刻下各个传感器的测量值。测距仪和可见光传感器同一时间段内对于某目标的测量数据分布如图 5 所示。

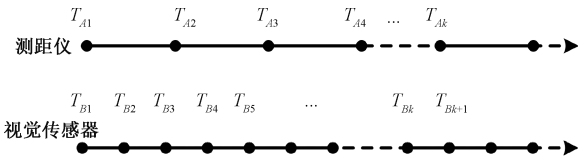


图 5 不同传感器的测量时间分布

Fig. 5 Measurement time distribution of different sensors

假设测距仪的第 k 个测量值为 x_k , 对应时刻为 T_{Ak} , 可见光传感器的第 k 个测量值为 y_k , 对应时刻为 T_{Bk} , 则 $T_{B(k+1)}$ 对应可见光传感器的第 $k+1$ 个测量值为 y_{k+1} , 找到具有 $T_{Bk} < T_{Ak} < T_{B(k+1)}$ 关系的测量值, 对可见光传感器的测量值 y_k 和 y_{k+1} 中间完成插值, 得到可见光传感

器在 T_{Ak} 时刻的插值, 如式(8) 所示。

$$y = y_k + \frac{T_{Ak} - T_{Bk}}{T_{B(k+1)} - T_{Bk}}(y_{k+1} - y_k) \tag{8}$$

值得说明的是, 此处可见光传感器的测量值为目标在可见光图像中的位置坐标信息, 而非图像。通过对目标在图像中的位置坐标信息进行差值, 得到与激光测量数据同时刻下目标相对可见光传感器的角度信息, 目的是为了与激光测距数据进行目标位置解算。

3 机载激光测距仪引导定位方法

目标定位实际上是目标空间位置的解算, 通常由图像坐标转换到世界坐标, 而单无人机对目标定位主要通过融合无人机自身姿态位置信息、激光测距值、吊舱方位角等信息, 进而对目标位置进行估算^[20]。单无人地对目标定位技术虽然在灵活性和成本方面具有优势, 但受限于传感器能力、计算资源和环境干扰等因素, 在高精度需求场景中, 仍面临显著挑战^[21]。基于此, 提出一种基于双机协同交会的无人机载激光测距仪引导定位方法对目标进行空间位置解算, 如图 6 所示, 通过主动探测—激光引导—几何解算的方式, 实现了高精度、实时的目标定位。

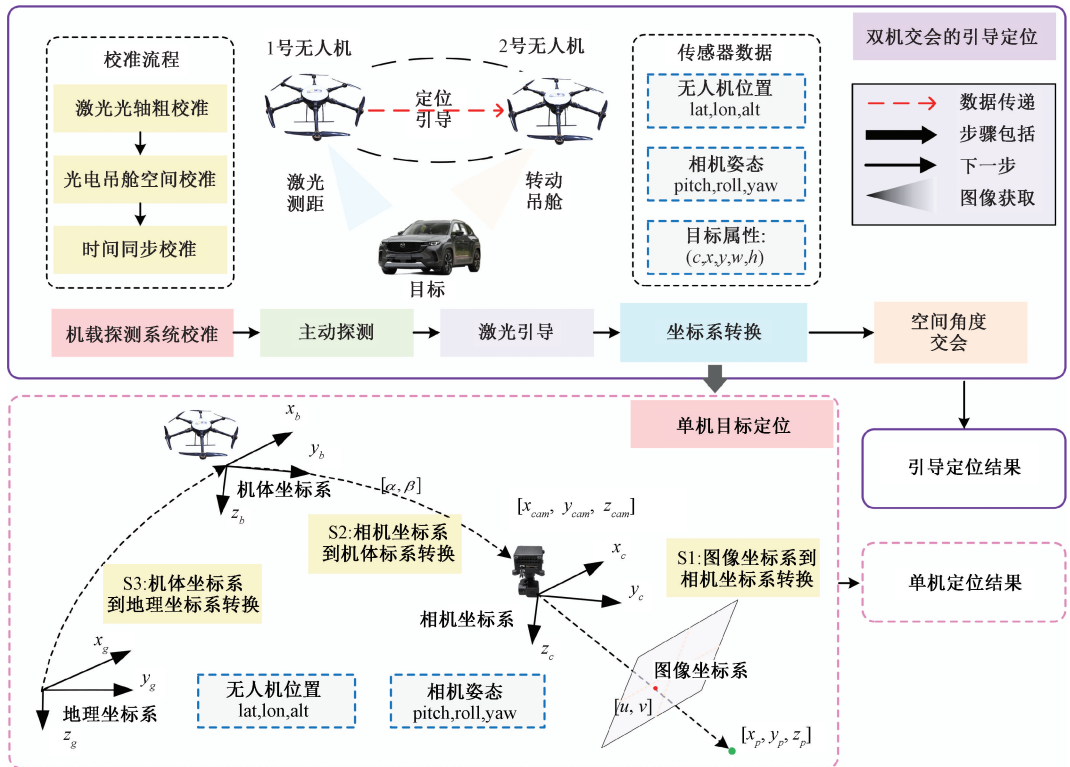


图 6 引导定位流程

Fig. 6 Process of guiding positioning

首先,由1号无人机激活光电吊舱、IMU及无人机飞控系统,完成空间和时间的校准,并对目标区域进行大视场搜索和探测;其次,当发现感兴趣目标后1号无人机主动发射激光束,通过光电探测器捕捉反射光信号得到激光测距值,结合测距值、自身姿态位置、吊舱方位角、目标像素位置等信息,估算出目标大致方位,并将目标方位估算值发送至2号无人机,引导2号无人机转动光电吊舱探测目标;最后,读取两架无人机及其光电吊舱的各类信息,通过齐次坐标变换的方法,将两无人机输出的信息融合到同一坐标系下,利用交会算法求解目标在实际三维空间的坐标信息,实现目标的精准定位。具体过程为:

当2号无人机接收到目标大概方位后,转动光电吊舱,使其出现2号无人机的视场中心。此时,通过目标识别算法得到目标在第*i*号无人机图像中的坐标为 (x_i, y_i) , $i=1, 2$,则目标视轴线在两架无人机相机坐标系的方向余弦如式(9)所示。

$$\mathbf{I}_{ii} = \left[\frac{x_{ui}}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}}, \frac{y_{ui}}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}}, \frac{f_i}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}}, 1 \right]^T \quad (9)$$

式中: x_{ui}, y_{ui} 为目标在第*i*号无人机像素平面的坐标值; f_i 为相机焦距。坐标转换后,得到向量在地球直角坐标系下的方向向量表示,如式(10)所示。

$$\mathbf{I}_{gi} = \begin{pmatrix} l_{gi} \\ m_{gi} \\ n_{gi} \\ 1 \end{pmatrix} = \prod_{j=0}^9 \mathbf{Q}_j \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_{ii} = \prod_{j=0}^9 \mathbf{Q}_j \begin{pmatrix} \frac{x_{ui}}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}} \\ \frac{y_{ui}}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}} \\ \frac{f_i}{\sqrt{x_{ui}^2 + y_{ui}^2 + f_i^2}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

其中, \mathbf{Q}_j 为变换矩阵,表示坐标变换过程中的旋转变换。实际解算过程中,测量误差的存在会导致齐次坐标转换后视轴线与实际视轴线产生偏差,进而引发两视轴线空间交点的不可观测性问题。尤其在远距离场景下,这种偏差会呈现显著的非线性增长特性。为解决上述问题,提出双机交会场景下的几何优化方法,确定满足到两视轴线距离之和*D*最小的最优空间点*P*作为目标位置,并通过求解该函数的极小值确定目标位置的最优解。

首先,根据式(10)计算得到1、2号无人机视轴向量在大地坐标系中的表示为 $\mathbf{I}_{gi} = [l_{gi}, m_{gi}, n_{gi}, 1]^T$,由此求得最优空间点到两轴线的距离之和,如式(11)所示。

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [(x_m - x_i^F)^2 + (y_m - y_i^F)^2 + (z_m - z_i^F)^2]} \quad (11)$$

式中: (x_i^F, y_i^F, z_i^F) 为*P*到第*i*号无人机视轴线的垂足坐标,其数学表达式如式(12)所示。

$$\begin{cases} x_i^F = x_i + l_{gi} [l_{gi}(x_m - x_i) + m_{gi}(y_m - y_i) + n_{gi}(z_m - z_i)] \\ y_i^F = y_i + m_{gi} [l_{gi}(x_m - x_i) + m_{gi}(y_m - y_i) + n_{gi}(z_m - z_i)] \\ z_i^F = z_i + n_{gi} [l_{gi}(x_m - x_i) + m_{gi}(y_m - y_i) + n_{gi}(z_m - z_i)] \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可得目标点*P*到两轴线距离之和*D*的显式数学表达式,依据最小二乘原理,令*D*分别对 x_m, y_m, z_m 求偏导可获得极值条件,当偏导值为0时,*D*有极小值,整理方程式得到式(13)~(15)。

$$\mathbf{A}\mathbf{M} = \mathbf{b} \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^2 (1 - l_{gi}^2) & -\sum_{i=1}^2 l_{gi} m_{gi} & -\sum_{i=1}^2 l_{gi} n_{gi} \\ -\sum_{i=1}^2 l_{gi} m_{gi} & \sum_{i=1}^2 (1 - m_{gi}^2) & -\sum_{i=1}^2 (m_{gi} n_{gi}) \\ -\sum_{i=1}^2 l_{gi} n_{gi} & -\sum_{i=1}^2 m_{gi} n_{gi} & \sum_{i=1}^2 (1 - n_{gi}^2) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^2 [(1 - l_{gi}^2)x_i - l_{gi} m_{gi} y_i - l_{gi} n_{gi} z_i] \\ \sum_{i=1}^2 [-l_{gi} m_{gi} x_i + (1 - m_{gi}^2)y_i - m_{gi} n_{gi} z_i] \\ \sum_{i=1}^2 [-l_{gi} n_{gi} x_i - m_{gi} n_{gi} y_i + (1 - n_{gi}^2)z_i] \end{pmatrix} \quad (15)$$

当1、2号无人机同时对准目标后, \mathbf{A} 为非奇异矩阵,此时方程有唯一解,则目标的坐标如式(16)所示。

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{pmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (16)$$

与传统的单机定位方法相比,引导定位算法精度更高,特别是在遮挡、远距离等情况下可灵活调整1、2号机所在位置,优势更加明显。当视场内只有单个目标时,可直接使用引导定位算法,当视场内有多目标时,需在算法中添加目标匹配过程,确保1、2号无人机解算同一目标。此外,由于已实现异构传感器时间戳的对齐,引导定位算法也可实现对动态目标的高精度定位。

4 实验与分析

4.1 实验设置

为验证所提出校准和定位算法的鲁棒性,选用 PIE-UX25 型旋翼无人机平台,其起降抗风能力达到 6 级,最大任务载荷为 10 kg,能够有效搭载光电吊舱以及无线自组网电台等。同时配有用于自身定位的实时动态定位 (real-time kinematic, RTK) 全球卫星导航系统,无人机自身位置测量的动态误差 < 1 m。无人机飞行控制系统融合来自机载 IMU 和数字罗盘的数据,并能够输出无人机的姿态角。无人机俯仰及横滚的姿态角测量误差 < 1°, 无人机偏航角的测量误差 < 3°。满足在动态场景下的测量定位需求。如图 7 所示为无人机平台实物图。



图 7 无人平台实物

Fig. 7 Physical image of unmanned platform

此外,如图 8 所示,分别记录无人机和目标的经纬度坐标以计算无人机到目标的真实距离值,无人机和目标的经纬度坐标分别为 (116.210 246 35, 40.096 435 74)、(116.178 247 90, 39.973 798 13)。根据短距离公式, A 点经纬度坐标 (lat1, lon1), B 点经纬度坐标 (lat2, lon2), 则两点间距离由式 (17) 计算得到,即:

$$d = R \times \arccos[\sin(\text{lat1}) \times \sin(\text{lat2}) + \cos(\text{lat1}) \times \cos(\text{lon1} - \text{lon2})] \quad (17)$$

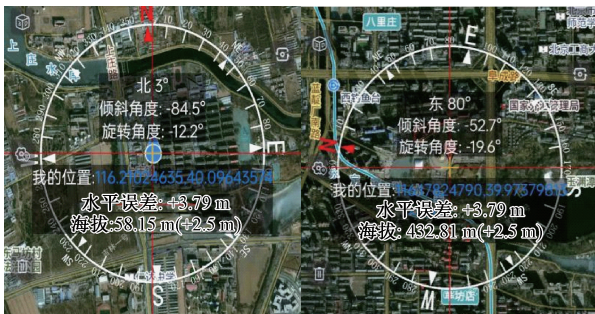


图 8 目标真实经纬度获取

Fig. 8 Obtaining the true latitude and longitude of the target

其中, R 是地球的平均半径,数值为 6 371 000 m。将经纬度坐标转换为 rad 后,经过计算即可得到本组数据下目标与测距仪间的真实距离值,为 13 922 m。

4.2 评价指标

算法分为校准和定位两部分,即:校准方面,以无人机和目标间距离的真实值和测量值的差值作为评价指标,统计两者差值的平均值和方差;定位方面,采用圆周概率误差 (circular error probability, CEP) 作为评价指标, CEP 用于描述二维平面上定位误差分布的统计指标,表示有 50% 的概率落在以真实位置为中心、半径为 CEP 值的圆内。由上述定义,设 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为估计值和真实值的差值,则数组的中位数 x_m 为 CEP 值。

4.3 校准实验

校准是确保无人机载激光测距仪测量精度的关键步骤,为验证所提方法的校准性能,选择通视条件 > 10 000 m 的场地,在 0~1 000、1 000~2 000、2 000~4 000、4 000~8 000、8 000~10 000 m 这 5 个距离区间内分别选择 1 个基准点。首先,按照机载激光测距仪校准方法,对光电吊舱和所属激光测距仪进行机械、空间、时间上的校准。其次,令无人机起飞至一定高度,按照图 6 所示方法,记录 5 个基准点位的距离真值,分别为 345、1 687、2 208、7 578 和 9 480 m。随后,设置工作频率为 2 Hz,分别对 5 个基准点位测距,每个位置测量 10 次,记录真实值,并计算平均值。最后,对比不同距离区间内测量值和真实值的差值,评估所提方法的校准能力。不同点位的距离测量值如表 1 所示。需要注意的是,实验过程需记录温湿度、能见度等天气条件,从而控制因天气变化引起的校准能力的波动。校准实验开展的温度为 0°C,湿度为 45%,能见度为 16.8 km。

表 1 距离测量值

Table 1 Distance measurement value

次数	基准点 1	基准点 2	基准点 3	基准点 4	基准点 5
1	345.20	1 687.30	2 208.50	7 578.70	9 481.50
2	345.50	1 687.50	2 208.60	7 579.20	9 481.50
3	345.40	1 687.70	2 208.80	7 578.80	9 480.80
4	345.40	1 687.60	2 208.70	7 578.80	9 481.60
5	345.80	1 687.60	2 208.70	7 578.90	9 480.20
6	345.60	1 687.50	2 208.50	7 578.70	9 480.60
7	345.30	1 687.40	2 208.50	7 578.90	9 480.30
8	345.50	1 687.50	2 208.70	7 578.30	9 481.20
9	345.20	1 687.60	2 208.60	7 578.20	9 480.60
10	345.30	1 687.30	2 208.60	7 578.90	9 481.90
平均值	345.42	1 687.50	2 208.62	7 578.74	9 481.02

由表1所示,基准点1~5的测量平均值分别为345.42、1 687.5、2 208.62、7 578.74和9 481.02 m,测量平均值和真实值的差值分别为0.42、0.5、0.62、0.74和1.02 m。由此可得,不同距离条件下,目标的校准能力略有区别,一般情况下,距离越远,目标的平均测量误差越大。此外,用测量值减去真实值,得到不同基准点下测量值与真实值的偏离程度,如图9和10所示,并计算5个基准点的方差分别为0.035、0.017、0.011、0.087、0.355。由图和统计方差可得,测量距离越远,测量值的离散程度和波动就越大,也更加分散,且与真实值的偏离程度也越大。经过算法校准,在4 000 m内,测量值与真实值的差值均<1 m,在10 000 m内,测量值与真实值的差值均<2 m。



图11 定位试验场景

Fig. 11 Positioning test scene

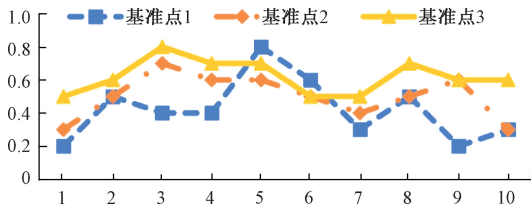


图9 真实值与测量值差值对比(点1~3)

Fig. 9 Comparison of the difference between the actual value and the measured value (points 1~3)

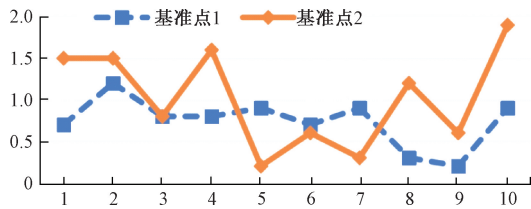


图10 真实值与测量值差值对比(点4~5)

Fig. 10 Comparison of the difference between the actual value and the measured value (points 4~5)

4.4 定位实验

为验证引导定位算法性能,建立了如图11所示的试验场景,将其中搭载北斗定位模块的车辆作为地面运动目标,将北斗模块输出的位置坐标作为地面目标的位置真值。1号无人机搭载校准好的光电吊舱对车辆进行搜寻定位,输出单机位置估计值,并引导2号无人机进行探测,2号无人机使用引导定位算法解算估计值。同时,从运动目标跟踪定位的难点出发,设置了两种测试条件,分别为目标变速运动和目标快速转弯运动,以充分验证引导定位算法在动态场景中的适用性和有效性。

在试验场景中,设置2个目标车辆在约500 m × 600 m

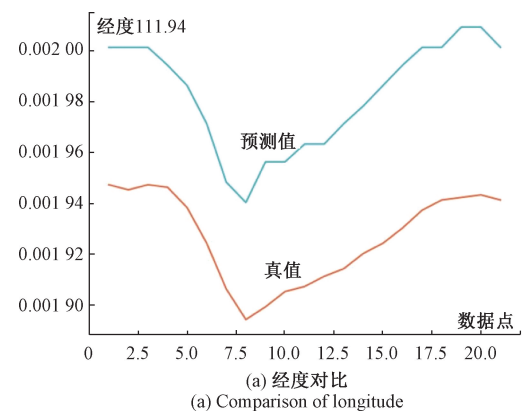
的地面范围内做变速直线与转弯运动,车辆运动速度(相对于无人机)约为10~15 m/s。在整个实验过程中,通过遥控两架无人机使得目标车辆始终保持在两架无人机的视野范围内,无人机飞行高度为200~300 m,两无人机之间保持约120°相位角。目标车辆的位置真值通过北斗定位模块获取,该北斗定位设备以2 Hz的频率对位置信息进行采样,而无人机将采集频率为30 Hz的视频数据,且无人机自身位置信息与相机姿态信息的获取频率与视频同步,即每帧图像都对应一组位置与姿态数据。

1) 目标变速运动

如图12、13所示,为目标变速运动情况下单探测单元与多探测单元的目标估计值与真实值的对比,选取20个数据点来计算定位误差,图12、13的(a)和(b)图分别为经度与纬度的真值和估值对比,这里的估值表示双机引导定位算法由获取的图像与机载位姿信息计算所得到的目标位置。

2) 目标快速转弯

如图14、15所示,为目标快速转弯情况下单探测单元与多探测单元的目标估计值与真实值的对比,选取20个数据点来计算定位误差,图14、15的(a)和(b)图分别为经度与纬度的真值和估值对比,这里的估值表示



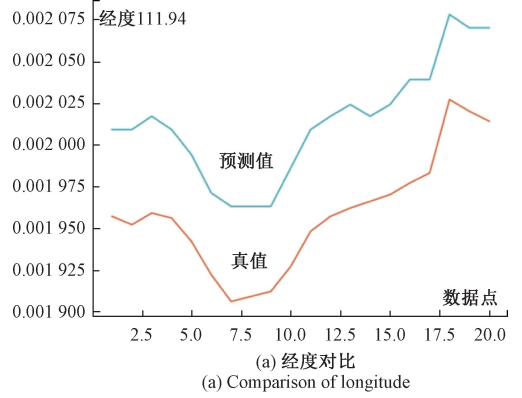
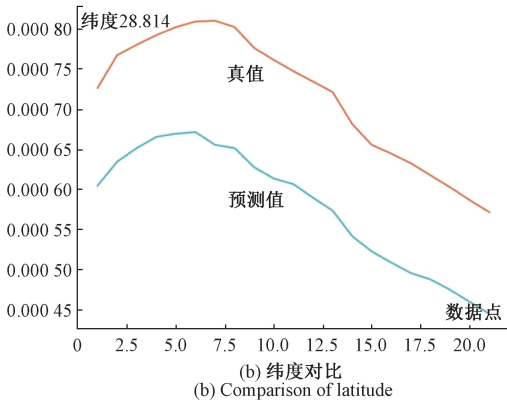


图 12 目标变速运动单机定位精度对比

Fig. 12 Comparison of variable speed motion of targets with single UAV positioning accuracy

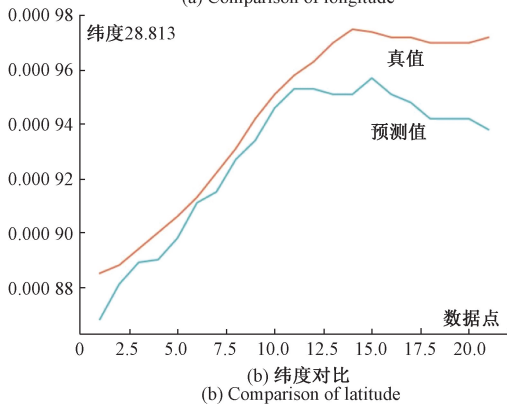
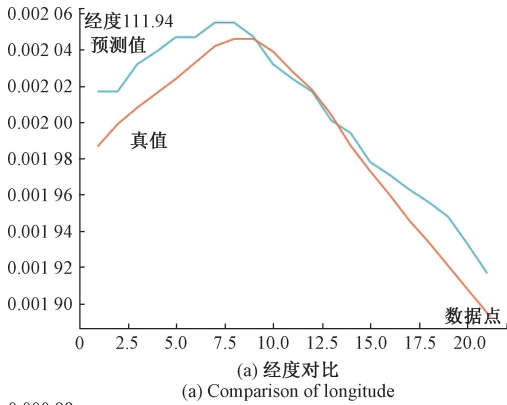


图 13 目标变速运动引导定位精度对比

Fig. 13 Comparison of variable speed motion of targets with guiding positioning accuracy

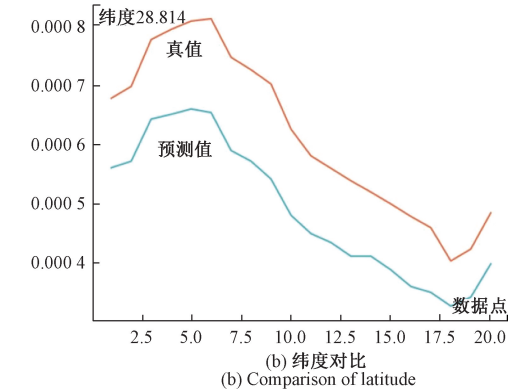


图 14 目标快速转弯单机定位精度对比
Fig. 14 Comparison of rapid turning of targets with single UAV positioning accuracy

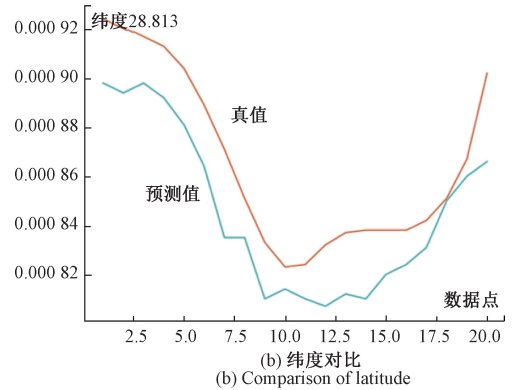
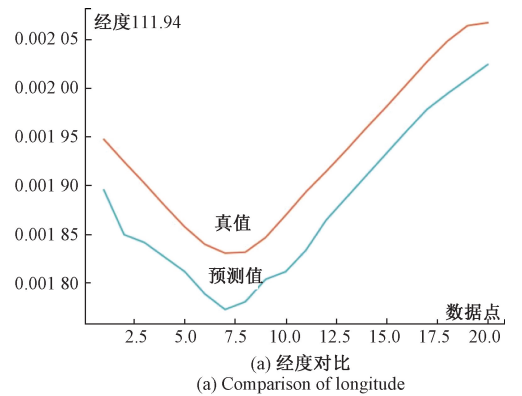


图 15 目标快速转弯引导定位精度对比

Fig. 15 Comparison of rapid turning of targets with guiding positioning accuracy

双机引导定位算法由获取的图像与机载位姿信息计算所得到的目标位置。

表 2 展示了目标变速运动情况下距离误差的统计量,其中的数值都是以 m 为单位。对于单无人机定位算法,平均距离误差为 14.81 m,75% 的距离误差在 15.40 m 以内,CEP 为 14.67 m。对于引导定位算法,

平均距离误差为 2.22 m,75% 的距离误差在 2.94 m 以内,CEP 为 2.37 m。因此,可以得到目标变速运动情况下引导定位精度为 2.37(CEP),且相对于单机定位算法提高 83.84%。

表 2 目标变速运动距离误差

Table 2 Distance error of variable speed motion of targets

算法	平均值	最小值	最大值	25%	50%	75%
单机定位	14.81	13.34	16.06	14.31	14.67	15.40
引导定位	2.22	0.64	4.05	1.41	2.37	2.94

表 3 展示了目标快速转弯情况下距离误差的统计量,其中的数值同样以 m 为单位。对于单机定位算法,平均距离误差为 13.77 m,75% 的距离误差在 15.66 m 以内,CEP 为 14.00 m。对于引导定位算法,平均距离误差为 5.71 m,75% 的距离误差在 25.83 m 以内,CEP 为 5.60 m。因此,可以得到目标快速转弯情况下引导定位精度为 5.60(CEP),且相对于单探测单元提高 60%。

表 3 目标快速转弯距离误差

Table 3 Distance error of rapid turning of targets

算法	平均值	最小值	最大值	25%	50%	75%
单机定位	13.77	9.15	16.79	12.32	14.00	15.66
引导定位	5.71	4.88	7.97	5.29	5.60	5.83

结果表明,所提的引导定位算法能够实现稳定、鲁棒的目标定位,而不受目标不规则运动的影响。与典型的单无人机定位算法^[22]和双无人机交会定位算法^[23]相比,引导定位算法定位精度高、解算过程简洁,可在无人机平台上完成实物部署和验证,在具备较好工程适用性的同时,大大提高了无人机对地目标定位的效率和精度。

5 结 论

针对机载激光测距仪误差来源广泛和定位误差大的问题,提出了多维度联合校准和双无人机引导定位方法,进行了实物实验验证。具体来说,分析了机载激光测距仪的误差来源,通过联合机械对齐、吊舱空间校准、传感器时间同步的方法实现了多维度的机载测距仪校准;此外,通过主动探测、激光引导、几何解算相结合的双无人机引导定位方法,解决了传统方法在高动态场景下定位精度不足的问题,实验结果表明,校准方法在 10 000 m 范围内的测距精度优于 2 m,对于地面目标变速运动的情况,引导定位方法的平均定位误差为 2.22 m,满足了无人机探测的高精度校准和定位需求。多维度联合校准和双无人机引导定位方法在复杂环境下具有较好的适应性

和鲁棒性,尤其是在动态目标场景下的表现,进一步证明了该方法的实用价值。未来的研究将针对提高激光测距仪最大测程以及在极端环境下的实际性能展开,为无人机高精度探测技术的发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 储昭碧,李子朋,高金辉.一种基于双目相机与单点激光测距仪的标定方法[J].仪器仪表学报,2023,44(5):232-239.
CHU ZH B, LI Z P, GAO J H. A calibration method based on binocular camera and single point laser rangefinder[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 232-239.
- [2] 李云辉,修贤超,苗中华,等.基于交叉矢量的视觉-激光测距系统结构参数标定[J].仪器仪表学报,2022,43(10):185-194.
LI Y H, XIU X CH, MIAO ZH H, et al. Structural parameter calibration of vision laser ranging system based on cross vector [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 185-194.
- [3] 杨孟骐,赵爽,白晓帆,等.服务机器人激光测距组件的环境可靠性模型及其定量评价方法研究[J].仪器仪表学报,2021,42(1):108-115.
YANG M Q, ZHAO SH, BAI X F, et al. Research on environmental reliability model and quantitative evaluation method of laser ranging components for service robots[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 108-115.
- [4] 叶茂,孙泽文,赵毅强,等.一种机载激光测距仪的回波接收系统设计[J].激光与光电子学进展,2024,61(23):413-419.
YE M, SUN Z W, ZHAO Y Q, et al. Design of an echo receiving system for an airborne laser rangefinder [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2024, 61(23): 413-419.
- [5] 曹尹琦,齐媛,程刚,等.军用无人机小型光电吊舱的发展和关键技术[J].飞航导弹,2019(3):54-59.
CAO Y Q, QI Y, CHENG G, et al. Development and key technologies of small electro-optical pods for military drones[J]. Aerial Missiles, 2019(3): 54-59.
- [6] 田英国,张辉,顾新锋,等.一种新的船载激光测距仪动态精度检测方法[J].测控技术,2022,41(12):83-87.
TIAN Y G, ZHANG H, GU X F, et al. A new method

- for dynamic accuracy detection of shipborne laser rangefinder[J]. *Measurement and Control Technology*, 2022, 41(12): 83-87.
- [7] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 1-8.
- WANF CH W, LU H Z, WU J J, et al. Polynomial fitting and error correction of laser triangulation displacement measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5): 1-8.
- [8] WISTH D, CAMURRI M, DAS S, et al. Unified multi-modal landmark tracking for tightly coupled LiDAR visual inertial odometry [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1004-1011.
- [9] NGUYEN T M, CAO M Q, YUAN SH H, et al. VIRAL-Fusion: A visual inertial ranging LiDAR sensor fusion approach [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(2): 958-977.
- [10] 邓雪峰, 付永杰. 基于光电延时模拟法的激光测距仪校准系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2024, 22(3): 43-49.
- DENG X F, FU Y J. Design of laser rangefinder calibration system based on photoelectric delay simulation method [J]. *Optics and Optoelectronics Technology*, 2024, 22(3): 43-49.
- [11] 余浩, 赵旭, 苏中. 脉冲激光测距中高精度时间测量时钟信号误差补偿[J]. *激光杂志*, 2020, 41(7): 23-26.
- YU H, ZHAO X, SU ZH. Clock signal error compensation for high-precision time measurement in pulse laser ranging [J]. *Laser Journal*, 2020, 41(7): 23-26.
- [12] WU Y Q, LI Y ZH, LI W H. Robust LiDAR-based localization scheme for unmanned ground vehicle via multisensor fusion [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(12): 5633-5643.
- [13] 孙聪, 贾萌娜, 于起峰. 基于仿射近似投影模型的无人机对地目标定位方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2022, 30(1): 104-112, 120.
- SUN C, JIA M N, YU Q F. A method for unmanned aerial vehicle to ground target localization based on affine approximate projection model [J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2022, 30(1): 104-112, 120.
- [14] 鲁亚飞, 吴岸平, 陈清阳. 无人机对地目标多帧融合定位与误差收敛特性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(2): 66-73.
- LU Y F, WU AN P, CHEN Q Y. Multi frame fusion positioning and error convergence characteristics analysis of unmanned aerial vehicles for ground targets [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(2): 66-73.
- [15] 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.
- [16] 吴培鹏, 蔡文郁, 唐国栋, 等. 激光测距动态多阈值误差修正技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 170-177.
- WU P P, CAI W Y, TANG G D, et al. Research on dynamic multi threshold error correction technology for laser ranging [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(7): 170-177.
- [17] 项能全, 何炬, 杨涛, 等. 光电跟踪仪光轴平行性要求分析和误差分配[J]. *光学与光电技术*, 2023, 21(6): 34-43.
- XIANG N Q, HE J, YANG T, et al. Analysis and error allocation of optical axis parallelism requirements for optoelectronic trackers [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2023, 21(6): 34-43.
- [18] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(6): 22-33.
- WANG Y F, XU X, TAN Y D. Progress in laser precision ranging technology [J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2021, 42(6): 22-33.
- [19] 孙俊灵, 马鹏阁, 庞栋栋, 等. 机载平台动态杂波背景下多脉冲激光距离扩展目标回波滤波算法研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(3): 174-180.
- SUN J L, MA P G, PANG D D, et al. Research on multi pulse laser range expansion target echo filtering algorithm under dynamic noise background of airborne platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 174-180.
- [20] 孙备, 党昭洋, 吴鹏, 等. 多尺度互交叉注意力改进的单无人机对地伪装目标检测定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 54-65.
- SUN B, DANG ZH Y, WU P, et al. Multi scale cross

attention improved single drone ground camouflage target detection and localization method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 54-65.

- [21] 朱得糠, 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 research on unmanned aerial vehicle visual geolocation[J]. Navigation and Control, 2023, 22(3): 21-33, 20.
- [22] 白冠冰, 宋悦铭, 左羽佳, 等. 机载光电平台的对地多目标定位[J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2323-2336.
BAI G B, SONG Y M, ZUO Y J, et al. Multi target positioning of airborne electro-optical platforms to the ground [J]. Optical Precision Engineering, 2020, 28(10): 2323-2336.
- [23] 吴岸平, 鲁亚飞, 郭正, 等. 采用改进 Sage-Husa 自适应滤波的运动目标三维定位方法[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 146-154.
WU AN P, LU Y F, GUO ZH, et al. A 3D localization method for moving targets using improved Sage-Husa adaptive filtering[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 146-154.

作者简介



郭润泽, 分别在 2018 年、2021 年于国防科技大学获得学士学位、硕士学位, 现为国防科技大学博士研究生, 主要研究方向为智能侦测与对抗。

E-mail: guorunze14@c. edu. cn

Guo Runze received his B.Sc. and M.Sc. degrees from National University of Defense Technology in 2018 and 2021, respectively. He is currently a doctoral student at National University of Defense Technology, with a main research focus on intelligent detection and countermeasures.



孙晓永(通信作者), 2020 年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学助理研究员, 主要研究方向为无人平台智能侦测与对抗。

E-mail: sunxiaoyong14@nudt. edu. cn

Sun Xiaoyong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2020. He is currently an assistant investigator at National University of Defense Technology. His main research interest includes intelligent detection and countermeasure of unmanned platforms.