

# 基于机载标识目标的高速相机标定方法

刘泽庆\*, 许勇, 杜博军, 王亚林

中国人民解放军 63861 部队, 吉林 白城 137000

**摘要** 为解决靶场高速相机在野外大视场测量中标定的问题, 提出基于机载标识目标的标定方法, 采用机载精确定位标识目标来获取已知点集, 并采用基于模拟退火麻雀搜索的方法解算高速相机内外参数。设计易于远距离辨识的机载标识目标, 采用事后动态差分进行精确定位, 并通过位置修正实现标识目标空间位置精确测量; 研究基于模拟退火麻雀搜索标定法, 实现高速相机内外参数解算, 完成标定。在所设计的验证实验中, 所提方法对高速相机内外参数解算的重投影误差为 0.43 pixel, 交会误差均值为 2.5 cm, 标定效果和交会精度优于 Tsai 两步标定法, 提高了高速相机远距离标定精度和交会测量精度, 解决了对空测量时高速相机的标定问题。

**关键词** 遥感; 相机标定; 高速相机; 事后动态差分; 标识目标; 模拟退火; 麻雀搜索算法

中图分类号 TP391.41

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221773

## High-Speed Camera Calibration Method Based on Airborne Identification Target

Liu Zeqing\*, Xu Yong, Du Bojun, Wang Yalin

63861 Unit of the PLA, Baicheng 137000, Jilin, China

**Abstract** To address the issue of high-speed camera calibration in shooting range for field-wide field measurement, a calibration technique based on airborne identification targets is proposed. To obtain the known point set, an airborne precise positioning identification target is used, and a method based on simulated annealing sparrow search is used to solve the internal and external parameters of high-speed cameras. The airborne identification target is intended to be easily identified from a long distance. The dynamic difference after the event is used for precise positioning, and the precise measurement of the spatial position of the identification target is obtained through position correction. Based on the simulated annealing sparrow search calibration method, the internal and external parameters of the high-speed camera are calculated and calibrated. In the verification experiment created, the reprojection error of the proposed method for addressing the internal and external parameters of the high-speed camera is 0.43 pixel, and the average intersection error is 2.5 cm. The calibration effect and intersection accuracy are superior to Tsai's two-step calibration method, which improves the high-speed camera's remote calibration accuracy and intersection measurement accuracy while also resolving the calibration problem during aerial measurement.

**Key words** remote sensing; vision measurement; camera calibration; high-speed camera; post phase difference; simulated annealing; sparrow search algorithm

## 1 引言

高速相机是靶场光学测量中的重要设备, 广泛用于运动目标关键区段瞬态事件的监视以及运动参数、飞行姿态的测量<sup>[1-5]</sup>。靶场测试中, 常采用交会测量的方法进行测试, 进行交会测量前需要对高速相机的内外参数进行标定。目前, 靶场主要采用设置标杆的方

法进行标定, 以标杆上位置已知点作为参考点<sup>[6]</sup>。标杆受高度限制主要分布在视场底部, 不利于对高速相机镜头畸变进行校正, 且在高速相机视场脱离地面时, 该方法不再适用。国内针对大视场测量的相机标定进行了较多研究, 设计小尺寸组合靶标<sup>[7]</sup>、拼接小靶标<sup>[8]</sup>、虚拟平面靶标<sup>[9]</sup>、灵活靶标<sup>[10]</sup>和方向性靶标等<sup>[11-13]</sup>多种靶标进行标定, 也有利用 GPS、北斗定位天线等作为

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-08-11; 录用日期: 2022-08-20; 网络首发日期: 2022-08-29

通信作者: \*guangzhijingwei@163.com

标识目标<sup>[14-17]</sup>进行标定的,但在野外远距离、大视场及相机视场脱离地面时均不适用。黎才鑫等<sup>[18]</sup>利用无人机航迹对相机进行标定,对野外远距离大视场相机标定较为适用,但无人机航迹定位精度相对较低,标定结果不够理想。

为提高高速相机标定精度、增强高速相机测试能力,本文提出基于机载精确定位目标的高速相机标定方法,设计易于辨识的高定位精度多旋翼无人机机载标识目标,以机载标识目标作为已知点,通过无人机在视场中运动得到已知点集,根据已知点集的空间位置和图像位置,解算高速相机内外参数。

## 2 机载精确定位标识目标

### 2.1 事后动态差分(PPK)精确定位技术

多旋翼无人机多采用单点定位方式进行定位,定位精度较低,对成品无人机的定位设备进行差分实现较复杂,且机载定位设备安装位置固定,不利于标识目标的加装,故采用加装精确定位设备的方法来解决机载目标精确定位问题。由于不需要实时获取定位结果,可采用便于机载安装的 PPK 定位接收机实时记录原始观测数据,再通过 PPK 实现精确定位。相对于实时差分定位(RTK),PPK 定位不需要电台实时传输差分信息,设备易于机载集成、作业半径更大,且可在事后处理中通过正、反向卡尔曼滤波融合方法解决卫星失锁的问题,提高定位精度<sup>[19]</sup>。

PPK 是一种基于载波相位后处理差分的定位技术<sup>[20]</sup>,其原理是两台定位接收机同时采集最少两个历元的载波相位观测数据,通过接收机间差分 and 星间差分来实现相对定位。根据卫星定位原理,接收机对卫星的载波相位观测值<sup>[21]</sup>为

$$\phi = \lambda^{-1} [r + c(\delta t_u - \delta t_s - I + T)] + N + \epsilon\phi, \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为载波波长; $f$ 为载波频率; $c$ 为光速; $r$ 为接收机与卫星之间的距离; $\delta t_u$ 为接收机钟差; $\delta t_s$ 为卫星钟差; $I$ 为大气电离层导致的延时; $T$ 为大气对流层导致的延时; $N$ 为周整模糊度; $\epsilon\phi$ 为其他各种未考虑到因素及噪声导致的相位差。

接收机  $u, r$  对卫星  $i, j$  的相位观测值进行接收机间差分 and 星间差分得到的双差相位观测值为

$$\phi_{ur}^{(ij)} = \lambda^{-1} r_{ur}^{(ij)} + N_{ur}^{(ij)} + \epsilon\phi_{ur}^{(ij)}. \quad (2)$$

通过两次差分消除接收机钟差、卫星钟差、电离层延时和对流层延时,代价是接收机观测噪声增加到原来的两倍,一般在 1 cm 左右,测量精度可达到厘米级<sup>[22]</sup>。通过 PPK 实现精确定位得到目标的大地坐标,

通过坐标转换即可得到标定所需的本地直角坐标。

### 2.2 标识目标设计

定位设备采集的数据是定位天线相位中心在空间的位置,受定位天线尺寸、外形等限制,远距离时成像效果较差。为提高可辨识性,采用图 1 的标识灯代替定位天线作为标识目标,其在亮度、尺寸、形状等方面较定位天线有较大提升。经实验验证,定位天线在距高速相机 100 m 时已难以在图像上辨识,而标识灯在距高速相机(焦距为 200 mm,分辨率为 1280×800) 600 m 时仍能够清晰成像,如图 2 所示。



图 1 标识灯

Fig. 1 Identification lamp

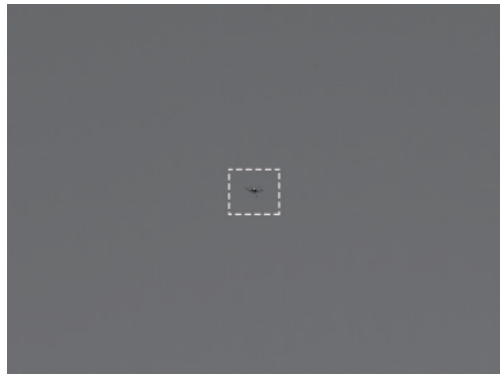


图 2 600 m 标识灯成像效果

Fig. 2 Image of identification lamp at 600 meters

标识灯的精确定位需要通过对定位天线和标识灯空间位置校正实现,标识灯与定位天线的安装位置对其空间位置的校正有重要影响。同一目标在无人机坐标系  $OXYZ$  中的坐标  $(X, Y, Z)$  和在本地坐标系  $oxyz$  中的坐标  $(x, y, z)$  间的转换关系为

$$\begin{cases} x = x_0 + X \cos \varphi \cos \theta + Y (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi) + Z (\cos \psi \cos \varphi \sin \theta + \sin \psi \sin \varphi) \\ y = y_0 + X \cos \theta \sin \varphi + Y (\sin \psi \sin \varphi \sin \theta + \cos \psi \cos \varphi) + Z (\cos \psi \sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi) \\ z = z_0 - X \sin \theta + Y \cos \theta \sin \psi + Z \cos \psi \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\varphi$  为无人机的侧倾角； $\theta$  为无人机的航向角； $\psi$  为无人机的俯仰角。

定位天线和标识灯在当地坐标系的位置差 ( $\Delta x$ ,

$\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) 与其在多旋翼无人机坐标系的位置差 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) 之间的关系为

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta X \cos \varphi \cos \theta + \Delta Y (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi) + \Delta Z (\cos \psi \cos \varphi \sin \theta + \sin \psi \sin \varphi) \\ \Delta y = \Delta X \cos \theta \sin \varphi + \Delta Y (\sin \psi \sin \varphi \sin \theta + \cos \psi \cos \varphi) + \Delta Z (\cos \psi \sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \psi) \\ \Delta z = -\Delta X \sin \theta + \Delta Y \cos \theta \sin \psi + \Delta Z \cos \psi \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

通过调整定位天线和标识灯的安装位置,使二者安装位置连线与机身垂直,可以使  $\Delta X$ 、 $\Delta Z$  均为 0,再通过控制无人机垂直升降运动,使无人机的侧倾角  $\varphi$  和俯仰角  $\psi$  均为 0。此时,定位天线和标识灯之间的位置差可以表示为

$$\begin{cases} \Delta x = 0 \\ \Delta y = \Delta Y, \\ \Delta z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

即通过对高程差进行修正就可根据定位天线的空间位置求解得到标识灯的空间位置。定位天线与标识灯的安装效果及标识目标在无人机上的安装效果如图 3、图 4 所示。

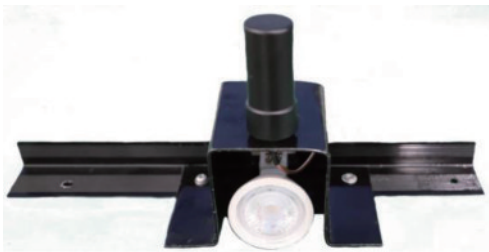


图 3 定位天线与标识灯安装效果  
Fig. 3 Installation effect of positioning antenna and identification lamp



图 4 标识目标在无人机上安装效果  
Fig. 4 Installation effect of identification target on UAV

### 2.3 标识空间位置校正

为了测量定位天线相位中心和标识灯中心在高度方向上的修正值,对定位天线和标识灯进行标记,如图 5 所示。由于定位天线相位中心位于定位天线内部,采用定位天线相位中心外侧同高度位置进行标记,不影响垂直高度差的测量。

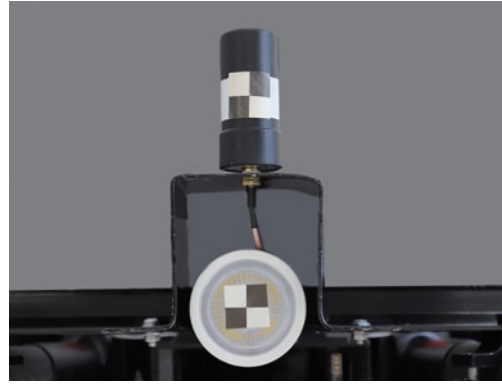


图 5 天线相位中心与标识灯中心标记  
Fig. 5 Marking result of antenna phase center and identification lamp

将定位设备安装在无人机上,并将无人机置于多个平整的位置,采用全站仪分别测量天线相位中心和标识灯中心坐标,计算两个中心垂直方向的距离值,并对多次测量结果计算平均值,得到标识灯和天线相位中心的高度修正值。

### 2.4 标识目标空间位置与图像位置匹配

采用机载标识目标标定高速相机时,通过标识目标在视场中的移动来获取已知点集。标定时定位设备和高速相机分别独立工作,需要解决空间位置与图像位置的匹配问题,因而提出基于时间的匹配方法。

高速相机采用 GPS 授时接收机进行授时,以协调世界时 (UTC) 时间为时间基准工作,采集完成后可以获得每张图像的精确 UTC 时间。机载定位接收机采集的定位数据同样以 UTC 时间标记,每帧定位数据都可以得到其精确定位时间。尽管高速相机和定位接收机数据采集频率不同,但通过边界时间对齐和数据抽帧,可以实现定位数据和图像数据的匹配。经验证,时间匹配误差小于 0.2 ms,无人机升降速度不大于 10 m/s,由此导致的定位误差不大于 2 mm,可以忽略不计。

## 3 标定方法

### 3.1 高速相机成像模型

三维场景通过镜头的小孔成像投影到成像平面形成二维图像的过程即为高速相机的成像过程。根据目标在三维世界中的坐标,得到其在图像上的像素坐标,目标在图像上的像素坐标 ( $u$ ,  $v$ ) 与世界坐标 ( $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$ ) 之间的转换关系<sup>[23]</sup>为

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中： $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵； $\mathbf{T}$ 为位置矩阵； $f$ 为高速相机焦距； $(u_0, v_0)$ 为主点位置； $dx, dy$ 为像元尺寸。

考虑镜头的径向畸变<sup>[24]</sup>，理想图像坐标 $(X_u, Y_u)$ 与实际图像坐标 $(X_d, Y_d)$ 之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} X_u = X_d(1 + k_1 r^2) \\ Y_u = Y_d(1 + k_1 r^2) \end{cases} \quad (7)$$

$f, u_0, v_0, k_1$ 为高速相机固有参数，称为内参数； $\mathbf{R}, \mathbf{T}$ 为与高速相机位置姿态相关的参数，称为外参数。

### 3.2 模拟退火麻雀搜索方法

#### 3.2.1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法<sup>[25]</sup>模拟麻雀群觅食的过程，是发现者-跟随者模型的一种，同时叠加侦查预警机制。以麻雀中找到食物较好的个体作为发现者，其他个体作为跟随者，同时选取部分麻雀进行预警，发现危险即变更位置。

$N$ 只麻雀在 $D$ 维空间中搜索食物，第 $i$ 只在空间中的位置 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD}]$ ， $i=1, 2, \dots, N$ ， $x_{id}$ 为第 $i$ 只麻雀在第 $d$ 维的位置。麻雀中一部分作为发现者，位置采用下式更新：

$$\mathbf{x}_{id}^{i+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{id}^i \cdot \exp\left(\frac{-i}{\rho T}\right) & W < S_T \\ \mathbf{x}_{id}^i + QL & W \geq S_T \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $T$ 为最大迭代次数； $\rho$ 为 $(0, 1]$ 之间的均匀随机数； $Q$ 为随机数，其分布服从标准正态分布； $L$ 为大小为 $1 \times d$ 、元素均为1的矩阵； $W, S_T$ 分别为预警值和安全值，取值范围分别为 $[0, 1], [0.5, 1]$ 。

其余麻雀视作为后期加入者，位置采用下式更新：

$$\mathbf{x}_{id}^{i+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{\mathbf{x}_{wi}^d - \mathbf{x}_{id}^i}{i^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ \mathbf{x}_{id}^{t+1} + \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D (\text{rand}\{-1, 1\}) \cdot |\mathbf{x}_{id}^i - \mathbf{x}_{bd}^{t+1}|, & i \leq \frac{n}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中： $t$ 为迭代次数； $\mathbf{x}_{wi}^d$ 为麻雀群第 $t$ 次迭代时在第 $d$ 维距离食物最远的位置； $\mathbf{x}_{bd}^{t+1}$ 为种群第 $t+1$ 次迭代时麻雀在第 $d$ 维的最佳位置。

其中一部分作为侦察预警者，位置采用下式更新：

$$\mathbf{x}_{id}^{i+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{bd}^t + \lambda(\mathbf{x}_{id}^i - \mathbf{x}_{bd}^t) & f_i \neq f_g \\ \mathbf{x}_{id}^i + \kappa \left( \frac{\mathbf{x}_{id}^i - \mathbf{x}_{wi}^d}{|f_i - f_w| + \varepsilon} \right) & f_i = f_g \end{cases}, \quad (10)$$

式中： $\lambda$ 为随机步长，服从均值为0、方差为1的正态分布； $\kappa$ 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数； $\varepsilon$ 为一个极小的常数； $f_i$ 为第 $i$ 只麻雀的适应度； $f_g$ 和 $f_w$ 分别为当前麻雀种群的最佳和最差适应度。

#### 3.2.2 模拟退火麻雀搜索算法

麻雀算法的局部搜索能力极强、收敛速度较快，但跳出局部最优的能力较弱、全局搜索效果<sup>[26]</sup>较差。为提高算法的全局寻优性能，采用模拟退火算法对麻雀搜索算法进行优化，模拟退火算法以随机搜索的方式从概率意义上进行全局寻优。结合这两个算法的特点，形成模拟退火麻雀搜索算法。遗传模拟退火算法在麻雀位置预警之后，对麻雀位置进行模拟退火操作产生新的位置，并采用Metropolis接受准则来接受麻雀的位置，保证搜索位置的多样性<sup>[27]</sup>，具体流程如下：

- 1) 初始化，设置麻雀群大小、发现者和跟随者的个数、初始温度、目标函数维数、最大迭代次数等；
- 2) 初始麻雀群的位置，并计算每只麻雀的适应度，选出当前最优适应度和其所对应的位置以及当前最差适应度和其对应的位置；
- 3) 选取适应度较好的部分麻雀作为发现者，剩余的作为加入者，并对其位置进行更新；
- 4) 选择部分麻雀进行位置预警，更新其位置；
- 5) 对麻雀群进行模拟退火，产生新的位置；
- 6) 更新整个种群的最优位置和其适应度以及最差位置和其适应度；
- 7) 终止条件判断，判断算法运行是否达到最大迭代次数或者求解精度。若是，则终止计算，输出寻优结果；否则转步骤3)。

#### 3.2.3 基于模拟退火麻雀搜索的标定方法

考虑镜头的径向畸变，求解过程如下：

1) 根据径向畸变模型对旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和 $T_x, T_y$ 进行求解。

根据径向畸变假设，有：

$$\frac{x_c}{y_c} = \frac{X_d}{Y_d} = \frac{r_1 X_w + r_2 Y_w + r_3 Z_w + T_x}{r_4 X_w + r_5 Y_w + r_6 Z_w + T_y}, \quad (11)$$

式中： $r_1 \sim r_9$ 为 $\mathbf{R}$ 的9个参数； $T_x, T_y, T_z$ 为 $\mathbf{T}$ 的3个参数。

结合成像模型，整理可得

$$\begin{bmatrix} X_w Y_d Y_w Y_d Z_w Y_d Y_d - X_w X_d - Y_w X_d - Z_w X_d \\ r_1/T_y \\ r_2/T_y \\ r_3/T_y \\ T_x/T_y \\ r_4/T_y \\ r_5/T_y \\ r_6/T_y \end{bmatrix} = X_d \circ \quad (12)$$

根据上式，利用已知点集中已知点的图像坐标和世界坐标，采用最小二乘法进行求解，即可求解得到 $\mathbf{R}, T_x, T_y$ 。

2) 优化求解 $f, T_z, k_1$ 。

根据成像模型可以建立下列理想像点和实际像点位置的重投影误差模型：

$$g(f, T_z, k_1) = \begin{bmatrix} X_d(1 + k_1 r^2) - f(r_1 X_w + r_2 Y_w + r_3 Z_w + T_x) / (r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + T_z) \\ Y_d(1 + k_1 r^2) - f(r_4 X_w + r_5 Y_w + r_6 Z_w + T_y) / (r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + T_z) \end{bmatrix} \quad (13)$$

以重投影误差模型作为目标函数,采用模拟退火麻雀搜索方法优化求解其最小值,即可解得 $f$ 、 $T_z$ 、 $k_1$ 的值,实现全部参数的求解。

## 4 验证实验

### 4.1 标定精度验证

为验证标定精度,利用3个上升航线中标识灯运动轨迹和多个标杆顶端已知点,分别采用所提方法和 Tsai 两步标定法<sup>[24]</sup>对高速相机进行标定。图6为部分

标识灯在图像上的位置轨迹,标定结果对比如表1所示,采用 Tsai 两步标定法重投影误差如表2所示,采用所提方法标定的重投影误差如表3所示。

从表1可以看出, Tsai 两步标定法和所提方法标定结果基本接近。从焦距上来看,采用所提标定方法的焦距与镜头标称焦距 135 mm 更接近。从重投影误差上来看,所提标定方法的重投影误差为 0.43 pixel, Tsai 两步标定法的重投影误差为 0.99 pixel,所提标定方法的重投影结果明显优于 Tsai 两步标定法。

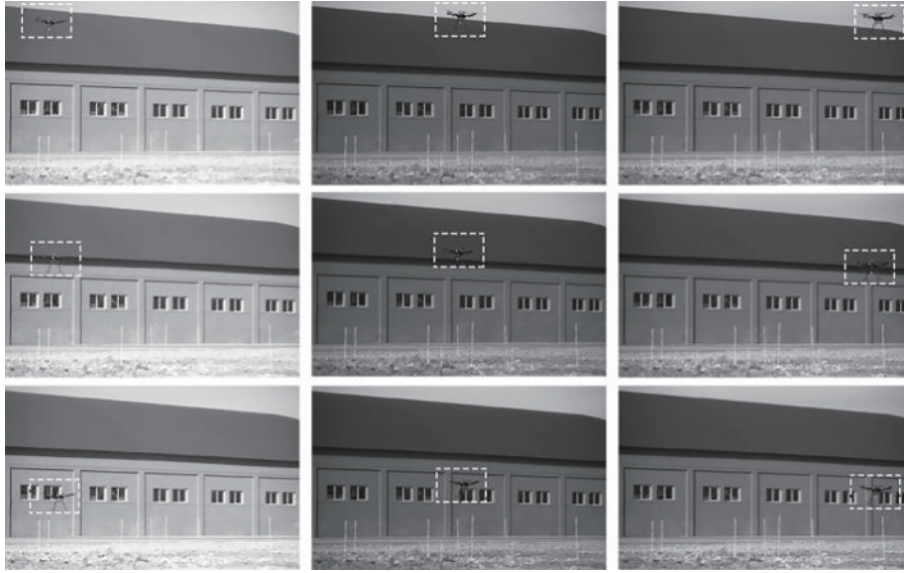


图6 标识灯部分轨迹

Fig. 6 Partial track of identification lamp

表1 标定结果对比

Table 1 Comparison of calibration results

| Parameter    | Tsai  | identification targets   |
|--------------|---|--|
| $u_0$ /pixel | 639.68  | 640.27   |
| $v_0$ /pixel | 399.89  | 399.67   |
| $f$ /mm      | 132.43  | 136.12   |
| $s_x$        | 1.0055  | 0.9966   |
| $k_1$        | -0.0002187  | -0.0003443   |
| $R$          | $\begin{bmatrix} -0.8240 & -0.0079 & 0.5665 \\ 0.0166 & -0.9994 & 0.0289 \\ 0.5660 & 0.0332 & 0.8237 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0.8273 & 0.0006 & 0.5617 \\ 0.0151 & -0.9994 & 0.0307 \\ 0.5614 & 0.0339 & 0.8268 \end{bmatrix}$ |
| $T$ /m       | $\begin{bmatrix} -4.2561 \\ -2.9849 \\ 62.5149 \end{bmatrix}$   | $\begin{bmatrix} -4.2194 \\ -3.0224 \\ 63.8206 \end{bmatrix}$  |

### 4.2 交会精度验证

为进一步验证标定精度,采用所提标定方法和 Tsai 两步标定法分别对两台高速相机进行标定,并采用标定结果进行交会测量,测量标杆的坐标,并将交会计算结果与大地测量结果进行对比,得到测量误差如

表4所示。

从表4可以看出,在相同测量距离下, Tsai 两步标定法的交会误差均值为 3.0 cm,所提标定方法的交会误差为 2.5 cm,所提标定方法的交会精度有明显提升。

表 2 Tsai 两步标定法的重投影误差

Table 2 Reprojection error of two step calibration by Tsai

| No.  | $\Delta X$ /pixel | $\Delta Y$ /pixel | $\Delta R$ /pixel |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|
| B1   | 0.78              | 0.12              | 0.79              |
| B2   | 0.48              | 0.29              | 0.56              |
| B3   | 0.18              | 0.16              | 0.24              |
| B4   | 1.19              | 1.72              | 2.10              |
| B6   | 0.75              | 0.55              | 0.93              |
| B7   | 0.78              | 1.07              | 1.32              |
| B11  | 0.96              | 1.24              | 1.56              |
| mean | 0.63              | 0.72              | 0.99              |

表 3 采用标识灯轨迹标定的重投影误差

Table 3 Reprojection error of calibration by identification targets

| No.  | $\Delta X$ /pixel | $\Delta Y$ /pixel | $\Delta R$ /pixel |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1    | 0.12              | 0.10              | 0.16              |
| 2    | 0.01              | 0.08              | 0.09              |
| 3    | 0.45              | 0.13              | 0.47              |
| ⋮    | ⋮                 | ⋮                 | ⋮                 |
| 63   | 0.33              | 0.38              | 0.50              |
| 64   | 0.46              | 0.09              | 0.47              |
| 65   | 0.02              | 0.24              | 0.24              |
| 66   | 0.04              | 0.30              | 0.31              |
| mean | 0.26              | 0.29              | 0.43              |

表 4 交会误差

Table 4 Intersection error

| No.  | Two step calibration by Tsai |                |                |                | Trajectory of identification lamp |                |                |                |
|------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|      | $\Delta x$ /cm               | $\Delta y$ /cm | $\Delta z$ /cm | $\Delta R$ /cm | $\Delta x$ /cm                    | $\Delta y$ /cm | $\Delta z$ /cm | $\Delta R$ /cm |
| A1   | 1.8                          | 1.8            | 1.7            | 3.1            | 1.6                               | 1.9            | 0.8            | 2.6            |
| A2   | 1.6                          | 2.3            | 1.6            | 3.2            | 1.2                               | 1.8            | 1.3            | 2.5            |
| A3   | 1.1                          | 1.9            | 2.2            | 3.1            | 0.3                               | 2.5            | 0.2            | 2.5            |
| A4   | 1.6                          | 2.6            | 1.1            | 3.2            | 1.4                               | 2.5            | 0.8            | 3.0            |
| A5   | 0.8                          | 2.7            | 1.2            | 3.1            | 0.2                               | 2.7            | 0.9            | 2.9            |
| A6   | 0.9                          | 2.1            | 1.2            | 2.6            | 0.3                               | 1.9            | 1.1            | 2.2            |
| A7   | 1.1                          | 2.6            | 1.6            | 3.2            | 1.0                               | 2.6            | 0.1            | 2.8            |
| A8   | 1.7                          | 2.5            | 0.6            | 3.1            | 0.5                               | 1.8            | 0.1            | 1.9            |
| A9   | 0.7                          | 2.9            | 0.4            | 3.0            | 0.1                               | 2.7            | 0.1            | 2.7            |
| A10  | 0.6                          | 2.2            | 1.1            | 2.5            | 0.7                               | 2.2            | 0.6            | 2.4            |
| A11  | 1.2                          | 2.5            | 1.6            | 3.2            | 0.8                               | 1.5            | 1.6            | 2.3            |
| mean | 1.2                          | 2.4            | 1.3            | 3.0            | 0.7                               | 2.2            | 0.7            | 2.5            |

## 5 结 论

针对高速相机进行远距离对空测量时的标定问题,设计机载精确定位目标,并利用基于模拟退火麻雀搜索标定法对高速相机内外参数进行标定。标定实验结果表明,所提方法的重投影误差为 0.43 pixel、交会

误差均值为 2.5 cm,标定效果和交会精度均优于 Tsai 两步标定法。相比现有的标定方法,所提方法优势在于:

1) 机载标识灯的位置不受地形和视场限制,可以满足高速相机视场底部脱离地面时的标定需求;

2) 采用标识灯进行标定时,标识灯可以在视场中相对均匀地分布,这对镜头畸变校正有重要作用;

3) 采用标识灯标定能够获取足够多的已知点,在标定时,可以舍弃定位效果差和提取效果较差的点,提高已知点的坐标精度。

相比现有方法,所提标定方法对远距离测量精度的改善较为明显,但所设计的标识目标对无人机飞行航线要求较高,其定位精度在一定程度上会受无人机飞行姿态的影响,在实际应用中可采用定点飞行的方法来提高无人机垂直航线的准确性。

## 参 考 文 献

- [1] 向丽. 靶场序列图像中火箭三维姿态测量及尾焰跟踪修正方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.  
Xiang L. Research for 3D altitude measurement and the amendatory method to the tail-flame tracking of the rocket in series image for ranges[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [2] 刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 基于数字摄影测量的靶场高速摄影测速方法[J]. 弹道学报, 2015, 27(4): 47-51.  
Liu Z Q, Zhang Y R, Zhao J X, et al. High-speed photography velocity measurement in range based on digital photogrammetry[J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(4): 47-51.
- [3] 张祖勋, 苏国中, 张剑清, 等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4): 287-291.  
Zhang Z X, Su G Z, Zhang J Q, et al. Airplane pose measurement from image sequences[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(4): 287-291.
- [4] 赵富全, 丛孟凯, 张海永. 基于高速摄像的某型小口径火炮动态测试[J]. 电子测量技术, 2011, 34(10): 80-82.  
Zhao F Q, Cong M K, Zhang H Y. Dynamic test of amor-pirecing shell of small caliber Gun based on high speed video[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(10): 80-82.
- [5] 张正成. 高精度弹药末端参数测试系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.  
Zhang Z C. Design of high precision ammunition terminal parameter testing system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- [6] 刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 靶场静爆实验测速高速相机标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111501.  
Liu Z Q, Zhang Y R, Zhao J X, et al. High speed camera calibration for velocity measurement in range static explosion experiment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111501.

- [7] 杨宁, 霍炬, 杨明, 等. 基于小尺寸靶标组合的大视场摄像机标定方法[J]. 光电子·激光, 2013, 24(8): 1569-1575.  
Yang N, Huo J, Yang M, et al. A calibration method of camera with large field-of-view based on spliced small targets[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(8): 1569-1575.
- [8] 林武康. 摄像机大视场标定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
Lin W K. Research on camera calibration method of wide field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [9] 韩杨杨. 基于虚拟平面靶标的大视场摄像机标定技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.  
Han Y Y. Research on calibration technology for cameras with large FOV based on virtual planar target[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [10] 刘震, 尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315001.  
Liu Z, Shang Y N. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315001.
- [11] 杨霏, 殷玉龙, 卢荣胜, 等. 基于方向性靶标和多约束优化的双目相机标定[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0815002.  
Yang P, Yin Y L, Lu R S, et al. Binocular camera calibration based on directional target and multi-constraint optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0815002.
- [12] 张晓强, 钟良涛, 冷齐齐, 等. 基于多层平面折射模型与多投影中心模型的光场相机水下标定[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1215001.  
Zhang X Q, Zhong L T, Leng Q Q, et al. Underwater light field camera calibration based on multi-layer flat refractive model and multi-projection-center model[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1215001.
- [13] 赵敏, 李晓港, 苏泽鹏, 等. 基于定向分层靶标的相机参数标定[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1612004.  
Zhao M, Li X G, Su Z P, et al. Camera parameter calibration based on directional layered target[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1612004.
- [14] 吴修振, 刘刚, 于凤全, 等. 基于单目视觉的 GPS 辅助相机外参数标定[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2252-2258.  
Wu X Z, Liu G, Yu F Q, et al. Calibration of camera extrinsic parameters based on monocular visual with GPS assistant[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 2252-2258.
- [15] 孔筱芳, 陈钱, 顾国华, 等. 基于全球定位系统的相机标定方法研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2301-2307.  
Kong X F, Chen Q, Gu G H, et al. A GPS-based camera calibration method[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12): 2301-2307.
- [16] 王晶. 野外大视场双目视觉坐标定位系统快速标定方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Wang J. Research on the fast calibration method for the large field measurement system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [17] 邓子贤. 野外大视场立体视觉空间坐标测系统自标定方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
Deng Z X. Research on self-calibration method for stereoscopic vision space coordinate measuring system with large field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [18] 黎才鑫, 李天伟, 黄谦. 基于无人机航迹大视场摄像机标定算法研究[J]. 海洋测绘, 2019, 39(4): 61-65.  
Li C X, Li T W, Huang Q. Research on camera calibration algorithms in large field of view based on UAV track[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(4): 61-65.
- [19] 王智, 曹庆磊, 张洪德, 等. PPK 动态后处理测量技术及精度分析[J]. 城市勘测, 2019(2): 97-100.  
Wang Z, Cao Q L, Zhang H D, et al. Application and accuracy analysis of PPK measurement technology[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(2): 97-100.
- [20] 李振. GPS PPK 技术在测量中的应用[J]. 中国水运, 2009, 9(1): 133-133, 135.  
Li Z. The application of GPS PPK technology in surveying[J]. China Water Transport, 2009, 9(1): 133-133, 135.
- [21] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 72-74.  
Xie G. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 72-74.
- [22] 杨德芳, 许伟, 万玉辉, 等. 机载高动态 GPS 单基站事后差分解算精度分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(12): 75-79, 83.  
Yang D F, Xu W, Wan Y H, et al. Post-differential calculating accuracy analysis of the high dynamic GPS single-reference station[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(12): 75-79, 83.
- [23] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 79-84.  
Zhang G J. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2005: 79-84.
- [24] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [25] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [26] 吕鑫, 慕晓冬, 张钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712-1720.  
Lü X, Mu X D, Zhang J, et al. Chaos sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1712-1720.
- [27] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.  
Gong C, Wang Z L. Proficient in MATLAB optimization calculation[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.