

文章编号 1004-924X(2020)06-1265-10

大倾角远距离航空成像的修正系统误差定位方法

李 彬^{1*}, 丁亚林¹, 修吉宏¹, 李 军¹, 乔 川²

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要:针对目前对地目标定位算法在大倾角远距离航空成像应用时定位误差较大的问题,提出了一种修正系统误差定位方法。对大倾角远距离航空成像系统的系统误差进行分析与建模,给出了包含系统误差修正模型的对地目标定位算法,并针对残余误差的获取问题,进一步提出了一种依据地面控制点估计残留误差参数的方法。仿真结果表明,依据地面控制点估计残留误差参数,可将残留误差降为 1/10。飞行试验数据验证,在进行大倾角远距离航空成像目标定位时,通过修正系统误差可将定位误差平均值从 401 m 缩小到 97 m。修正系统误差定位方法可以有效提高在大倾角远距离航空成像应用时对地目标定位的准确度。

关键词:航空相机;目标定位;误差修正;定位误差

中图分类号:V443.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202806.1265

System error corrected ground target geo-location method for long-distance aviation imaging with large inclination angle

LI Bin^{1*}, DING Ya-lin¹, XIU Ji-hong¹, LI Jun¹, QIAO Chuan²

- (1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 - 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)*
- * Corresponding author, E-mail: mykey008@126.com*

Abstract: To solve the problem of large geo-location error in the application of ground target geo-location in long-distance aviation imaging with large inclination angle, a systematic error corrected geo-location was proposed. The systematic error analysis and modeling of the long-distance aviation imaging system with large inclination angle was carried out. In view of the difficulty in obtaining the residual error, a method for estimating residual error parameters based on ground control points was proposed. The simulation results show that the residual error can be reduced to 1/10 by estimating residual error parameters based on ground control points. Flight test data confirm that the mean geo-location error can be reduced from 401 m to 97 m by correcting the systematic error in the positioning of targets in long-distance aviation imaging with large inclination angle. Thus, the systematic error cor-

收稿日期:2019-12-02;修订日期:2020-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61675202)

rected geo-location method can effectively improve the accuracy of ground target geo-location in the application of long-distance aviation imaging with large inclination angle.

Key words: aerial camera; geo-location; error correction; geo-location error

1 引言

为了快速获取地面目标信息,目前的航空相机在进行高分辨率成像外,还要同时获得地面目标的定位信息^[1-2]。为了实现地面目标定位功能,国内外学者针对航空相机对地目标定位算法进行了大量研究。周前飞等^[3]利用像元视线向量法,建立了机载光电平台多目标自主定位系统,实现了对多目标的实时定位。张赫等^[4]针对小型机载光电平台利用扩展卡尔曼滤波方法,基于椭球模型进行目标定位。这些算法针对成像距离为 15 km 以内的目标进行定位,采用激光测距装置获得目标距离信息,不适用于远距离航空成像。

Hosseinpoor 等^[5-6]利用搭载了全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的无人机对目标区域进行反复成像,采用扩展卡尔曼滤波对数据进行处理,实现目标定位。孙辉等^[7]提出对目标多次成像,采用最小二乘法计算目标的定位信息。徐诚等^[8]采用无迹卡尔曼滤波方法对多次成像的目标进行定位计算。这些方法都需要对静止目标进行多次成像,不适用于大倾角一次成像的功能要求。

杨洪涛等^[9]提出基于地球平面模型计算目标定位信息,由于没有考虑地球曲率,所以不适用于远距离成像。Helgesen 等^[10]和 Stich 等^[11]提出基于 WGS-84 坐标系定义的椭球模型进行目标定位计算,考虑了地球曲率,但不适用于地形起伏很大的目标区域。杜言鲁等^[12]依据已知的视轴指向角,利用地球椭球模型计算目标位置信息,并分析了目标大地高对定位精度的影响。乔川等^[13]提出了依据地球椭球模型进行目标定位计算,给出了坐标转换矩阵,并代入了目标区域的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),但在大倾角远距离航空成像实际应用时,会产生较大的定位误差。

本文针对在大倾角远距离航空成像时对地目标算法的误差进行分析,提出了一种可以修正系

统误差的大倾角远距离航空成像修正系统误差定位方法。该算法在基于椭球模型和中心投影原理的对地目标定位算法的基础上,加入了系统误差修正模型,修正了探测器安装误差、组合惯导安装误差以及相机转轴安装误差。误差修正参数包括地面标定获得的标定误差参数以及残余误差参数,针对不能进行实验室标定的残余误差参数给出了一种地面控制点计算残余误差方法,并通过仿真实验证明了该方法的有效性。最后,利用飞行试验数据验证,在大倾角远距离航空成像应用时,本方法可以修正目标定位中的系统误差,提高定位准确性。

2 算法原理

目标定位指的是能有效获取航拍影像中目标区域的地理位置信息,对拍摄区域进行进一步分析和处理。目前机载相机逐步安装有 POS 系统用于定位功能。POS 系统由 GPS 和惯性测量单元(Inertial Measuring Unit, IMU)组成,可以准确测量载机位置信息和姿态信息,在导航、摄影测量等领域得到了广泛应用^[14]。

大倾角远距离航空相机结构如图 1 所示。相

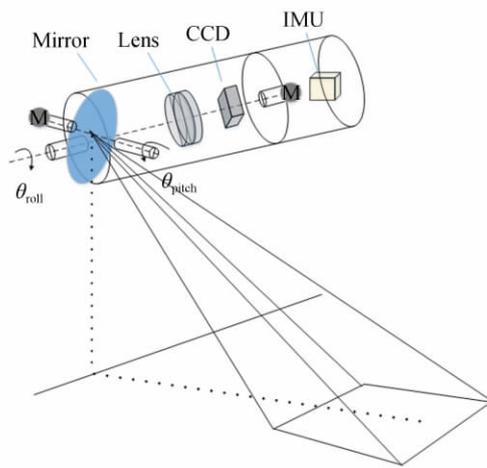


图 1 远距离航空相机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of long-distance aerial camera

机安装在飞机底部,沿飞机飞行方向布置。相机俯角镜筒转轴与载机横滚轴一致。当俯角镜筒在初始位置时,位角摆镜转轴与载机俯仰轴平行。在拍摄过程中,通过转动镜筒和摆镜,可以控制相机的视轴指向,进行连续摆扫成像。POS系统与飞机惯导共用一个GPS天线,天线安装在飞机顶端。IMU单元安装在相机后罩内,不随俯角镜筒转动。

当相机对地面拍照时,地面点光线通过扫描反射镜及物镜组成像在探测器上,符合中心投影原理^[15],其简图如图2所示。

对于理想光学系统,投影中心、物点、像点三

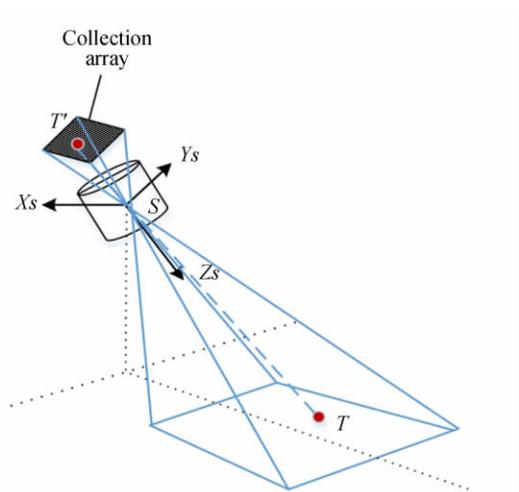


图 2 航空相机对目标成像示意图

Fig.2 Imaging of target by aerial camera

点共线。以相机投影中心 S 为原点,建立相机坐标系 $S-X_S Y_S Z_S$, SZ_S 是视轴指向。过像面上目标投影点 T' 与相机坐标系原点 S 建立一条直线,则真实目标点 T 在这条直线上。

根据 WGS-84 坐标系定义,建立基于地球椭圆模型的地球坐标系 (ECEF) $E-X_E Y_E Z_E$ 。原点 E 为地球质心, EX_E 轴指向本初子午线与赤道交点, EZ_E 指向北极,与 EY_E 组成右手坐标系。

目标点在地球坐标系下的坐标 $T_E = [x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$, 在地球坐标系下建立中心投影构像方程式:

$$\frac{x_T^E - x_S^E}{x_T^E - x_S^E} = \frac{y_T^E - y_S^E}{y_T^E - y_S^E} = \frac{z_T^E - z_S^E}{z_T^E - z_S^E}, \quad (1)$$

其中: $S_E = [x_S^E \ y_S^E \ z_S^E]^T$ 为相机投影中心 S 在地球坐标系下坐标, $T'_E = [x_{T'}^E \ y_{T'}^E \ z_{T'}^E]^T$ 为目标在像面上的投影点 T' 在地球坐标系下坐标。

由于目标点在地球水平面以上,应满足椭球方程^[16], 即有:

$$\frac{(x_T^E)^2}{(R_E)_T^2} + \frac{(y_T^E)^2}{(R_E)_T^2} + \frac{(z_T^E)^2}{(R_P)_T^2} = 1, \quad (2)$$

其中: $(R_E)_T = R_E + h_T$, 为目标大地高 h_T 对应的地球短半轴; $(R_P)_T = (R_E)_T (1 - e^2)^{\frac{1}{2}}$, 为目标对应的地球长半轴。

联立式(1)和式(2),求解可得目标点 T 在地球坐标系下的坐标 $T_E = [x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ 。求解目标 T 的经纬度信息需要采用迭代的方式,建立方程组:

$$\begin{cases} (R_{NT})_0 = R_E \\ (h_T)_0 = [(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2 + (z_T^E)^2]^{\frac{1}{2}} - (R_E R_P)^{\frac{1}{2}} \\ (j_T)_0 = \arctan \left[\frac{z_T^E [(1 - e^2)(R_{NT})_0 + (h_T)_0]}{[(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2]^{\frac{1}{2}} ((R_{NT})_0 + (h_T)_0)} \right] \end{cases} \quad (3)$$

依据式(3)得到目标所在椭球半径初值 $(R_{NT})_0$, 目标大地高初值 $(h_T)_0$ 及目标纬度初值 $(\varphi_T)_0$ 。然后建立迭代方程组:

$$\begin{cases} (R_{NT})_i = \frac{R_E}{(1 - e^2 \sin^2(\varphi_T)_{i-1})^{\frac{1}{2}}} \\ (h_T)_i = \frac{[(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2]^{\frac{1}{2}}}{\cos(\varphi_T)_{i-1}} - (R_{NT})_{i-1} \\ (\varphi_T)_i = \arctan \left[\frac{z_T^E [(1 - e^2)(R_{NT})_{i-1} + (h_T)_{i-1}]}{[(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2]^{\frac{1}{2}} ((R_{NT})_{i-1} + (h_T)_{i-1})} \right] \end{cases} \quad (4)$$

依据式(4)迭代 4 次求解得到目标点 T 的纬度 φ_T 和目标大地高 h_T 。根据经度定义有方程:

$$\lambda_T = \arctan \left(\frac{x_T^E}{y_T^E} \right). \quad (5)$$

解方程(5)得到目标点经度 λ_T 。

3 系统误差修正

根据地目标定位算法原理可以知道,计算定位信息需要通过坐标转换得到目标投影点 T' 和相机投影中心 S 在地球坐标系 (ECEF) 下的坐标。因为坐标转换过程包含一些误差项,随着对地目标距离的增大,误差影响也会增大。所以在进行大倾角远距离航空成像时,对地目标定位算法的定位结果会有很大偏差,无法满足工程需要。

定位结果偏差的主要因素包括测量误差和系统误差。测量误差包括组合惯导在拍摄过程中给出的地理信息测量误差和姿态信息测量误差,以及俯角镜筒和位角摆镜转轴上的轴角传感器在拍摄过程中给出的角信息测量误差。这些测量误差是服从正态分布的随机误差。系统误差包括探测器安装误差、组合惯导安装误差以及位俯角转轴安装误差。对于某一架航空相机,在装调状态稳定后,其系统误差也会相对保持稳定,所以可以通过实验标定和优化计算模型来消除。

3.1 探测器安装误差修正

过相机投影中心 S 向探测器焦平面 P 作的垂线与像面相交于 o , o 为像主点, $So = f$ 为相机主距。探测器安装过程虽然经过视轴配准装调,但仍会存在安装误差,使得探测器中心不在光轴上,从而导致主点的偏差,需要对像面坐标 $o-X_oY_o$ 系进行平移,使平移后的像面坐标系 $o'-X_o'Y_o'$ 中心在相机坐标系的 Z_s 轴上,并与相机坐标系的

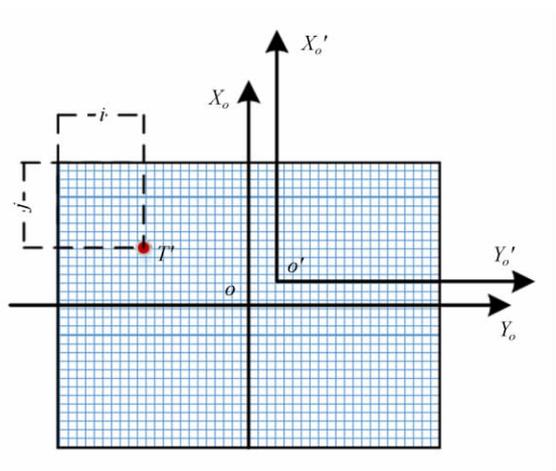


图 3 目标在像面上的投影点

Fig. 3 Projection point of target on detector

X_sY_s 面平行。

若探测器像元尺寸为 a , 像元数为 $M \times N$, 目标投影 T' 在像面内坐标为 (i, j) , 相机经过主点偏差标定实验得到主点 o' 在相面坐标系坐标 (x_o', y_o') 。如图 3 所示, 可得加入探测器安装误差修正模型后, 目标在探测器上投影点 T' 在相机坐标系 S 下的坐标为:

$$(T'_s)' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a \times \left(\frac{M+1}{2} - x_o' \right) \\ 0 & 1 & 0 & -a \times \left(\frac{M+1}{2} - y_o' \right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \times \left(\frac{M+1}{2} - i \right) \\ a \times \left(j - \frac{N+1}{2} \right) \\ -f \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3.2 组合惯导安装误差修正

组合惯导由 GPS 和 IMU 组成。GPS 安装在飞机顶端, 可以给出相机在拍照过程中的地理信息; IMU 安装在相机后罩内, 在拍照过程中给出相机姿态信息, 如图 4 所示。组合惯导的安装误差一方面会导致 IMU 给出的相机姿态与实际姿态不一致, 另一方面如果不考虑 GPS 安装位置, 则 GPS 给出的高度信息与相机实际高度会存在不一致。

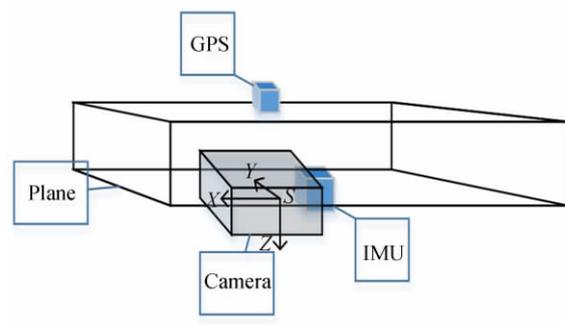


图 4 POS 安装示意图

Fig. 4 Assembly of POS

建立地理坐标系 (NED) $S-NED$, 原点与相机坐标系原点 S 重合, 地理坐标系 S_N 和 S_E 坐标轴分别指向正北和正东, S_D 轴指向地心, 垂直于当地参考椭球的切线。GPS 给出的位置信息包

括相机经度 λ_s 、相机纬度 φ_s 和相机大地高 h_s 。测量得到安装后 GPS 中心点与相机坐标系高度差为 h' 。依据几何关系建立方程组:

$$\begin{bmatrix} x_s^E \\ y_s^E \\ z_s^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + h_A - h') \cos \varphi_s \cos \lambda_s \\ (R_N + h_A - h') \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ (R_N (1 - e^2) + h_A - h') \sin \varphi_s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\text{NED}}^{\text{ECEF}} \end{pmatrix}' = \begin{bmatrix} -\cos \lambda_s \sin \varphi_s & -\sin \lambda_s & -\cos \lambda_s \cos \varphi_s & \cos \lambda_s \cos \varphi_s \left(\frac{R_N}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_s}} + h_A - h' \right) \\ -\sin \lambda_s \sin \varphi_s & \cos \lambda_s & -\sin \lambda_s \cos \varphi_s & \sin \lambda_s \cos \varphi_s \left(\frac{R_N}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_s}} + h_A - h' \right) \\ \cos \varphi_s & 0 & \cos \varphi_s & \sin \varphi_s \left(\frac{R_N}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_s}} + h_A - h' \right) - R_N \times \sin \varphi_s \times e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

建立相机机身坐标系^[17] (AC) S-XYZ, 原点与相机坐标系原点 S 重合。当相机处于初始状态, 即俯角镜筒和位角摆镜都处于零位时, 相机机身坐标系和相机坐标系重合。IMU 与相机机身刚性连接, 在相机工作过程中, IMU 需要给出相机机身姿态信息, 包括航向角 y 、俯仰角 p 和横滚角 r 。理想状态下, IMU 坐标系与相机坐标系可

其中 $R_N = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_s}}$, 为相机位置对应的卯酉圈曲率半径。根据式 (7) 可得到加入 GPS 安装误差修正模型后从地理坐标系 (NED) 到地球坐标系 (ECEF) 的变换矩阵为:

以通过平移后重合, 但实际存在安装误差, 使两个坐标系存在旋转角。所以需要在 IMU 安装后, 经过地面标定, 给出航向、俯仰和横滚 3 个方向的安装误差角 Φ_y, Φ_p, Φ_r 。标定后仍然残留的安装误差角用 $\delta_y, \delta_p, \delta_r$ 分别表示。加入 IMU 安装误差修正模型后, 从相机机身坐标系 (AC) 到地理坐标系 (NED) 的变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}} \end{pmatrix}' = \begin{bmatrix} \cos \delta_y \cos \delta_p & -\sin \delta_y \cos \delta_r + \cos \delta_y \sin \delta_p \sin \delta_r & \sin \delta_y \sin \delta_r + \cos \delta_y \sin \delta_p \cos \delta_r & 0 \\ \sin \delta_y \cos \delta_p & \cos \delta_y \cos \delta_r + \sin \delta_y \sin \delta_p \sin \delta_r & -\cos \delta_y \sin \delta_r + \sin \delta_y \sin \delta_p \cos \delta_r & 0 \\ -\sin \delta_p & \cos \delta_p \sin \delta_r & \cos \delta_p \cos \delta_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos y \cos p & -\sin y \cos r + \cos y \sin p \sin r & \sin y \sin r + \cos y \sin p \cos r & 0 \\ \sin y \cos p & \cos y \cos r + \sin y \sin p \sin r & -\cos y \sin r + \sin y \sin p \cos r & 0 \\ -\sin p & \cos p \sin r & \cos p \cos r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Phi_y \cos \Phi_p & -\sin \Phi_y \cos \Phi_r + \cos \Phi_y \sin \Phi_p \sin \Phi_r & \sin \Phi_y \sin \Phi_r + \cos \Phi_y \sin \Phi_p \cos \Phi_r & 0 \\ \sin \Phi_y \cos \Phi_p & \cos \Phi_y \cos \Phi_r + \sin \Phi_y \sin \Phi_p \sin \Phi_r & -\cos \Phi_y \sin \Phi_r + \sin \Phi_y \sin \Phi_p \cos \Phi_r & 0 \\ -\sin \Phi_p & \cos \Phi_p \sin \Phi_r & \cos \Phi_p \cos \Phi_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

3.3 相机转轴安装误差修正

相机在转轴装调的理想状态是保证俯角镜筒转轴与相机坐标系 X_s 轴平行, 在俯角镜筒处于零位时, 位角摆镜转轴与相机坐标系 Y_s 平行。但在实际操作中, 装调结束后仍会存在转轴安装误差, 导致两个旋转轴与相机的横滚俯仰方向不一致。在相机拍照过程中, 安装在转轴上的轴角

传感器会输出转轴的角度, 轴角传感器输出值需要根据相机结构和光学设计转换到相机坐标系中, 用 α 表示绕 X_{AC} 旋转角, β 表示绕 Y_{AC} 旋转角, 用 δ_α 和 δ_β 分别表示俯角镜筒转轴和位角摆镜转轴的安裝误差角。加入转轴安装误差修正模型后, 从相机坐标系 (S) 到相机机身坐标系 (AC) 的变换矩阵为:

$$\begin{aligned}
 & (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})' = \\
 & \begin{bmatrix} \cos \delta_\beta & 0 & \sin \delta_\beta & 0 \\ \sin \delta_\alpha \sin \delta_\beta & \cos \delta_\alpha & -\sin \delta_\alpha \cos \delta_\beta & 0 \\ -\cos \delta_\alpha \sin \delta_\beta & \sin \delta_\alpha & \cos \delta_\alpha \cos \delta_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 & \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cos \beta & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \quad (10)$$

3.4 利用地面控制点估计残留误差参数

通过系统误差修正模型可以看出,除了可以在地面标定实验中得到的标定误差参数外,还需要知道残留误差参数。当一台相机装调稳定后,系统误差会保持相对稳定,所以可以利用航拍得到图像中的地面控制点来计算得到残留系统误差参数。

已知地面控制点 T 的地理信息为纬度 φ_T , 经度 λ_T , 大地高 h_T , 可以建立方程:

$$\begin{bmatrix} x_T^N \\ y_T^N \\ z_T^N \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\text{ECEF}}^{\text{NED}} \begin{bmatrix} (R_{NT} + h_T) \cos \varphi_T \cos \lambda_T \\ (R_{NT} + h_T) \cos \varphi_T \sin \lambda_T \\ (R_{NT} (1 - e^2) + h_T) \sin \varphi_T \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: R_{NT} 为控制点 T 所对应的地球卯酉圈曲率半径, $\mathbf{C}_{\text{ECEF}}^{\text{NED}}$ 为从地球坐标系到地理坐标系的转换矩阵。

对控制点 T 成像,可以得到控制点在探测器上的像,即控制点投影点 T' 在像面内坐标 (i, j) 。依据公式(6)可以得到控制点投影在相机坐标中的坐标 T'_s 。根据中心投影原理可知,控制点 T 与像点 T' 的连线经过投影中心,同时分属与原像两侧,则可建立方程:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} + a_{21} \delta_y - a_{31} \delta_p + a_{13} \delta_\beta & a_{12} + a_{22} \delta_y - a_{32} \delta_p - a_{13} \delta_\alpha & a_{13} + a_{23} \delta_y - a_{33} \delta_p - a_{12} \delta_\beta + a_{11} \delta_\alpha \\ -a_{11} \delta_y + a_{21} - a_{31} \delta_r + a_{23} \delta_\beta & -a_{12} \delta_y + a_{22} + a_{32} \delta_r - a_{23} \delta_\alpha & -a_{13} \delta_y + a_{23} + a_{33} \delta_r - a_{21} \delta_\beta + a_{22} \delta_\alpha \\ a_{11} \delta_p + a_{21} \delta_r - a_{31} + a_{33} \delta_\beta & a_{12} \delta_p - a_{22} \delta_r + a_{32} - a_{33} \delta_\alpha & a_{13} \delta_p - a_{23} \delta_r + a_{33} - a_{31} \delta_\beta + a_{32} \delta_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

令:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a_{21} m_1 + a_{22} m_2 + a_{23} m_3 & -(a_{31} m_1 + a_{32} m_2 + a_{33} m_3) & 0 & a_{12} m_3 - a_{13} m_2 & a_{13} m_1 - a_{11} m_3 \\ -(a_{11} m_1 + a_{12} m_2 + a_{13} m_3) & 0 & a_{31} m_1 + a_{32} m_2 + a_{33} m_3 & a_{22} m_3 - a_{23} m_2 & a_{23} m_1 - a_{21} m_3 \\ 0 & a_{11} m_1 + a_{12} m_2 + a_{13} m_3 & -(a_{21} m_1 + a_{22} m_2 + a_{23} m_3) & a_{32} m_3 - a_{33} m_2 & a_{33} m_1 - a_{31} m_3 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathbf{T}_N}{|\mathbf{T}_N|} \\ 1 \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}})' \times (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})' \times \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{T}'_s}{|\mathbf{T}'_s|} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中 $\frac{\mathbf{T}_N}{|\mathbf{T}_N|}$ 和 $\frac{\mathbf{T}'_s}{|\mathbf{T}'_s|}$ 分别表示对 T_N 和 T'_s 单位化。

将 $(\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}})' \times (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})'$ 展开,其中的 5 个未知残余系统误差量 $\delta_y, \delta_p, \delta_r, \delta_\alpha, \delta_\beta$ 都是小量,所以可以展开为:

$$\begin{aligned}
 & (\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}})' \times (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta_p & 0 \\ \delta_y & 1 & -\Phi_r & 0 \\ -\delta_p & \delta_r & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 & (\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}})'' \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta_\beta & 0 \\ 0 & 1 & -\delta_\alpha & 0 \\ -\delta_\beta & \delta_\alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})'''.
 \end{aligned} \quad (13)$$

为方便表述,记:

$$\begin{cases} \frac{\mathbf{T}_N}{|\mathbf{T}_N|} = [n_1 \quad n_2 \quad n_3]^T \\ (\mathbf{C}_S^{\text{AC}})'' \times \left[\frac{\mathbf{T}'_s}{|\mathbf{T}'_s|} \quad 1 \right]^T = [m_1 \quad m_2 \quad m_3]^T \end{cases}, \quad (14)$$

$$(\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}})'' = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

在计算过程中可忽略二阶小量,依据式(12)整理为:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} n_1 - a_{11}m_1 - a_{12}m_2 - a_{13}m_3 \\ n_2 - a_{21}m_1 - a_{22}m_2 - a_{23}m_3 \\ n_3 - a_{31}m_1 - a_{32}m_2 - a_{33}m_3 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

整理式(16)得到:

$$\mathbf{X} \times \begin{bmatrix} \delta_y \\ \delta_p \\ \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{y}, \quad (19)$$

采用最小二乘法对 5 个系统误差未知量进行估计。当获得 n 个控制点的成像后,每个控制点成像可得到 3 个方程, \mathbf{X} 成为 $3n \times 5$ 的矩阵, \mathbf{y} 成为 $3n \times 1$ 的矩阵。利用最小二乘法得到:

$$[\delta_y \ \delta_p \ \delta_r \ \delta_a \ \delta_\beta] = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (20)$$

4 仿真实验

利用 Matlab 对估计残留系统误差参数过程进行仿真实验。假定组合惯导的安装误差为航向方向 0.030° , 俯仰方向 -0.015° , 横滚方向 0.012° , 相机转轴的误差为俯角镜筒转轴误差角 0.010° , 位角摆镜误差角 -0.020° 。控制点 T 的地理信息为 $33.980\ 849^\circ\text{N}, 107.523\ 239^\circ\text{E}, 3\ 132.10\ \text{m}$, 相机在不同的位置对控制点进行 5 000 次成像测量。计算得到残留系统误差参数如图 5 所示。

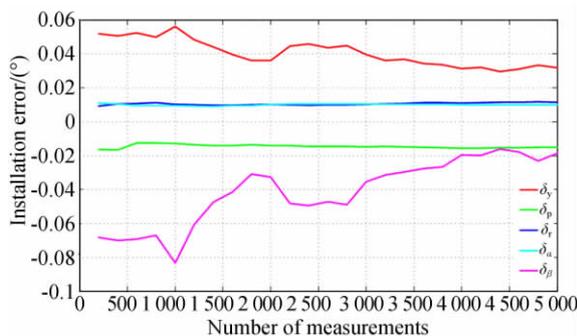


图 5 残留误差计算结果

Fig. 5 Computation results of residual errors

由图 5 可以看出,经过对控制点 4 000 次成像测量后,计算得到这 5 个安装误差分别为:组合惯导残留安装误差为航向方向 $0.031\ 2^\circ$, 俯仰方向 $-0.015\ 6^\circ$, 横滚方向 $0.011\ 1^\circ$; 相机转轴的残留安装误差为俯角镜筒转轴误差角 $0.010\ 0^\circ$, 位角摆镜误差角 $-0.019\ 6^\circ$ 。与设定的安装误差相比,计算误差为 $0.0013^\circ, -0.0003^\circ, 0.001\ 0^\circ, 0.000\ 0^\circ, -0.000\ 3^\circ$, 仅为原来残留安装误差的 1/10。实验结果表明,利用地面控制点估计残留系统误差参数的方法可以有效估计出残留系统误差。

5 飞行试验

以某远距离大倾角航空相机航拍图像为实验数据,成像距离大于 25 km,倾角大于 70° 。依据拍摄图像注释信息可获得组合惯导得出的拍照时刻的位置信息和姿态信息,相机转轴轴角传感器给出的俯角镜筒角和位角摆镜角,以及目标区域的 DEM 信息。经过计算得到目标定位结果,如图 6 所示。

图 6(a)为没有进行系统误差修正的对地目标定位算法结果,定位误差最大值为 545 m,最小值为 310 m,定位圆概率误差为 397.7 m,定位平均误差为 401.25 m。图 6(b)为修正了探测器安装误差的定位结果,定位误差最大值为 345 m,最小值为 140 m,定位圆概率误差为 224.8 m,定位平均误差为 230.8 m。图 6(c)为修正了组合惯导安装误差的定位结果,定位误差最大值为 290 m,最小值为 70 m,定位圆概率误差为 152.9 m,定位平均误差为 160.0 m。图 6(d)为修正了所有系统误差的定位结果,定位误差最大值为 200 m,最小值为 23 m,定位圆概率误差为 99.2 m,定位平均误差为 97.5 m。对比发现,修正系统误差定位方法可以提高大倾角远距离成像定位结果,定位误差从平均值 401.25 m 降到 97.5 m,满足实际工程要求。

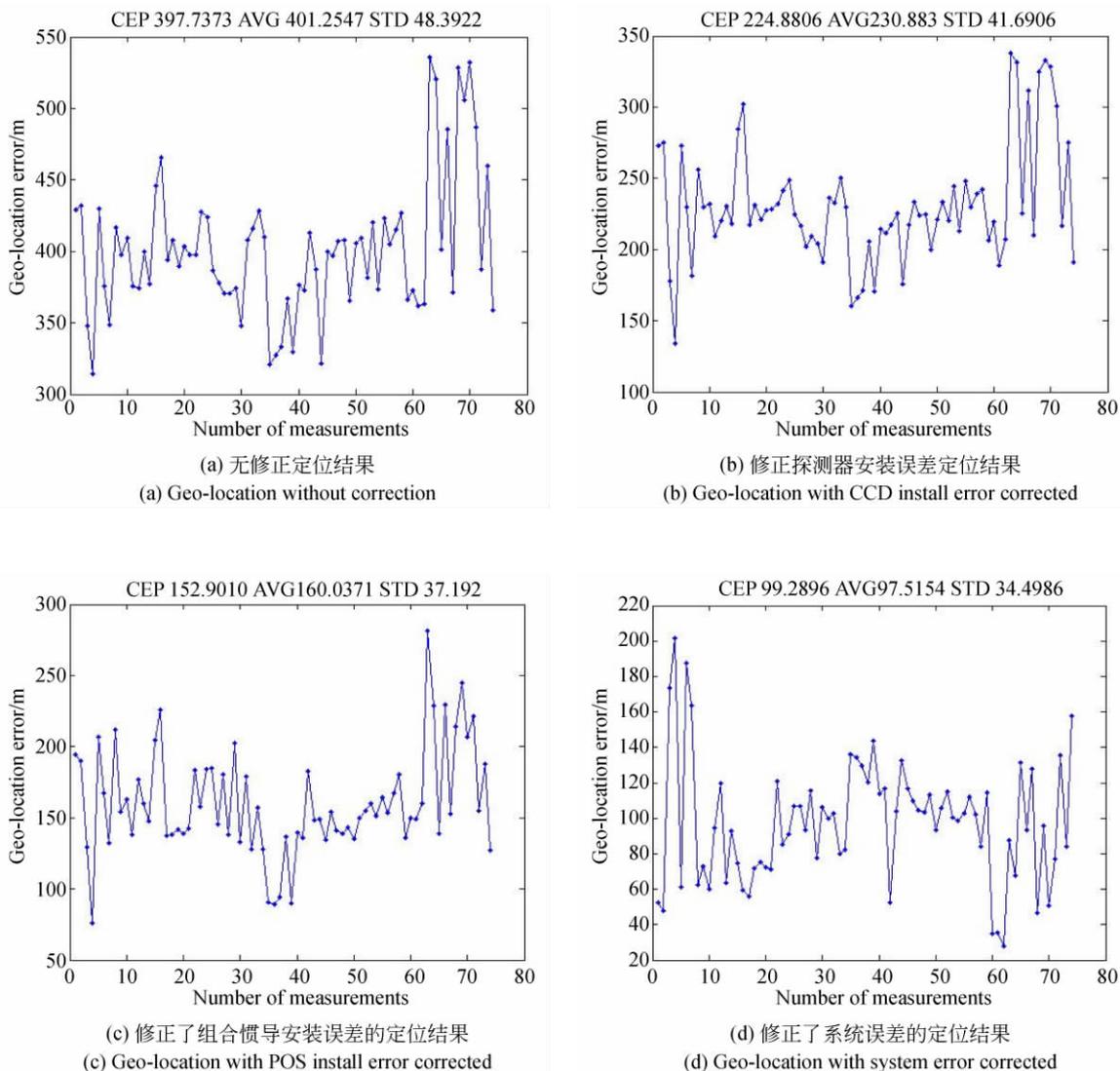


图 6 飞行试验定位结果

Fig. 6 Result of geo-location in flight test

6 结 论

本文通过分析大倾角远距离航空成像系统的系统误差,提出了探测器安装误差修正模型、组合惯导安装误差修正模型、相机转轴安装误差修正模型,并在此基础上提出了修正系统误

差定位方法。对无法在地面标定获得的残留系统误差参数,给出了一种依据地面控制点利用最小二乘法估计误差参数的方法。仿真实验表明,估计参数可将残余误差降至 1/10。最后进行了飞行试验,结果表明,定位误差平均值从 401 m 降低到 97 m,该方法能有效降低对地目标定位误差。

参考文献:

- [1] 檀立刚. 机载光电侦察设备目标自主定位技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
TAN L G. *Research of Target Automatic Positioning Technology in Airborne Photo-electricity Sur-*

- ver Equipment* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
[2] 展凤江, 沈宏海, 汪沛, 等. 导航信息滞后补偿实现高速无人机对地精确定位 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2506-2512.
ZHAN F J, SHEN H H, WANG P, et al.. Pre-

- cise ground target location of subsonic UAV by compensating delay of navigation information[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2506-2512. (in Chinese)
- [3] 周前飞,刘晶红,熊文卓,等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 189-203.
ZHOU Q F, LIU J H, XIONG W ZH, *et al.*. Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 189-203. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] HOSSEINPOOR H R, SAMADZADEGAN F, DADRASJAVAN F. Pricise target geolocation and tracking based on uav video imagery[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B6: 243-249.
- [6] HOSSEINPOOR H R, SAMADZADEGAN F, DADRAS JAVAN F. Pricise target geolocation based on intergeration of thermal video imagery and RTK GPS in uavs[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, XI-1-W5: 333-338.
- [7] 孙辉,李志强,张建华,等. 机载光电平台目标交会定位[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 988-996.
SUN H, LI ZH Q, ZHANG J H, *et al.*. Target localization with intersection measurement for airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 988-996. (in Chinese)
- [8] 徐诚,黄大庆,孔繁铨. 一种小型无人机无源目标定位方法及精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1115-1122.
XU CH, HUANG D Q, KONG F Q. Small UAV passive target localization approach and accuracy analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(5): 1115-1122. (in Chinese)
- [9] 杨洪涛,张广栋,史魁,等. 一种基于POS系统的航空相机目标定位方法[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 96-103.
YANG H T, ZHANG G D, SHI K, *et al.*. Aerial camera geo-location method based on POS system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 96-103. (in Chinese)
- [10] HELGESEN H H, LEIRA F S, JOHANSEN T A, *et al.*. Detection and tracking of floating objects using a UAV with thermal camera [C]. *Springer International Publishing AG* 2017, 2017: 289-316.
- [11] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance[C]. 2013 *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST)*, 12-14 Nov. 2013, Waltham, MA, USA. *IEEE*, 2013: 136-140.
- [12] 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): 355-365.
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): 355-365. (in Chinese)
- [13] 乔川,丁亚林,许永森,等. 大角度倾斜成像航空相机对地目标定位[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1714-1726.
QIAO CH, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1714-1726. (in Chinese)
- [14] 李德仁,王树根,周月琴. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京:测绘出版社,2008:164-169.
LI D R, WANG SH G, ZHOU Y Q. *An Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing* [M]. Beijing: Survering and Mapping Press, 2008:164-169. (in Chinese)
- [15] 王佩军,徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
WANG P J, XU Y M. *Geo-Spatial Information Science* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 周前飞,刘晶红,王宣,等. 航空变焦距斜视成像几何畸变的自动校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2927-2942.
ZHOU Q F, LIU J H, WANG X, *et al.*. Automatic correction of geometric distortion in aerial zoom squint imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2015, 23(10): 2927-2942. (in Chinese)
- [17] 万磊, 贾平, 张叶, 等. 飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 203-209.

WAN L, JIA P, ZHANG Y, *et al.*. Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 203-209. (in Chinese)

作者简介:



李 彬(1987—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,2015年于吉林大学获得博士学位,主要从事航空成像与测量等技术的研究。E-mail: mykey008@126.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于东北大学获得硕士学位,主要从事航空相机总体设计方面的研究。E-mail: dingyl_1964@126.com