

文章编号 1004-924X(2017)07-1714-13

# 大角度倾斜成像航空相机对地目标定位

乔 川<sup>1, 2\*</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 许永森<sup>1</sup>, 修吉宏<sup>1</sup>, 杜言鲁<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对大角度倾斜成像航空相机拍摄距离远, 激光测距设备作用距离有限的问题, 提出了一种不依赖距离测量设备的直接对地目标定位算法。依据载机 POS 测量的载机位置、姿态信息以及航空相机中位置编码器测量的框架角位置信息, 利用齐次坐标变换的方法求解目标在大地坐标系下的指向, 再利用地球椭球模型和数字高程模型确定目标点的经纬度信息。采用蒙特卡洛法仿真分析载机位置姿态测量误差及相机框架角位置误差对视轴指向精度的影响, 相比于仅采用地球椭球模型的目标定位算法, 该算法有效降低了地形起伏对目标定位影响, 在目标区域地形起伏标准差大于 10 m 时, 大角度倾斜成像的定位精度明显提高。采用飞行试验数据验证了该目标定位算法的有效性, 在飞行高度 18 000 m 拍摄框架横滚角小于 63° 时, 目标定位圆概率误差小于 70 m, 可满足工程实际需要。

**关键词:**航空相机; 目标定位; 其次坐标变换; 数字高程模型; 误差分析

**中图分类号:** V443.5    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1714

## Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles

QIAO Chuan<sup>1, 2\*</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, XU Yong-sen<sup>1</sup>, XIU Ji-hong<sup>1</sup>, DU Yan-lu<sup>1, 2</sup>

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Image and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: qc\_chuan@163.com*

**Abstract:** Aiming at problems that operating range of laser ranging finder limits shooting distance of aerial camera with large inclined angles, a directly target geo-location algorithm independent of ranging equipment was proposed. Based on aircraft positions and attitude information measured by airborne Position and Orientation System (POS), as well as outer and inner gimbal angles from the encoder in the aerial camera, target to sensor vector in Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) coordinate was solved by homogeneous coordinate transformation. Then according to ellipsoidal earth model and global Digital Elevation Model (DEM), the longitude and latitude of the target were determined. The Monte Carlo method was employed for simulated analysis on influences of measurement errors of aircraft position and altitude as well as encoder on pointing accuracy of Line of Sight (LOS). Compared with the geo-location algorithm which only based on ellipsoidal earth model,

收稿日期: 2016-12-21; 修订日期: 2017-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61405192); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20140520114JH)

the algorithm effectively reduced the influence of uneven terrain on target location. When the standard deviation of uneven terrain in the target area is over 10 m, the positioning accuracy of the wide-angle inclined imaging is improved significantly. The flight test proves the feasibility of the target geo-location algorithm, in which the Circular Error Probability(CEP) of the target geo-location is smaller than 70 m when the flight height is 18 000 m and the roll angle of the photography inclination angle is less than 63°. Consequently the proposed algorithm can meet actual demands of the project.

**Key words:** aerial camera; geo-location; homogeneous coordinate transformation; digital elevation model; error analysis

## 1 引言

为满足军事侦查及科学测绘的要求,航空相机除了要进行高分辨率成像外,还要对目标进行高精度定位<sup>[1-2]</sup>。

为实现机载光电设备定位地面目标,国内外学者针对目标定位算法进行了大量研究。檀立刚、刘晶红等<sup>[3]</sup>搭建了机载光电成像测量平台,通过机载光电设备对目标的指向矢量在光电设备坐标系、载机坐标系、地理坐标系及地球坐标系下的齐次坐标变换实现对目标的定位,并给出了目标定位方程及定位误差方程。周前飞等<sup>[4]</sup>采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,实现了多个目标的实时定位。王晶等<sup>[5]</sup>针对机载光电设备的目标定位过程,提出了一种基于多因素分析的误差模型与分析方法。

目前,大部分目标定位算法基于距离测量,需要通过目标测距设备给出目标相对于机载光电设备的距离值<sup>[6-8]</sup>。王晶、徐诚、郝睿鑫等人研究了采用激光测距装置的机载光电平台目标定位,结果显示采用标准差为 0.5 m 和 5 m 的激光测距装置对 10 km 内目标的定位精度分别优于 15 m 和 20 m<sup>[9-11]</sup>。大角度倾斜成像航空相机,飞行高度为 18 000 m,可对 50 km 外的目标成像。一般激光测距装置无法满足距离要求,大型激光测距受限于体积无法应用,同时远距离的激光测距受到大气等各方面因素的影响,其测距精度会下降,从而影响对目标的定位。Eric J. Stich 等<sup>[12]</sup>提出不依赖激光测距装置,基于 WGS-84 坐标系定义的椭球模型对地面目标进行定位,但他们没有考虑目标区域的高程信息,当目标区域地形起伏很大时定位误差较大。

本文针对大角度倾斜成像航空相机拍摄距离远,激光测距设备的作用距离有限的问题,提出了一

种不依赖距离测量设备的直接对地目标定位算法。该算法依据载机 POS 测量的载机位置、姿态信息以及航空相机中位置编码器测量的框架角信息,利用齐次坐标变换法求解目标在大地坐标系下的指向,基于 WGS-84 坐标系定义的椭球模型和 NASA 提供的数字高程模型确定目标点的经纬度信息。然后,采用蒙特卡洛法仿真分析载机姿态测量误差及相机框架角位置误差对视轴指向计算精度的影响,指出框架横滚角越小定位精度越高。最后,采用飞行试验数据验证了该目标定位算法的有效性。

## 2 对地目标定位算法

目标定位即为获取拍摄图像中目标区域的地理位置信息,以便对目标区域进行有效的评估与分析。机载 POS 系统由全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和惯性测量单元(Inertial Measuring Unit, IMU)组成,集 GPS 与 IMU 各自优点于一体,在性能和可靠性上得到大幅提高,可准确地测量载机的位置和姿态信息,并在导航、武器制导、摄影测量等领域得到了广泛应用。航空相机结构如图 1 所示,相机安装在飞机上,其外框架转轴与载机横滚轴一致,初始时内框架转轴与载机俯仰轴平行,在拍摄过程中调节内外框架控制视轴指向。

### 2.1 基本坐标系变换

在目标定位过程中需要用到地球坐标系、地理坐标系、载机坐标系和相机坐标系 4 个基本的坐标系。用  $C_A^B$  表示从 A 坐标系到 B 坐标系的变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = C_A^B \times \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix}, C_B^A = (C_A^B)^{-1}, \quad (1)$$

其中:  $[x_A \ y_A \ z_A]^T$  和  $[x_B \ y_B \ z_B]^T$  分别为同一点在  $A$  坐标系下和  $B$  坐标系下的坐标。

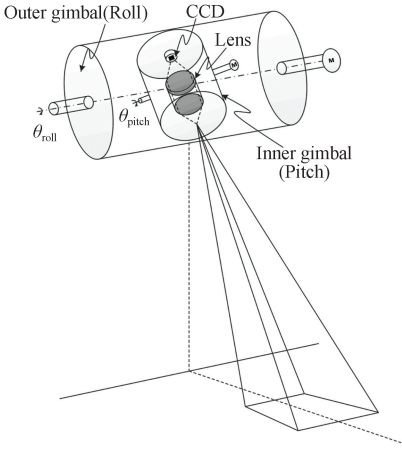


图 1 航空相机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerial camera

根据 WGS-84 坐标系定义的地球椭圆模型, 建立地球坐标系 (ECEF)  $E-X_E Y_E Z_E$ , 如图 2 所示。

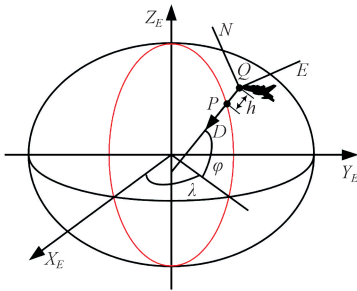


图 2 地球椭球坐标系与地理坐标系

Fig. 2 Schematic of ECEF coordinate and NED coordinate

原点处于地球质心,  $EX_E$  轴指向本初子午线与赤道的交点,  $EZ_E$  轴指向地理北极,  $EY_E$  与其他两轴组成右手坐标系。其中 WGS-84 定义的地

$$C_{ECEF}^{NED} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_N + h_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin \varphi_A & 0 & \cos \varphi_A & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\cos \varphi_A & 0 & -\sin \varphi_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \lambda_A & \sin \lambda_A & 0 & 0 \\ -\sin \lambda_A & \cos \lambda_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_N e^2 \sin \varphi_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

载机坐标系<sup>[14-15]</sup>的  $AX_A$  和  $AY_A$  坐标轴分别指向载机机头和右翼方向,  $AZ_A$  在载机纵向对称

球椭球模型<sup>[13]</sup>可表述为:

$$\frac{x_E^2}{R_E^2} + \frac{y_E^2}{R_E^2} + \frac{z_E^2}{R_P^2} = 1. \quad (2)$$

地球椭球第一偏心率为:

$$e = \frac{\sqrt{R_E^2 - R_P^2}}{R_E}, \quad (3)$$

其中: 半长轴  $R_E = 6\ 378\ 137$  m, 半短轴  $R_P = 6\ 356\ 752$  m。

POS 给出载机的位置信息包括经度信息  $\lambda_A$ , 纬度信息  $\varphi_A$  和大地高信息  $h_A$ 。则根据几何关系不难算出载机在地球坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_A^E \\ y_A^E \\ z_A^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + h_A) \cos \varphi_A \cos \lambda_A \\ (R_N + h_A) \cos \varphi_A \sin \lambda_A \\ (R_N (1 - e^2) + h_A) \sin \varphi_A \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $R_N = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_A}}$ , 为载机对应卯酉圈的曲率半径。

建立地理坐标系 (NED)  $A-NED$  和载机坐标系 (AC)  $A-X_A Y_A Z_A$ , 如图 3 所示。

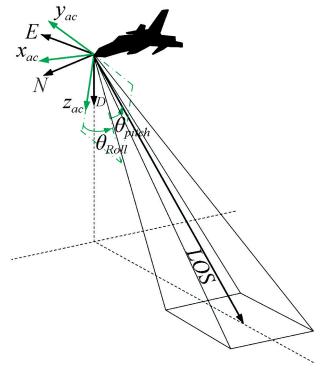


图 3 地理坐标系和载机坐标系示意图

Fig. 3 Schematic of NED and AC coordinates

地理坐标系  $AN$  和  $AE$  坐标轴分别指向正北和正东,  $AD$  轴垂直当地参考椭球的切线指向地心, 则变换矩阵为:

面内垂直载机向下。在航空相机拍摄过程中, 载机姿态分别为航向角  $\psi$ , 俯仰角  $\theta$ , 横滚角  $\varphi$ , 则:

$$C_{NED}^{AC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

相机坐标系(S) $S-X_S Y_S Z_S$ 如图4所示,原点处于航空相机的光学系统中心, $SZ_S$ 轴为视轴方向,当相机内外框架角均为0时,相机坐标系与载机坐标系完全重合。

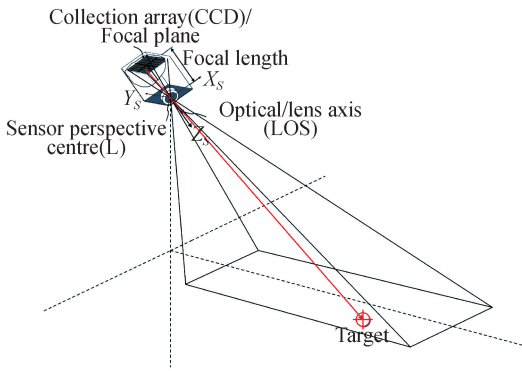


图 4 相机坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of camera coordinate

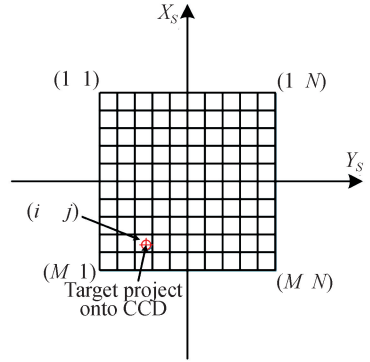


图 5 目标在 CCD 上的投影示意图

Fig. 5 Schematic of target projection in CCD

则 CCD 上的目标投影在地球坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_T^E \\ y_T^E \\ z_T^E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T^E \\ y_T^E \\ z_T^E \\ 1 \end{bmatrix} = C_{NED}^{REF} \times C_{AC}^{NED} \times C_S^{AC} \times \begin{bmatrix} T_S' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

相机坐标系原点与载机坐标系原点重合,所以其原点坐标为  $O_E = [x_S^E \ y_S^E \ z_S^E]^T$ 。

则目标在地球坐标系下的坐标  $[x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$  满足:

$$\frac{x_T^E - x_S^E}{x_T^E - x_S^E} = \frac{y_T^E - y_S^E}{y_T^E - y_S^E} = \frac{z_T^E - z_S^E}{z_T^E - z_S^E}. \quad (10)$$

若目标大地高为  $h_T$  则有:

$$\frac{(x_T^E)^2}{(R_E + h_T)^2} + \frac{(y_T^E)^2}{(R_E + h_T)^2} + \frac{(z_T^E)^2}{(R_P + h_T)^2} = 1. \quad (11)$$

联立式(10)和式(11)即可解得目标在地球坐标系下的坐标  $[x_T^E \ y_T^E \ z_T^E]^T$ 。

目标的经纬度信息通过其在大地坐标系下的坐标得到,由于采用 WGS-84 给出的地球椭球模型,所以得到的其纬度及大地高信息不准确。为此采用迭代法进行求解。规定北半球纬度为正,南半球纬度为负;东半球经度为正,西半球经度为负。迭代公式如下:

拍摄时相机的外框架角和内框架角分别为  $\theta_{roll}$  和  $\theta_{pitch}$ ,则有:

$$C_{AC}^S = \begin{bmatrix} \cos \theta_{pitch} & 0 & -\sin \theta_{pitch} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_{pitch} & 0 & \cos \theta_{pitch} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{roll} & \sin \theta_{roll} & 0 \\ 0 & -\sin \theta_{roll} & \cos \theta_{roll} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

### 2.2 基于地球椭球模型的对地目标定位

拍摄时 Target 为目标位置,它在 CCD 上的投影如图 5 所示。若 CCD 像元尺寸为  $a$ ,像元个数为  $M \times N$ ,目标在 CCD 上的投影点在  $(i \ j)$  像元内,则目标投影位置在相机坐标系下的坐标为:

$$T_S' = \left[ a \times \left( \frac{M+1}{2} - i \right) \quad a \times \left( j - \frac{N+1}{2} \right) \quad -f \right]^T. \quad (8)$$

对于理想光学系统成像,目标处于  $T_S$  与相机坐标系原点连线的延长线上。

$$\begin{cases} N_0 = R_E \\ h_0 = [(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2 + (z_T^E)^2]^{\frac{1}{2}} - (R_E R_p)^{\frac{1}{2}} \\ \varphi_0 = \arctan \left[ \frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left( 1 - \frac{e^2 N_0}{(N_0 + h_0)} \right) - 1 \right] \end{cases} \quad \begin{cases} N_i = R_E (1 - e^2 \sin^2 \varphi_{i-1})^{\frac{1}{2}} \\ h_i = \frac{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}}{\cos \varphi_{i-1}} - N_i \\ \varphi_i = \arctan \left[ \frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left( 1 - \frac{e^2 N_i}{(N_i + H_i)} \right)^{-1} \right] \end{cases} \quad (12)$$

一般迭代 4 次,即可保证目标大地高  $h_T$  的计算精度为 0.001 m 和目标纬度  $\varphi_T$  的计算精度为 0.000 01"。目标经度信息为:

$$\lambda = \arctan \left( \frac{y_T^E}{x_T^E} \right), \quad (13)$$

其中:当  $x_T^E > 0$  时,  $\lambda_T = \lambda$ ; 当  $x_T^E < 0$  且  $\lambda < 0$  时,  $\lambda_T = \lambda + \pi$ ; 当  $x_T^E < 0$  且  $\lambda > 0$  时,  $\lambda_T = \lambda - \pi$ 。

目标定位算法的具体流程如图 6 所示。

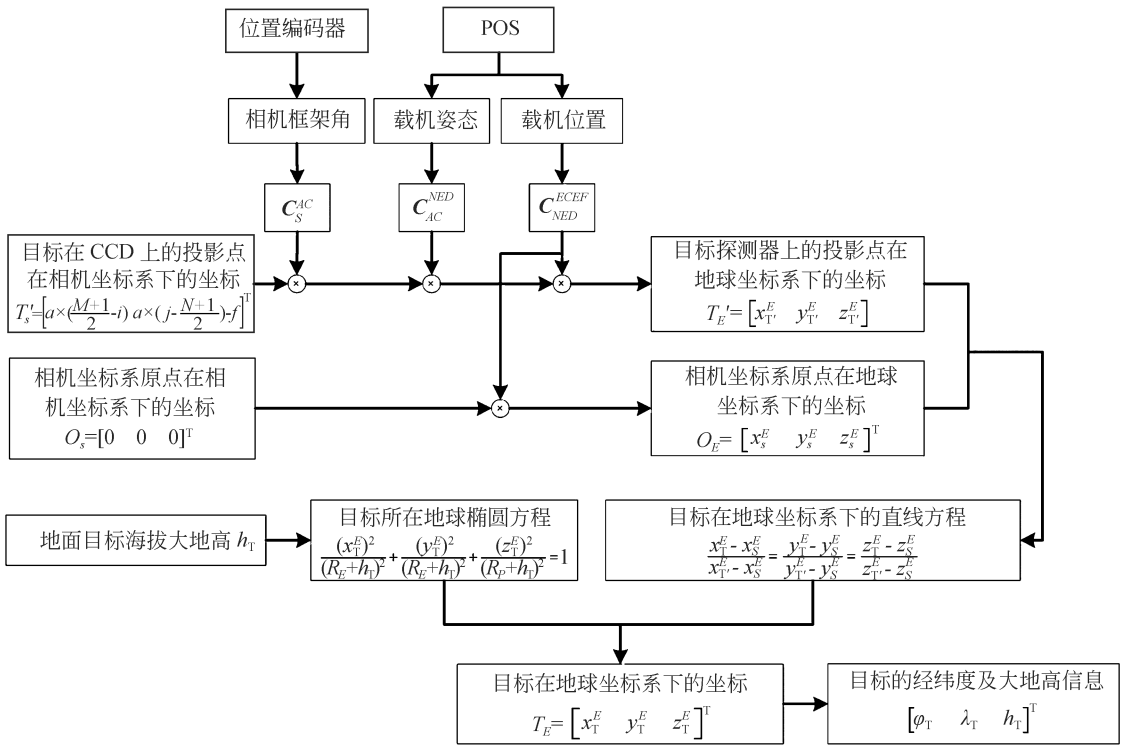


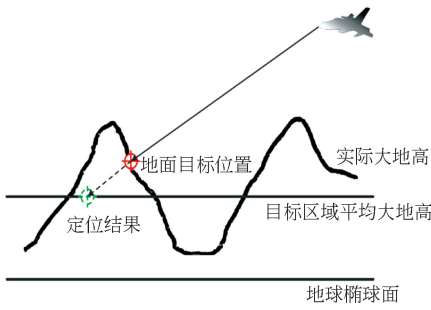
图 6 目标定位算法框图

Fig. 6 Flow chart of target geo-location algorithms

### 2.3 基于 ASTER-GDEM 的对地目标定位

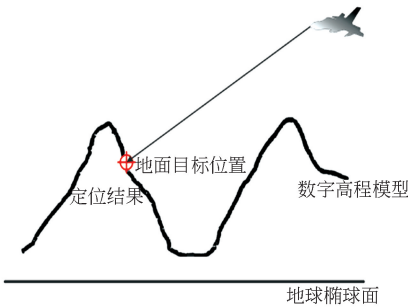
基于 WGS-84 地球椭圆的地面目标定位算法认为整个目标区域的大地高相同,并没有考虑到目标区域的高程信息变化,所以这种算法对于地形起伏明显的区域定位精度较低。山地地区目标的定位示意图如图 7 所示。目标实际处于实线位置,若只采用地球椭球模型进行定位,结果如图 7(a)所示,由于目标区域地形起伏明显,目标的定位结果位于虚线位置,产生了很

大的偏差。为解决这一问题,本文在定位过程中采用数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 作为目标区域的高程信息。这里采用由美国航空航天局 (NASA) 与日本经济产业省 (METI) 共同推出的星载热发射仪和反射辐射仪全球数字高程模型 (Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER GDEM)。该数据的覆盖范围为北纬 83°到南纬



(a) 基于地球椭球模型

(a) Based on WGS-84 model



(b) 基于数字高程模型

(b) Based on DEM model

图 7 山地地区目标定位示意图

Fig. 7 Scheme of target geo-location in mountainous regions

83°之间的所有陆地区域,覆盖了地球陆地表面的 99%,比以往任何地形图都广泛,其空间分辨率为 1" (约 30 m)<sup>[16-19]</sup>。采用 DEM 获取目标区域的高程信息,定位示意图如图 7(b)所示,可降低目标区域地形起伏对定位精度的影响。

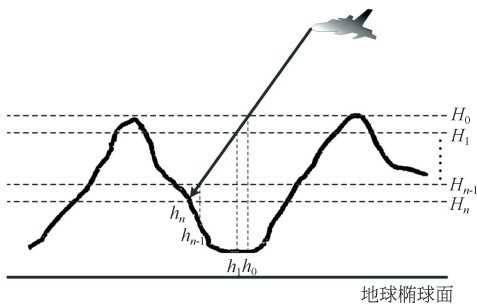


图 8 基于数字高程模型对地目标定位算法示意图

Fig. 8 Diagram of target geo-location by DEM algorithms

DEM 对地目标定位示意图如图 8 所示。取目标区域的最高大地高  $H_{max}$  为初始值  $H_0$ ,利用

2.2 节定位算法对目标进行定位,得到目标的经纬度  $[\varphi_0 \ \lambda_0]$ 。根据 DEM 获得此点对应的大地高为  $h_0$ ,若  $H_0 - h_0 > 0$ ,则取  $H_1 = H_0 - \epsilon_h$ ;继续进行定位,迭代  $n$  次后直至出现  $H_n - h_n < 0$  为止,得到目标的位置信息  $[\varphi_n \ \lambda_n \ h_n]$ 。

数字高程地图经过插值后,目标区域的大地高是连续变化的;同时  $H$  在迭代过程中始终单调递减,在经过有限迭代步骤后必然出现  $H_n - h_n < 0$ ,所以不会出现由于误差导致迭代过程发散的情况,由此保证迭代算法始终有效。

迭代法可以将目标定位的大地高误差控制在  $\epsilon_h$  以内,从而大大降低了目标区域地形起伏对目标定位精度的影响。

具体的迭代算法过程如图 9 所示。

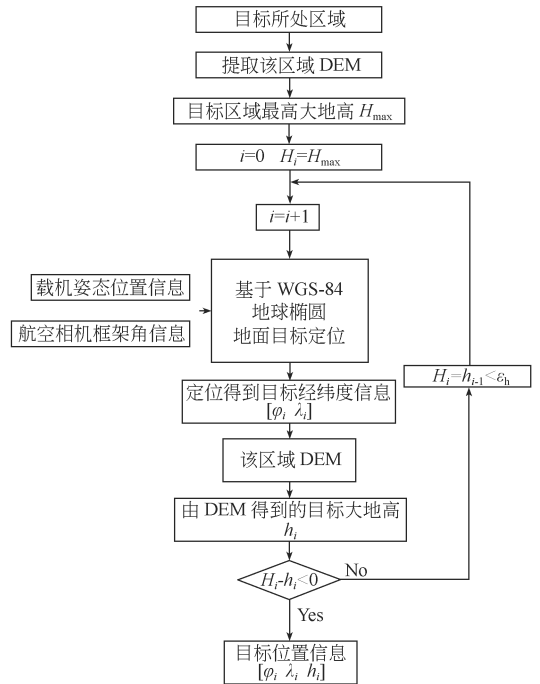


图 9 数字高程模型对地目标定位算法框图

Fig. 9 Flow chart of target geo-location by DEM algorithms

### 3 目标定位误差分析

机载 POS 系统测量出的载机位置、姿态角信息及相机编码器输出的框架角位置信息均会存在误差,它们将导致对地目标的定位误差。误差分析是衡量定位算法的重要环节,本文采用蒙特卡洛法分析地面目标的定位误差。

### 3.1 蒙特卡洛法

蒙特卡洛又称随机模拟法,通过计算机产生符合条件的随机数据,用于替代实际试验中难以获得的数据。采用蒙特卡洛法建立的误差分析模型为:

$$\Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (14)$$

式中: $\Delta y$  为函数值  $y$  的误差, $\Delta x_k$  为  $x_k$  的误差。假定误差随机变量  $\Delta x_k$  服从正态分布,其误差模型可描述为:

$$\Delta x_k = R_i \sigma_{x_k}, i=1, 2, 3, \dots, N, \quad (15)$$

其中: $R_i$  为伪随机数,服从标准正态分布; $N$  为样本空间的大小, $\sigma_{x_k}$  为参数  $x_k$  的测量标准差。

根据各参数  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的真值仿真计算函数值  $y$ ,作为误差分析中的名义值;将各参数的随机误差序列  $(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)$  加入到各个参数中;根据式(14)计算函数值误差  $\Delta y$ ,并对误差值进行统计分析。

### 3.2 对地目标定位误差分析

载机姿态位置信息、框架角位置信息及测量误差如表 1 所示。

表 1 POS 及编码器的仿真实验数据

Tab. 1 POS and encoder data in simulation program

	误差变量	名义值	标准差
载机位置	$\varphi_A / (^{\circ})$	35.48	0.0001
	$\lambda_A / (^{\circ})$	80.97	0.0001
	$h_A / m$	18 000	5
载机姿态	$\psi / (^{\circ})$	45	0.02
	$\theta / (^{\circ})$	3.5	0.01
	$\varphi / (^{\circ})$	0	0.01
框架角位置	$\theta_{roll} / (^{\circ})$	50	0.006
	$\theta_{pitch} / (^{\circ})$	-2.6	0.006

在定位过程中载机震动误差及相机安装误差等都会影响最后的定位结果。相机在装调过程中产生的成像中心位置误差和框架安装误差及载机在飞行过程中由于震动导致的减震器角震动误差如表 2 所示。

对 CCD 的中心目标进行定位,以表 1、表 2 中的参数,取  $N=5\ 000$ ,通过蒙特卡洛法进行仿真分析。

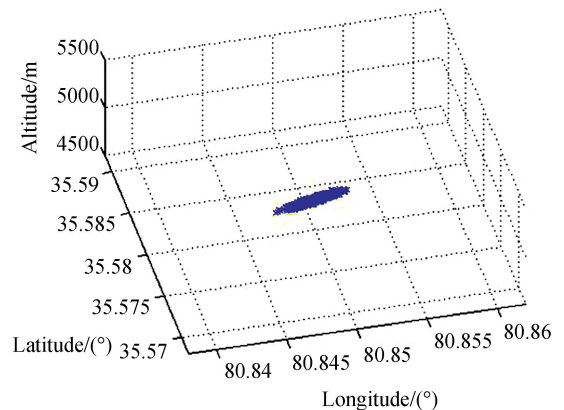
表 2 误差仿真实验数据

Tab. 2 Error data in simulation program

误差变量名称	误差分布	误差量
成像中心位置误差 ( $x$ 方向)	正态分布	$\sigma_x^S = 0.6\ \mu\text{m}$
成像中心位置误差 ( $y$ 方向)	正态分布	$\sigma_y^S = 0.6\ \mu\text{m}$
横轴差(内外框架轴 不正交误差)	正态分布	$\sigma_{\text{DE}}^{\text{RG}} = 0.001^{\circ}$
视轴照准差(视轴与 内框架轴不一致)	正态分布	$\sigma_{\text{los}}^{\text{PG}} = 0.000\ 5^{\circ}$
减震器角震动误差(偏航)	均匀分布	$(\psi_{\text{SA}})_{\text{max}} = 0.005^{\circ}$
减震器角震动误差(俯仰)	均匀分布	$(\theta_{\text{SA}})_{\text{max}} = 0.01^{\circ}$
减震器角震动误差(横滚)	均匀分布	$(\varphi_{\text{SA}})_{\text{max}} = 0.01^{\circ}$

若采用 WGS-84 的地球椭球模型进行定位,粗略计算可得目标在东经  $80.84^{\circ} \sim 80.86^{\circ}$ 、北纬  $35.57^{\circ} \sim 35.59^{\circ}$  内。此处地形起伏明显,认为其平均大地高为  $5\ 083\ \text{m}$ ,其标准差为  $62.47\ \text{m}$ 。仿真结果如图 9(a) 所示,定位目标位于北纬  $35.577\ 09^{\circ}$ ,东经  $80.849\ 18^{\circ}$ ,大地高  $5\ 083.5\ \text{m}$ 。纬度、精度和大地高的标准差分别为  $0.000\ 48^{\circ}$ 、 $0.000\ 60^{\circ}$  和  $62.3\ \text{m}$ 。但北纬  $35.578\ 40^{\circ}$ ,东经  $80.863\ 53^{\circ}$  位置的大地高为  $5\ 087.9\ \text{m}$ ,显然与定位高度  $5\ 083.5\ \text{m}$  不符。

采用 DEM 进行定位,其仿真结果如图 9(b) 所示,定位目标位于北纬  $35.577\ 04^{\circ}$ ,东经



(a) 基于地球椭球模型

(a) Based on WGS-84

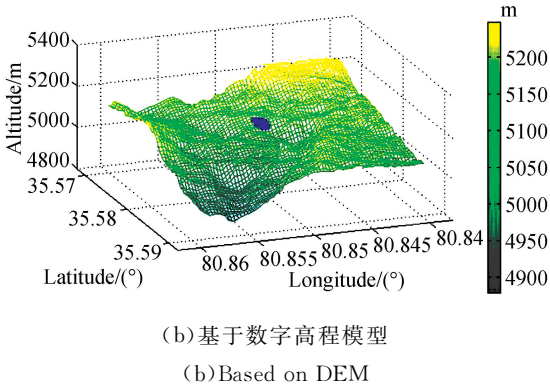


图 9 对地目标定位仿真结果

Fig. 9 Simulation results of ground target geo-location

80.849 23°,大地高 5 087.9 m。纬度、经度和大地高的标准差分别为 0.000 15°、0.000 13°和 3.58 m;且北纬 35.578 36°,东经 80.863 58°处的大地高为 5 088.6 m,与目标位置相符得很好。由此可知,用 DEM 进行定位能够明显提高定位精度。

根据 WGS-84 定义的地球椭球模型,当目标纬度为  $\varphi_T$ ,子午圈的曲率半径为:

$$R_M = \frac{R_E(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \quad (16)$$

卯酉圈的曲率半径为:

$$R_N = \frac{R_E}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (17)$$

目标定位的圆概率误差定义为:

$$\sigma_r = \sqrt{[\sigma_\lambda (R_N + h_T) \cos \varphi_T]^2 + [\sigma_\varphi (R_M + h_T)]^2} \quad (18)$$

其中  $\sigma_\lambda, \sigma_\varphi$  分别为目标定位的经度标准差和纬度标准差。

对于摆扫成像的航空相机,在外框架角从 10°摆扫到 82°时采用地球椭球模型分析对地目标定位圆概率误差,地形起伏从标准差 10~100 m 情况下的定位圆概率误差如图 10(a)所示。结果显示,对地面目标进行定位的视轴倾斜角度越大、定位精度越差,定位精度随着地形误差的增大而增大。

与地球椭球模型相比,数字地球模型的目标定位精度有明显提高。在框架横滚角小于 70°、定位圆概率误差小于 50 m 的情况下,框架横滚角达到 80°时仍能保证定位精度在 180 m 以内。

对于平原地区,地形起伏标准差小于 10 m,采用地球椭球模型与 DEM 对地目标定位与只采

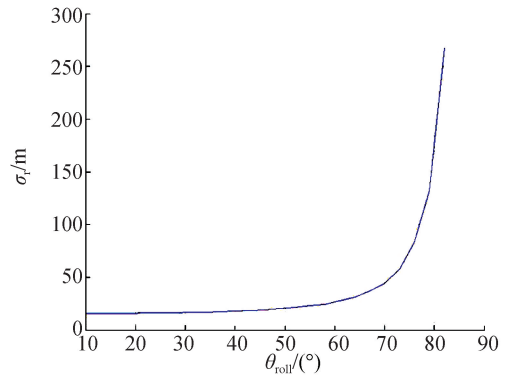
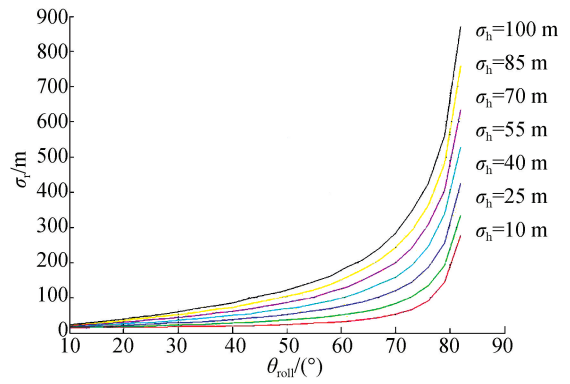


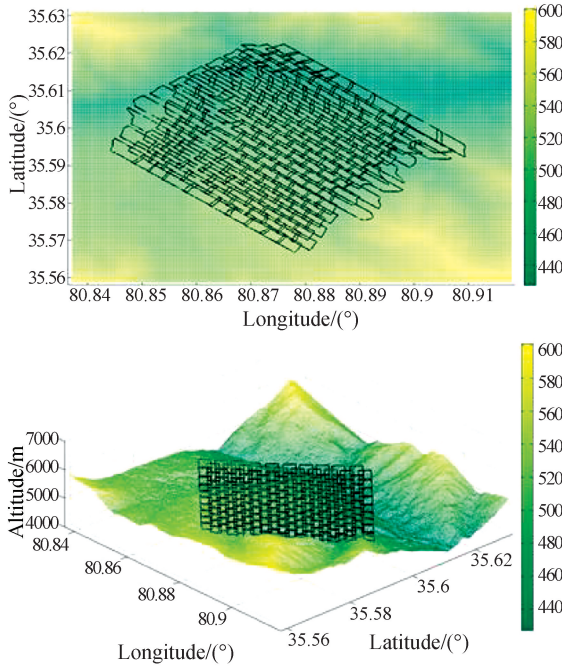
图 10 目标定位圆概率误差随摆扫角度的变化曲线  
Fig. 10 Circular Error Probability (CEP) of geo-location with different inclination angles

用地球椭球模型对地目标进行定位相比,定位精度相差不多;但对于丘陵或山地地区,地形起伏标准差大于 10 m,地球椭球模型与 DEM 的对地目标定位精度远高于地球椭球模型。

### 4 飞行试验验证

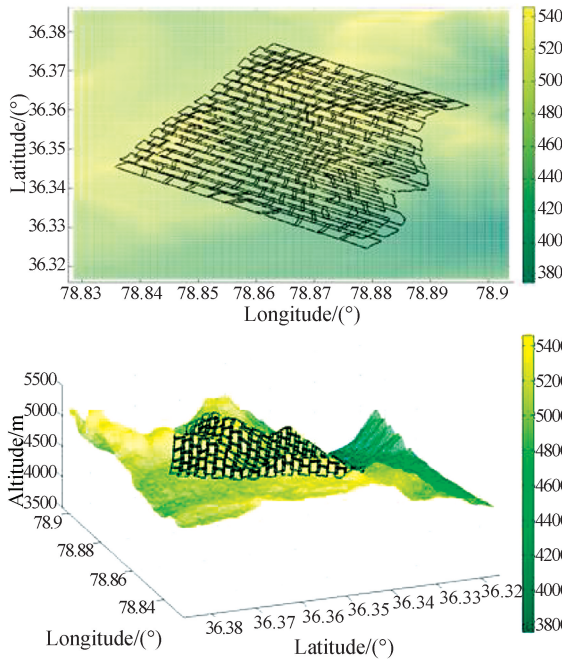
以某面阵航空相机飞行实验数据,依据拍摄图像注释信息中载机位置、姿态信息以及相机编码器测量的框架角,得到拍摄区域的经纬度信息,如图 11 所示,拍摄区域的横滚框架角在 -42°~-48°、47°~53°和 57°~63°。可以看出,由于拍摄区域的地形起伏,拍摄图像的俯视图并不是四边形,而是随着地形的起伏变化变得弯曲。选取拍摄图像中的典型目标区域进行

定位,并与谷歌地图(Google Earth,GE)中该目标点的经纬度进行比较,计算目标定位误差,统计结果如表 3~表 5 所示。



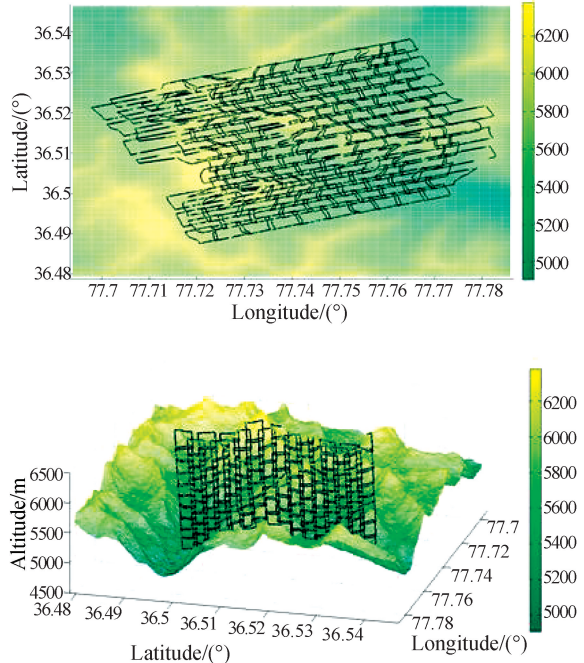
(a) 摆扫角度为  $-42^{\circ}\sim-48^{\circ}$  时的拍摄图像

(a) Photography area with roll gimbals angles from  $-42^{\circ}$  to  $-48^{\circ}$



(b) 摆扫角度为  $47^{\circ}\sim53^{\circ}$  时的拍摄图像

(b) Photography area with roll gimbals angles from  $47^{\circ}$  to  $53^{\circ}$



(c) 摆扫角度为  $57^{\circ}\sim63^{\circ}$  时的拍摄图像

(c) Photography area with roll gimbals angles from  $57^{\circ}$  to  $63^{\circ}$

图 11 不同摆扫角度下的拍摄区域

Fig. 11 Photography areas with different whisk-broom angles

由表 3~表 5 中数据可知,在相机摆扫角度为  $-42^{\circ}\sim-48^{\circ}$ ,  $47^{\circ}\sim53^{\circ}$  和  $57^{\circ}\sim63^{\circ}$  时,目标定位误差的平均值分别为 50.246, 50.485 和 59.972。可以看出相机摆扫角度增大会导致定位精度的下降,但在相机以  $-42^{\circ}\sim-48^{\circ}$  和  $47^{\circ}\sim53^{\circ}$  对地面目标区域摆扫成像时,定位精度变化不大;而以  $57^{\circ}\sim63^{\circ}$  对地面目标区域摆扫成像时定位精度明显下降。这与图 10 曲线符合得很好,定位精度明显下降。通过比较定位结果与 GE 中该目标点的经纬度可以看出,在第一次和第二次飞行实验时,定位结果全部偏向西北方向,而第三次定位结果偏向西南方向,这主要由相机安装时无法保证相机外框架转轴、内框架转轴与载机横滚轴、俯仰轴共轴引起的。因此,需对安装误差进行定标,或采用捷联惯导系统直接对航空相机的姿态进行测量,以提高定位精度。

表 3 横滚框架角为  $-42^\circ \sim -48^\circ$  时飞行实验定位结果

Tab. 3 Result of flight test with roll gibal angles from  $-42^\circ$  to  $-48^\circ$

定位点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
投影位置	row	526	988	1102	570	1776	1270	554	1048	1787	601
	col	1550	1073	362	2126	445	992	285	1068	817	1425
载机位置	$\varphi_A/(\circ)$	36.39895	36.40525	36.41013	36.41154	36.41324	36.41755	36.41925	36.42221	36.42533	36.42829
	$\lambda_A/(\circ)$	78.72927	78.73376	78.73725	78.73826	78.73947	78.74255	78.74376	78.74588	78.74810	78.75022
	$h_A/m$	17987.25	17987.46	17987.72	17987.74	17987.27	17987.68	17987.71	17987.61	17987.66	17987.83
载机姿态	$\psi/(\circ)$	30.0457	29.8919	30.0237	30.0402	30.0567	30.0347	30.0072	29.9248	29.9468	30.0237
	$\theta/(\circ)$	3.3903	3.3628	3.4013	3.3958	3.3848	3.3903	3.4068	3.3683	3.3738	3.4013
	$\varphi/(\circ)$	-0.0110	0.0000	0.0000	-0.0110	0.0000	-0.0110	0.0385	0.0385	0.0659	0.0110
框架角位置	$\theta_{roll}/(\circ)$	-45.2273	-44.5345	-47.6918	-43.8217	-47.6912	-45.9304	-45.6151	-44.2035	-44.2310	-42.7665
	$\theta_{pitch}/(\circ)$	-2.4880	-2.5270	-2.5106	-2.6094	-2.4990	-2.4373	-2.5272	-2.5040	-2.5074	-2.52749
目标定位	$\varphi_T/(\circ)$	36.33771	36.34604	36.34426	36.35460	36.34735	36.35795	36.35931	36.36683	36.37026	36.37374
	$\lambda_T/(\circ)$	78.85769	78.85957	78.87606	78.85743	78.87992	78.86954	78.86936	78.86386	78.86701	78.86534
目标位置	$\varphi_T/(\circ)$	36.33810	36.34641	36.34462	36.35506	36.34776	36.35830	36.35973	36.36723	36.37061	36.37409
	$\lambda_T/(\circ)$	78.85800	78.85991	78.87633	78.85767	78.88014	78.86987	78.86961	78.86414	78.86735	78.86559
定位误差	$\varepsilon/m$	51.069	52.205	46.879	55.857	49.515	49.003	51.811	51.429	49.155	45.537

表 4 横滚框架角  $47^\circ \sim 53^\circ$  时飞行实验定位结果

Tab. 4 Result of flight test with roll gibal angles from  $47^\circ$  to  $53^\circ$

定位点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
目标投影位置	row	1842	2117	1251	1031	20	2014	609	345	1347	1977
	col	727	361	2308	256	1797	204	1855	323	1278	1445
载机位置	$\varphi_A/(\circ)$	35.48256	35.48959	35.49093	35.49186	35.49222	35.49473	35.49626	35.49742	35.49742	35.49766
	$\lambda_A/(\circ)$	80.98314	80.99173	80.99337	80.99451	80.99495	80.99802	80.99988	81.00131	81.00131	81.00160
	$h_A/m$	17987.16	17987.23	17987.83	17987.08	17987.96	17987.82	17987.40	17987.26	17987.87	17987.14
载机姿态	$\psi/(\circ)$	45.0677	44.8919	44.9413	44.9523	44.9798	45.0347	45.0512	45.0677	45.0677	45.0622
	$\theta/(\circ)$	3.7848	3.7628	3.7738	3.7793	3.7958	3.7903	3.7848	3.7848	3.7848	3.7848
	$\varphi/(\circ)$	-0.0110	0.0000	0.0549	0.0659	0.0769	0.0000	0.0000	-0.0275	-0.0275	-0.0110
框架角位置	$\theta_{roll}/(\circ)$	48.4836	48.1411	51.9420	52.9940	48.7681	50.9527	51.2923	50.9800	50.9800	48.1528
	$\theta_{pitch}/(\circ)$	-2.5601	-2.6650	-2.4856	-2.2734	-2.6284	-2.4513	-2.5057	-2.4477	-2.4477	-2.6775
目标定位	$\varphi_T/(\circ)$	35.57386	35.58095	35.59935	35.60244	35.58595	35.59637	35.59988	35.59808	35.60032	35.59148
	$\lambda_T/(\circ)$	80.87258	80.88040	80.85938	80.85862	80.87720	80.87504	80.87121	80.87645	80.87554	80.88759

续 表

目标位置	$\varphi_T/(\circ)$	35.57422	35.58131	35.59959	35.60277	35.58621	35.59671	35.60021	35.59836	35.60062	35.59184
	$\lambda_T/(\circ)$	80.87296	80.88070	80.85981	80.85901	80.87764	80.87538	80.87167	80.87684	80.87595	80.88802
定位误差	$\epsilon/m$	52.334	48.904	46.832	50.900	49.869	48.328	54.897	47.577	49.521	55.692

表 5 横滚框架角  $57^\circ \sim 63^\circ$  时飞行实验定位结果  
Tab. 5 Result of flight test with roll gimbal angles from  $57^\circ$  to  $63^\circ$

定位点编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
目标投影位置	row	2050	471	447	136	2154	11	2088	1547	1534	1959
	col	1366	948	1151	1972	1617	2006	1335	202	1693	493
载机位置	$\varphi_A/(\circ)$	36.55156	36.55374	36.56069	36.56109	36.56278	36.57450	36.57499	36.57692	36.57708	36.58218
	$\lambda_A/(\circ)$	77.98182	77.98110	77.97879	77.97866	77.97810	77.97420	77.97404	77.97340	77.97335	77.97165
	$h_A/m$	18012.51	18012.15	18012.50	18012.15	18012.56	18012.99	18012.50	18012.25	18012.63	18012.48
载机姿态	$\psi/(\circ)$	-14.9763	-15.0038	-15.0807	-15.0587	-15.0477	-14.9433	-14.9543	-14.9598	-14.9653	-15.0532
	$\theta/(\circ)$	4.1013	4.0958	4.0683	4.0683	4.0793	4.0848	4.0903	4.0958	4.0903	4.0738
	$\varphi/(\circ)$	0.0110	0.0659	0.0385	0.0604	0.0659	0.0055	-0.0055	-0.0110	-0.0110	0.0659
框架角位置	$\theta_{roll}/(\circ)$	61.2829	60.1862	59.1412	62.6412	62.9928	57.0610	61.2991	62.3685	60.9647	57.3777
	$\theta_{pitch}/(\circ)$	-2.1004	-2.1150	-2.1550	-2.0400	-1.8507	-2.2234	-2.0969	-1.9219	-2.0476	-2.3617
目标定位	$\varphi_T/(\circ)$	36.49948	36.50140	36.51053	36.50335	36.50864	36.52717	36.52290	36.52358	36.52504	36.53665
	$\lambda_T/(\circ)$	77.73848	77.74621	77.75490	77.72483	77.72331	77.76263	77.73003	77.72463	77.73214	77.76065
目标位置	$\varphi_T/(\circ)$	36.49904	36.50095	36.51011	36.50292	36.50822	36.52672	36.52247	36.52309	36.52455	36.53620
	$\lambda_T/(\circ)$	77.73887	77.74654	77.75529	77.72518	77.72374	77.76298	77.73030	77.72508	77.73255	77.76091
定位误差	$\epsilon/m$	59.023	57.523	59.470	56.839	60.392	58.514	54.029	67.765	66.194	55.300

## 5 结 论

本文依据拍摄图像的注释信息中的航空相机内外框架角,载机的位置姿态信息,利用 WGS-48 定义的地球椭球模型和由美国航空航天局与日本经济产业省共同推出的全球 DEM,求取拍摄目标

区域的经纬度信息。然后,采用蒙特卡洛统计分析法计算视轴的定位误差,并通过实际飞行数据验证了该目标算法的有效性。该方法可以较好地消除地形对定位精度的影响,在外框架角小于  $80^\circ$  时,其定位精度小于 180 m 圆概率误差。飞行试验结果表明,拍摄时外框架角小于  $63^\circ$  时其定位误差小于 70 m,满足实际工程应用的要求。

## 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]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.  
TAN L G. *Research of Target Automatic Positio-*

- ning Technology in Airborne Photo-electricity Survey Equipment* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 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.*. Precise ground target location of subsonic UAV by compensating delay of navigation information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2506-2512. (in Chinese)
- [3] 檀立刚, 戴明, 刘晶红, 等. 机载光电测量设备目标自主定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3140.
- TAN L G, DAI M, LIU J H, *et al.*. Error analysis of target automatic positioning for airborne photoelectric measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3133-3140. (in Chinese)
- [4] 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): 0112005.
- 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): 0112005. (in Chinese)
- [5] 王晶, 高利民, 姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 388-394.
- WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 388-394. (in Chinese)
- [6] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
- WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [7] 赵滨. 基于机载光电测量系统的目标定位精度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHAO B. *Research on Positioning Technology of Target in Airborne Photo-electricity Measuring System*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [8] GUO L, ANG H S, ZHENG X M. Ground moving target geo-location from monocular camera mounted on a micro air vehicle [J]. *SPIE*, 2011, 8194: 819419.
- [9] 王晶, 杨立保, 高利民. 机载光电平台目标定位测量技术[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2009, 32(4): 531-534.
- WANG J, YANG L B, GAO L M. Target orientation measuring of airborne EO platform [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 32(4): 531-534. (in Chinese)
- [10] 徐诚, 黄大庆. 无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2265-2270.
- XU CH, HUANG D Q. Error analysis for target localization with unmanned aerial vehicle electro-optical detection platform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2265-2270. (in Chinese)
- [11] 郝睿鑫. 基于激光测距的目标定位技术的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- HAO R X. *Research on the Method of Localization of Target Based on Laser Ranging Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014. (in Chinese)
- [12] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance[C]. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, IEEE*, 2013: 136-140.
- [13] 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)
- [14] HILKERT J M. Kinematic algorithms for line-of-sight pointing and scanning using INS/GPS position and velocity information [J]. *SPIE*, 2005, 5810: 11-22.
- [15] 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)
- [16] 南希, 李爱农, 边金虎, 等. 典型山区 SRTM3 与 ASTER GDEM 数据精度对比分析——以青藏高原东麓深切河谷区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 91-98.
- NAN X, LI A N, BIAN J H, *et al.*. Comparison

of the accuracy between SRTM and ASTER GDEM over typical mountain area: A case study in the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(1): 91-98. (in Chinese)

- [17] 杨清丽, 马海云. GDEM 数据格式转换[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(10): 144-146, 150.  
 YANG Q L, MA H Y. The GDEM data format conversion [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(10): 144-146, 150. (in Chinese)
- [18] 黄平, 张行南, 徐涛, 等. 常用免费 DEM 数据质量分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 75-81.

HUANG P, ZHANG X N, XU T, *et al.*. Analysis of the suitability of commonly used DEM data [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(2): 75-81. (in Chinese)

- [19] 张弛, 葛莹, 王冲, 等. 资源三号测绘卫星 DSM 与 ASTER GDEM 精度对比分析——以高海拔山区为例[J]. 测绘工程, 2016, 25(8): 29-32, 37.  
 ZHANG CH, GE Y, WANG CH, *et al.*. Accuracy comparison between ZY-3 surveying and mapping satellite DSM and ASTER GDEM—a case of high altitude mountain areas [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016, 25(8): 29-32, 37. (in Chinese)

#### 作者简介:



乔 川(1991—),男,北京人,博士研究生,2013 年于兰州大学获得学士学位,主要从事航空相机定位方面的研究。  
 E-mail:qc\_chuan@163.com

#### 导师简介:



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