

# TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法

杜言鲁<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 许永森<sup>1</sup>, 刘志明<sup>1</sup>, 修吉宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为准确获取摄影区域地理位置信息, 针对时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)全景式航空相机未配备激光测距仪的情况, 提出一种直接对地目标定位算法。依据机载定位定向系统(POS)测量的载机位置、姿态信息以及航空相机中编码器测量的俯角、位角信息, 利用齐次坐标变换求解成像系统视轴(LOS)在地理坐标下的指向角以 WGS-84 坐标系下定义的地球椭球模型为基础, 利用地球椭球计算理论确定目标区域经纬度信息。采用蒙特卡罗方法仿真分析了载机姿态角测量误差以及相机俯角、位角误差对视轴指向角计算精度的影响; 着重分析了摄影倾斜角和目标区域地形起伏对对地目标定位精度的影响, 指出摄影倾斜角和目标区域地形起伏越小, 定位精度越高。采用飞行实验验证了该对地目标定位算法的有效性, 在飞行高度为 17750 m, 摄影倾斜角在 63°~75°范围内, 对地目标定位圆概率误差小于 212.96 m, 可满足工程实际需要。

**关键词** 遥感; 航空相机; 对地目标定位; 齐次坐标变换; 误差分析

**中图分类号** V249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0328003

## Geo-Location Algorithm for TDI-CCD Aerial Panoramic Camera

Du Yanlu<sup>1,2</sup>, Ding Yalin<sup>1</sup>, Xu Yongsen<sup>1</sup>, Liu Zhiming<sup>1</sup>, Xiu Jihong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to obtain the geographic location of photography areas accurately, the geo-location algorithm is developed for time delay integral-charge coupled device(TDI-CCD) aerial panoramic camera without the laser range finder. Using aircraft position and attitude information measured by airborne position and orientation system (POS) along with the depression angle and position angle from the encoder in aerial camera, line of sight (LOS) pointing angle in geographic coordinate is solved by homogeneous coordinate transformation. According to the WGS-84 ellipsoidal earth model, longitude and latitude location is solved with the earth ellipsoid calculation theory. The influence of aircraft attitude angle measurement error and the depression angle and position angle measurement error on line of sight pointing angle calculation accuracy is analyzed with the Monte Carlo method. The impact of photography inclination angle and topographic change of target region on geo-location precision is investigated, which shows that the precision of geo-location is higher when the photography inclination angle and topographic change of target region are smaller. The validity of the geo-location algorithm is verified by the flight test in which the plane flies at an altitude of 17750 m and the photography inclination angle ranges from 63° to 75°. The circular error probability of target geo-location is less than 212.96 m, which meets the requirement of the project.

**Key words** remote sensing; aerial camera; geo-location; homogeneous coordinate transformation; error analysis

**OCIS codes** 280.4788; 280.4991; 120.0280; 110.5200

**收稿日期:** 2016-08-02; **收到修改稿日期:** 2016-11-10

**基金项目:** 青年科学基金项目(61405192)、吉林省科技发展计划(20140520114JH)

**作者简介:** 杜言鲁(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事航空相机视轴指向与稳定成像技术方面的研究。

E-mail: yanlu08@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 丁亚林(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl\_1964@126.com

## 1 引言

航空相机作为目前获取地面目标图像的主要光电设备之一,已被广泛应用于军事侦察、地形测绘等领域。全景式航空相机采用线阵摆扫方式成像,可实现大倾斜摄影,尽可能远离目标区域,拍摄半径大幅提升,能够有效获取飞行轨迹两侧目标信息,且具有地面收容范围宽等特点<sup>[1]</sup>。获取拍摄图像中目标区域的地理位置信息对于分析战场态势、正确指挥决策具有重要意义。

为实现机载光电设备对地目标定位,国内外学者已对目标定位算法进行了大量研究,但目前大部分目标定位算法是基于距离测量,即需要通过激光测距仪测量出目标相对于光电设备的距离值<sup>[2-6]</sup>。檀立刚等<sup>[7]</sup>搭建了机载光电测量设备目标定位系统,通过目标相对光电设备的位置矢量在光电设备坐标系、载机坐标系、地理坐标系以及地球坐标系间的齐次坐标变换,构建出目标定位方程和定位误差方程。周前飞等<sup>[8]</sup>为实现同时对多个目标实时定位,建立了机载光电成像平台多目标自主定位系统。徐诚等<sup>[9-10]</sup>针对机载光电设备目标定位过程中测量误差因素繁多、分析困难等问题,提出一种基于多因素分析的误差建模与分析方法。

本文提出一种不依赖距离测量的直接对地目标定位算法,依据机载定位定向系统(POS)测量出的载机位置、姿态信息以及航空相机中编码器测量出的俯角、位角信息,求解成像系统视轴(LOS)在地理坐标系下的指向角;在考虑地球椭球模型的情况下,根据成像系统与目标间的空间几何关系求解目标区域的经纬度信息。采用蒙特卡罗方法分析了各参数测量误差对目标定位精度的影响,着重分析了摄影倾斜角、目标区域地形起伏对目标定位精度的影响,并采用实际飞行实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,以便对拍摄区域进行有效的分析与评估。机载 POS 集全球定位系统(GPS)和惯性测量单元(IMU)于一体,综合利用 GPS、IMU 各自的优势,在性能和可靠性上得到大幅度的提高,可精确地测量载机位置、姿态信息,已被广泛应用于导航、武器制导、摄影测量等领域<sup>[11]</sup>。全景式航空相机结构如图 1 所示,相机安装在飞机上,其中镜筒转轴与载机横滚轴一致,初始时反射镜转轴与载机俯仰轴平行,通过镜筒和反射镜转动调整成像系统视轴指向。相机镜筒转动实现对地面目标区域摆扫成像,通常将此子系统称为俯角系统,将镜筒转动角度定义为俯角  $\theta_{roll}$ ,由镜筒编码器精确测量;反射镜转动补偿飞行引起的前向像移,此子系统为位角系统,其中位角  $\theta_{pitch}$  为反射镜转动角度的两倍<sup>[12]</sup>。相比面阵相机,TDI-CCD 全景式航空相机为线阵摆扫相机,其每一行图像对应一组位置姿态信息,由于位置姿态信息的更新速率小于成像探测器的行频,因此需要插值近似以得到该行图像对应的位置、姿态信息。根据提供的位置和角度信息,即可求解地面目标的经纬度信息,本文将目标定位过程分为地理坐标系下视轴指向角求解和目标区域经纬度计算两个过程。

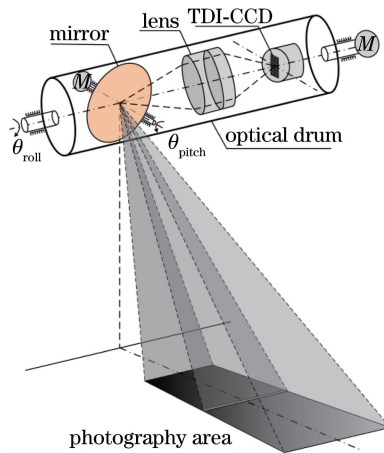


图 1 全景式航空相机结构示意图

Fig. 1 Diagram of aerial panoramic camera structure

### 2.1 地理坐标系下视轴指向角求解

为分析摆扫过程中成像系统视轴在地理坐标系下的指向角,建立了视轴指向示意图,如图 2 所示。

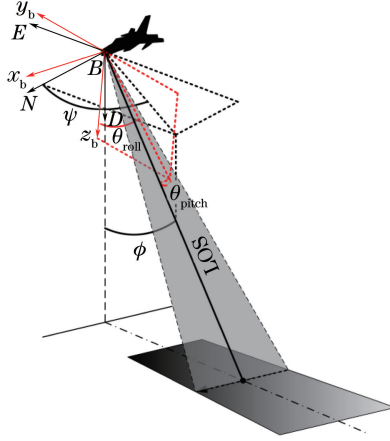


图 2 视轴指向示意图

Fig. 2 Schematic of LOS pointing

图 2 中建立了地理坐标系  $B-NED$  和载机坐标系  $B-x_b, y_b, z_b$ , 其中地理坐标系的  $BN$  轴沿当地子午线指向北,  $BE$  轴在当地水平面内且沿当地纬度线指向东,  $BD$  轴沿当地参考椭球的法线指向地心。而载机坐标系中  $Bx_b$  轴指向载机机头, 并在载机的纵向对称面内,  $By_b$  轴指向载机右翼,  $Bz_b$  轴在载机的纵向对称面内, 指向载机的下方。设摆扫成像过程中载机姿态角分别为横滚角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$ 、航向角  $\gamma$ , 成像系统视轴指向在地理坐标系下可用方位角  $\psi$ 、摄影倾斜角  $\phi$  表示, 而在载机坐标系下可用相机俯角  $\theta_{roll}$ 、位角  $\theta_{pitch}$  表示。

通过齐次坐标变换求解成像系统视轴在地理坐标系下的指向角, 首先成像系统视轴指向矢量在载机坐标系下可表示为

$$\begin{pmatrix} L_{br} \\ L_{by} \\ L_{bz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{roll} & -\sin \theta_{roll} \\ 0 & \sin \theta_{roll} & \cos \theta_{roll} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{pitch} & 0 & \sin \theta_{pitch} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{pitch} & 0 & \cos \theta_{pitch} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

视轴指向矢量在地理坐标系下表示为

$$\begin{pmatrix} L_N \\ L_E \\ L_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{br} \\ L_{by} \\ L_{bz} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

整理后得

$$\begin{pmatrix} L_N \\ L_E \\ L_D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta \sin \theta_{pitch} - (\cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha) \sin \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} + \\ (\cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha) \cos \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} \\ \sin \gamma \cos \beta \sin \theta_{pitch} - (\sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha) \sin \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} + \\ (\sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha) \cos \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} - \\ \sin \beta \sin \theta_{pitch} - \cos \beta \sin \alpha \sin \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} + \cos \beta \cos \alpha \cos \theta_{roll} \cos \theta_{pitch} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

成像系统视轴在地理坐标系下的方位角  $\psi$ 、摄影倾斜角  $\phi$  可分别写为

$$\psi = 2 \arctan \left( \frac{L_E}{L_N + \sqrt{L_N^2 + L_E^2}} \right), \quad (4)$$

$$\phi = \arccos(L_D). \quad (5)$$

### 2.2 目标区域经纬度计算

已知视轴指向矢量在地理坐标系下的方位角和摄影倾斜角, 根据机载 POS 测量出载机位置信息以 WGS-84 坐标系下定义的地球椭球模型为基础, 利用地球椭球计算理论, 求解地面目标区域的经纬度信息。为此建立了地球坐标系  $O-x_e, y_e, z_e$ , 原点  $O$  在地球质心,  $Ox_e$  轴指向本初子午面与赤道面的交线,  $Oz_e$  轴与

地球自转轴重合,  $Oy_e$  轴与其他两轴组成右手直角坐标系, 如图 3 所示。其中 WGS-84 坐标系所定义地球椭球模型<sup>[13]</sup>可表示为

$$\frac{x_e^2 + y_e^2}{R_e^2} + \frac{z_e^2}{R_p^2} = 1, \quad (6)$$

式中地球长半轴  $R_e$  为

$$R_e = 6378137.0000 \text{ m}, \quad (7)$$

地球短半轴  $R_p$  为

$$R_p = 6356752.3142 \text{ m}, \quad (8)$$

地球椭圆的第一偏心率  $\epsilon$  为

$$\epsilon = \frac{\sqrt{R_e^2 - R_p^2}}{R_e}, \quad (9)$$

地球椭圆的第二偏心率  $\epsilon'$  为

$$\epsilon' = \frac{\sqrt{R_e^2 - R_p^2}}{R_p}. \quad (10)$$

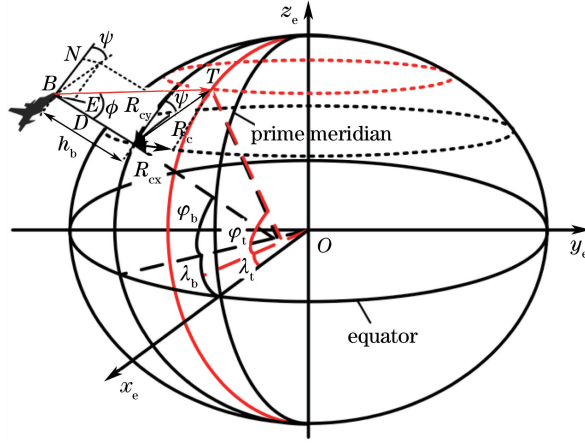


图 3 地球椭球坐标系及视轴指向示意图

Fig. 3 Schematic of ellipsoidal earth coordinate frame and LOS pointing

图 3 给出了成像系统与拍摄目标间的空间相对位置关系, 其中载机位置信息包括经度  $\lambda_b$ 、纬度  $\varphi_b$  和海拔高度  $h_b$ , 目标区域的位置信息为经度  $\lambda_t$ 、纬度  $\varphi_t$ 。根据地球椭球计算理论<sup>[14]</sup>,  $R_{cy}$  为载机对应子午圈上的弦长, 此子午圈的曲率半径为

$$R_M = \frac{R_e(1 - \epsilon^2)}{(1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_b)^{3/2}}, \quad (11)$$

$R_{cx}$  为载机对应卯酉圈上的弦长, 此卯酉圈的曲率半径为

$$R_N = \frac{R_e}{\sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_b}}, \quad (12)$$

$R_c$  是方位角  $\psi$  对应的法截弧上的弦长, 其法截弧的曲率半径为

$$R_a = \frac{R_N}{1 + \eta^2 \cos^2 \psi}, \quad (13)$$

式中

$$\eta = \epsilon' \cos \varphi_b, \quad (14)$$

$R_{cx}$ 、 $R_{cy}$  与  $R_c$  间的近似关系可分别表示为

$$R_{cx} = R_c \sin \psi, \quad (15)$$

$$R_{cy} = R_c \cos \psi. \quad (16)$$



为便于求解  $R_c$ , 将图 3 中载机与目标间的空间几何关系简化到由点  $O$ 、 $B$  和  $T$  所确定的平面中, 同时考虑目标区域地形起伏对目标定位精度的影响, 在此引入目标高度变量  $h_t$ , 如图 4 所示。

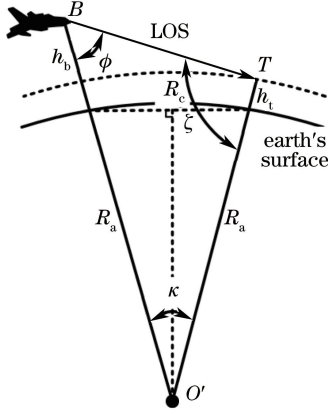


图 4 视轴在地球曲面上的投影示意图

Fig. 4 Schematic of LOS projection on curved earth

在  $\Delta O'BT$  中, 根据正弦定理可得

$$\frac{R_a + h_t}{\sin \phi} = \frac{R_a + h_b}{\sin \zeta}, \quad (17)$$

$$\zeta = 180^\circ - \arcsin\left(\frac{R_a + h_b}{R_a + h_t} \sin \phi\right), \quad (18)$$

$$\kappa = 180^\circ - \phi - \zeta. \quad (19)$$

此时可求出方位角  $\psi$  对应的法截弧上的弦长为

$$R_c = 2R_a \sin\left(\frac{\kappa}{2}\right), \quad (20)$$

地面目标的经纬度分别为

$$\lambda_t = \lambda_b + 2\arcsin\left(\frac{R_{cx}}{2R_N \cos \varphi_b}\right), \quad (21)$$

$$\varphi_t = \varphi_b + 2\arcsin\left(\frac{R_{cy}}{2R_M}\right), \quad (22)$$

将地面目标经度  $\lambda_t$ 、纬度  $\varphi_t$  写成变量  $\psi$ 、 $\phi$ 、 $\lambda_b$ 、 $\varphi_b$ 、 $h_b$ 、 $h_t$  的函数形式, 即

$$\lambda_t = \lambda_b + 2\arcsin\left[\frac{\sin \psi \sin\left(\frac{\kappa}{2}\right)}{(1 + \epsilon'^2 \cos^2 \psi \cos^2 \varphi_b) \cos \varphi_b}\right], \quad (23)$$

$$\varphi_t = \varphi_b + 2\arcsin\left[\frac{\cos \psi (1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_b) \sin\left(\frac{\kappa}{2}\right)}{(1 - \epsilon^2) (1 + \epsilon'^2 \cos^2 \psi \cos^2 \varphi_b)}\right], \quad (24)$$

式中

$$\kappa = \arcsin\left[\frac{R_c + h_b (1 + \epsilon'^2 \cos^2 \psi \cos^2 \varphi_b) \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_b}}{R_c + h_t (1 + \epsilon'^2 \cos^2 \psi \cos^2 \varphi_b) \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \varphi_b}} \sin \phi\right] - \phi. \quad (25)$$

### 3 视轴指向角误差与目标定位误差分析

机载 POS 测量出的载机位置、姿态角信息以及相机编码器输出的俯角、位角信息均存在误差, 这将导致视轴在地理坐标系下的指向角和目标定位均会存在偏差。误差分析是衡量目标定位算法的重要环节, 这里采用蒙特卡罗方法对成像系统视轴指向角误差和地面目标定位误差进行分析。

### 3.1 蒙特卡罗分析方法介绍

蒙特卡罗分析方法又称随机模拟法,通过计算机产生符合条件的随机数据,用于代替实际实验中难以获得的数据。

伯努利定理:假设随机事件 A 的发生概率为  $P(A)$ ,  $n$  次独立随机实验中,事件 A 发生的次数为  $m$ ,则对任意  $\epsilon > 0$  有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{m}{n} - P(A)\right| < \epsilon\right) = 1. \quad (26)$$

大数定理:设  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  为  $n$  个独立随机变量,均来自同一母体,且服从相同的概率分布,其方差和均值分别为  $\sigma^2$  和  $\mu$ ,对任意的  $\epsilon > 0$  有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k - \mu\right| \geq \epsilon\right) = 0. \quad (27)$$

采用蒙特卡罗法建立的误差分析模型为

$$\Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (28)$$

式中  $\Delta y$  为函数值  $y$  的误差,  $\Delta x_k (k=1, 2, 3, \dots, n)$  为参数  $x_k$  的误差,假定误差随机变量  $\Delta x_k$  均服从正态分布,其误差模型可描述为

$$\Delta x_k = R_i \sigma_{x_k}, i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (29)$$

式中  $R_i$  为由 Matlab 中 randn 函数产生的伪随机数,其服从标准正态分布,  $n$  为样本空间的大小,  $\sigma_{x_k}$  为参数  $x_k$  的测量标准差。

仿真分析的基本步骤为:首先根据各参数  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  的真值计算函数值  $y$ ,作为误差分析中的名义值;将各参数的随机误差序列  $(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n)$  附加到各参数中;根据(28)式计算函数值误差  $\Delta y$ ,并对误差值进行统计分析。

### 3.2 地理坐标系下视轴指向角误差分析

以表 1 中的参数,通过蒙特卡罗方法仿真分析地理坐标系下的视轴指向角及其误差概率分布情况,仿真结果如图 5 所示。

表 1 仿真实验数据  
Table 1 Data in simulation experiment

Symbol	Nominal value	Standard deviation
$\theta_{roll}/(^{\circ})$	45	0.006
$\theta_{pitch}/(^{\circ})$	-1.5	0.006
$\alpha /(^{\circ})$	0	0.01
$\beta /(^{\circ})$	3	0.01
$\gamma /(^{\circ})$	45	0.02

图 5 中方位角  $\psi$  的名义值为  $-44.1203^{\circ}$ ,误差平均值为  $-3.2763 \times 10^{-4}^{\circ}$ ,计算标准差  $\sigma_{\psi}$  为  $0.0240^{\circ}$ ;摄影倾斜角  $\phi$  的名义值为  $44.9871^{\circ}$ ,误差平均值为  $5.3757 \times 10^{-5}^{\circ}$ ,计算标准差  $\sigma_{\phi}$  为  $0.0115^{\circ}$ 。两者的误差分布基本服从正态分布。

对相机俯角、位角以及载机姿态角给定不同的名义值,采用蒙特卡罗统计实验法分析在不同视轴指向角下方位角和摄影倾斜角的标准差,分析结果如图 6 所示,当摄影倾斜角在  $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$  范围时,方位角计算标准差为  $0.02^{\circ} \sim 0.03^{\circ}$ ,而当摄影倾斜角在  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  范围时,方位角计算标准差为  $0.06^{\circ} \sim 0.09^{\circ}$ ,可见在方位角计算时,其标准差随摄影倾斜角的减小而增大;而摄影倾斜角计算标准差在不同的视轴指向角情况下基本不变,约为  $0.01^{\circ}$ 。

### 3.3 对地目标定位误差分析

成像系统视轴指向角计算偏差、载机位置信息误差(考虑载机飞行速度影响)以及目标区域的地形起伏均会导致计算出的目标地理位置信息存在偏差。以表 2 中的参数,采用蒙特卡罗统计实验法对目标定位误差进行分析,分析结果如图 7 所示。

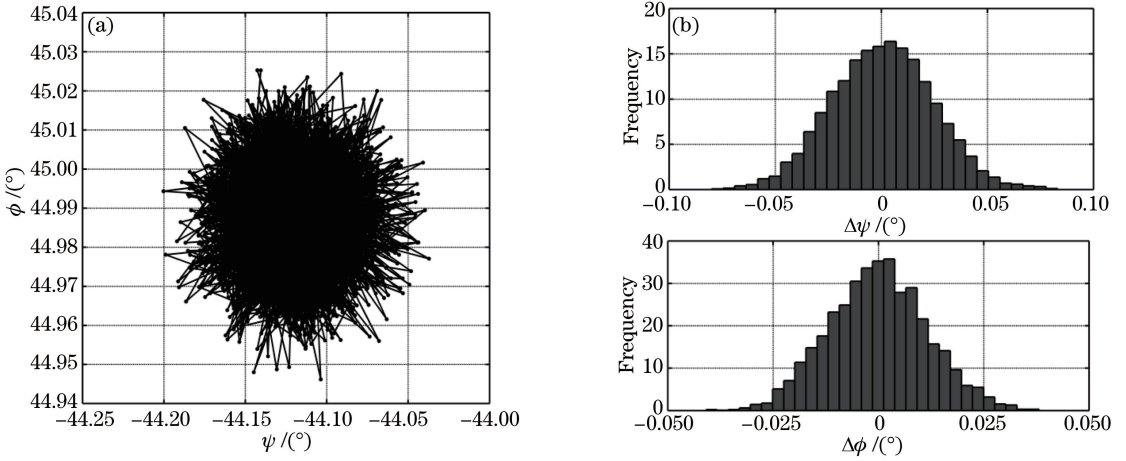


图 5 视轴指向角及其误差概率分布图。(a) 视轴指向角；(b) 误差概率分布图

Fig. 5 LOS pointing angle and its error probability distribution. (a) LOS pointing angle; (b) error probability distribution

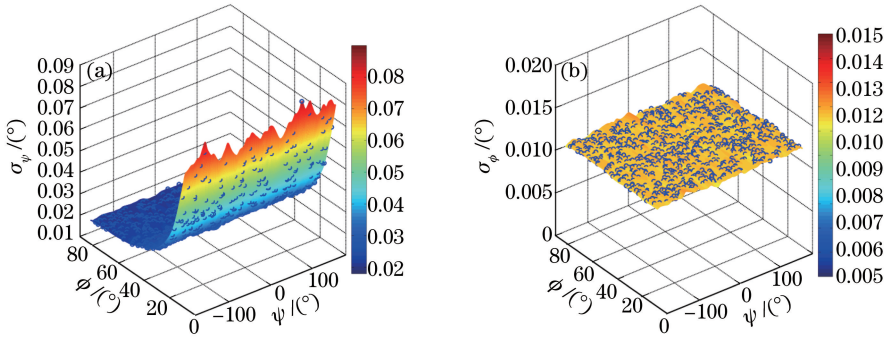


图 6 方位角和摄影倾斜角标准差。(a) 方位角标准差；(b) 摄影倾斜角标准差

Fig. 6 Standard deviation of azimuth and photography inclination angle. (a) Standard deviation of azimuth angle; (b) standard deviation of photography inclination angle

表 2 载机经度、纬度、高度信息和目标高度信息

Table 2 Longitude, latitude and altitude of aircraft and target's altitude

Symbol	Nominal value	Standard deviation
$\lambda_b / (^\circ)$	87.5163	0.0001
$\varphi_b / (^\circ)$	41.9642	0.0001
$h_b / \text{m}$	17750	5
$h_t / \text{m}$	1095	10

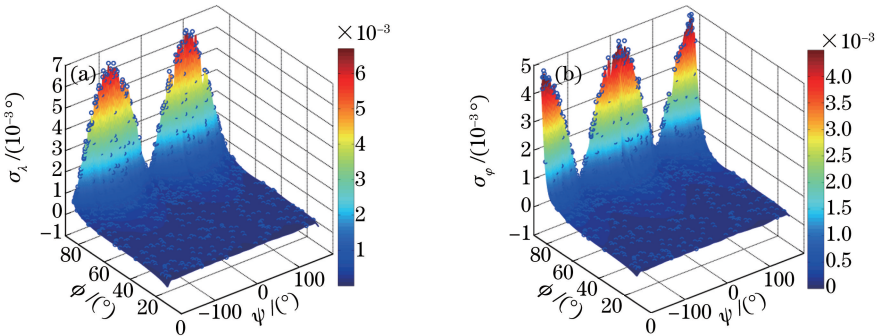


图 7 目标经度、纬度标准差。(a) 经度标准差；(b) 纬度标准差

Fig. 7 Standard deviation of target's longitude and latitude. (a) Standard deviation of target's longitude; (b) standard deviation of target's latitude

在图 7 中,目标点经度标准差  $\sigma_\lambda$ 、纬度标准差  $\sigma_\varphi$  随方位角  $\psi$  改变而变化,当方位角为  $\pm 90^\circ$  时,目标定位误差主要表现为经度误差,而当方位角为  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  时,目标定位误差主要表现为纬度误差;而且随摄影倾斜角  $\phi$  的增大,经度误差、纬度误差均增大。

定义目标定位的圆概率误差(CEP) $\sigma_t$  为

$$\sigma_t = \sqrt{(\sigma_\lambda R_N \cos \varphi_t)^2 + (\sigma_\varphi R_M)^2} \quad (30)$$

图 8 给出了在不同视轴指向角下的目标定位的圆概率误差,可见圆概率误差随摄影倾斜角的增大而变大,而当方位角变化时,目标定位的圆概率误差基本保持不变。为分析地面目标区域地形起伏误差对目标定位精度的影响,绘制了三种地形(平原、丘陵、山地)起伏<sup>[15]</sup>,地形起伏误差分别为 10,30,100 m 情况下,目标定位的圆概率误差随摄影倾斜角的变化曲线,如图 9 所示。可见在摄影区域地形起伏误差一定时,定位误差随摄影倾斜角的增大而变大;在摄影区域地形起伏误差和摄影倾斜角均较小时,该定位算法具有较高的定位精度;而在摄影倾斜角比较大时,地形起伏误差成为影响目标定位误差的主要因素<sup>[16]</sup>。

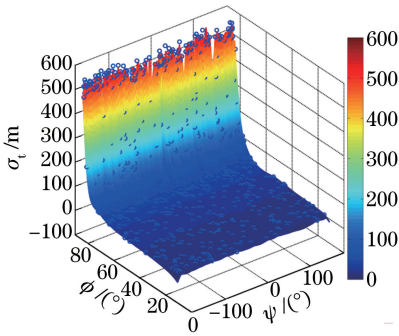


图 8 对地目标定位摄影圆概率误差  
Fig. 8 CEP of geo-location

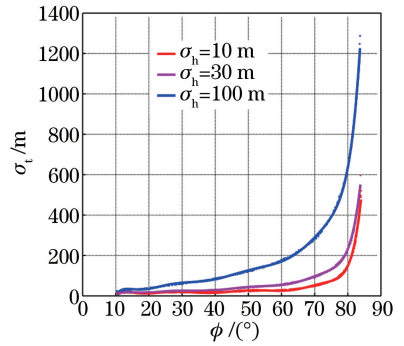


图 9 对地目标定位的圆概率误差随摄影倾斜角变化曲线  
Fig. 9 CEP of geo-location with different photography inclination angles

## 4 飞行实验验证

取某 TDI-CCD 全景式航空相机实际飞行实验数据,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俯角、位角信息,采用该目标定位算法,得到摄影区域的经纬度信息,如图 10 所示,图中绘制了 8 个摆扫条带图像对应地面拍摄区域的经纬度信息。

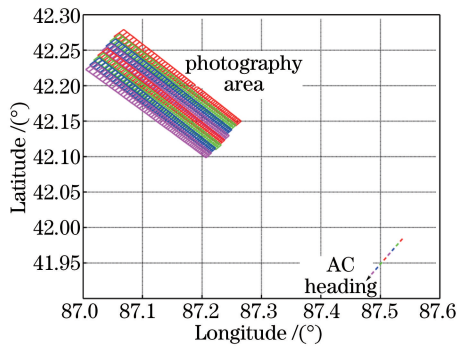


图 10 拍摄区域经纬度信息

Fig. 10 Longitude and latitude information of the photography area

选取拍摄图像中的典型目标区域,根据目标点在图像中的像素位置,计算该目标点的经纬度,并与 Google 地图中该目标点的经纬度对比,计算目标定位误差,统计结果如表 3 所示。此次拍摄时由远端向近端进行摆扫,其中远端对应的摄影倾斜角为  $75^\circ$ ,近端对应的摄影倾斜角为  $63^\circ$ ,拍摄区域为高原地形,在远端目标定位的圆概率误差约为 212.96 m,而在近端目标定位的圆概率误差约为 74.43 m,可见摄影倾斜角越大,目标定位误差越大,与仿真分析结果一致。而基于距离测量的目标定位算法<sup>[17]</sup>在相同参数情况下,目标

定位的圆概率误差约为 78.14 m,相比之下所提的算法定位误差偏大。定位误差偏大的主要原因有:1)所提的定位算法是基于拍摄目标区域的高程信息的,而摄影区域存在地形起伏,无法给出目标区域准确的高程信息,导致定位精度下降,而且摄影倾斜角越大,地形起伏对定位精度的影响越大;2)相比文献[17],本文飞行实验中相机安装时相机镜头转轴、反射镜转轴、方位轴与 POS 测量姿态角的敏感轴(横滚轴、俯仰轴、航向轴)间未严格共轴,存在角偏差,且未事先对安装角偏差进行标定,导致定位精度降低。

表 3 飞行实验结果

Table 3 Result of flight test

Sequence number	Pixel position	Calculation		Google		Geo-location CEP /m
		Longitude /( $^{\circ}$ )	Latitude /( $^{\circ}$ )	Longitude /( $^{\circ}$ )	Latitude /( $^{\circ}$ )	
1	(1349,6528)	87.06579	42.26608	87.06430	42.26452	212.96
2	(3815, 1626)	87.06982	42.25097	87.06795	42.24980	202.22
3	(13195,6312)	87.12973	42.22271	87.12816	42.22182	163.35
4	(24354,1768)	87.17071	42.18494	87.16968	42.18403	132.37
5	(24773,5778)	87.17868	42.18807	87.17765	42.18718	130.67
6	(44160,6596)	87.24265	42.14691	87.24201	42.14644	74.43

为此针对影响飞行实验定位精度的主要因素(摄影区域地形起伏、POS 测量姿态角的敏感轴与相机转轴间的安装角偏差),在飞行实验条件(飞行高度为 17750 m,摄影倾斜角范围为  $63^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,目标区域海拔高度标称值为 1090 m)下进行量化分析。

在不考虑安装角误差情况下,仅分析拍摄区域地形起伏对目标定位精度的影响。图 11 给出在不同地形起伏误差下目标定位的圆概率误差随摄影倾斜角的变化曲线。

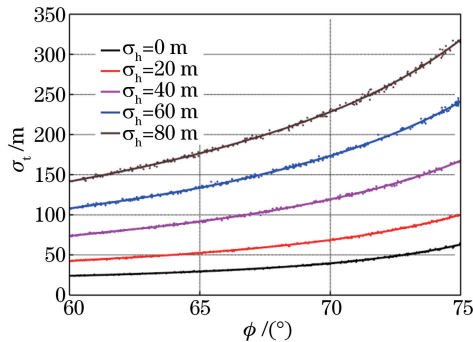


图 11 地形起伏对对地目标定位的圆概率误差的影响

Fig. 11 Influence of terrain fluctuation on CEP of geo-location

可见地形起伏误差对定位误差有很大影响,而且在同等地形起伏误差情况下,目标定位的圆概率误差随摄影倾斜角增大而变大。本次飞行实验拍摄区域为高原地形,地形起伏比较大,以地形起伏误差为 40 m 为例,在摄影倾斜角为  $75^{\circ}$ 时,相比无地形起伏情况,目标定位的圆概率误差增大 103.89 m。

在不考虑拍摄区域地形起伏情况下,仅分析 POS 测量姿态角的敏感轴与相机转轴间的安装角偏差对目标定位精度的影响。图 12 给出了分别在横滚轴、俯仰轴和航向轴方向上存在不同安装角偏差情况下,目标定位的圆概率误差随摄影倾斜角的变化曲线。在摄影倾斜角为  $75^{\circ}$ 、安装角偏差均为  $0.10^{\circ}$ 时,横滚轴、俯仰轴和航向轴方向上的安装角偏差分别使得目标定位的圆概率误差增大 401.70,8.64,66.19 m。可见在同等安装角偏差下,横滚轴方向上的安装角偏差对定位精度影响最大,其次为航向轴方向上的安装角偏差,而俯仰轴方向上的安装角偏差对定位精度影响最小。

可见拍摄区域地形起伏误差以及 POS 测量姿态角的敏感轴与相机转轴间的安装角偏差(尤其横滚轴方向上的安装角偏差)均对定位精度有很大影响。针对拍摄区域地形起伏情况,在工程中往往通过增加地面控制点,给出目标区域较为准确的高程信息,对目标点经纬度信息进行修正,以获得较高的定位精度。对于安



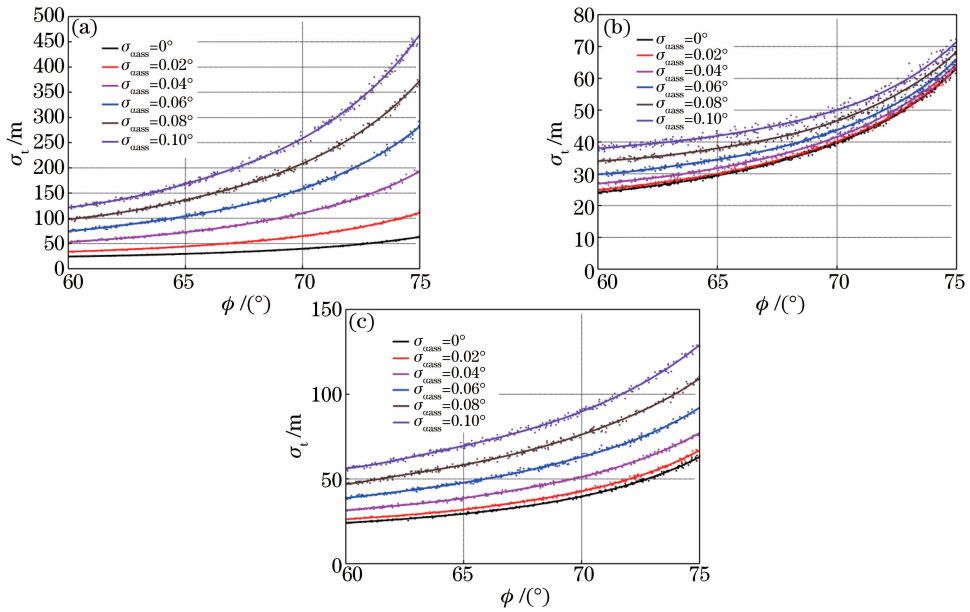


图 12 安装角偏差对目标定位的圆概率误差的影响。(a) 横滚轴方向；(b) 俯仰轴方向；(c) 航向轴方向

Fig. 12 Influence of setting angle deviation on CEP of geo-location. (a) About the roll axis; (b) about the pitch axis; (c) about the yaw axis

装角偏差(尤其是横滚轴方向上的安装角偏差),可在飞行实验时事先标定,减小安装角偏差对定位误差的影响,提高飞行实验中的定位精度。

## 5 结 论

依据拍摄图像注释信息中航空相机俯角、位角以及载机位置、姿态信息,利用地球椭球计算理论,求取拍摄目标区域的经纬度信息。采用蒙特卡罗统计分析方法对视轴指向角误差和目标定位误差进行了分析,并通过实际飞行数据验证了该目标定位算法的有效性。指出在目标区域地形起伏不大(起伏误差小于 30 m)以及摄影倾斜角小于  $60^\circ$  时,该算法具有较高的定位精度。当摄影倾斜角大于  $75^\circ$  时,定位误差主要由目标区域的地形起伏以及 POS 测量姿态角的敏感轴与相机转轴间的安装角偏差引起,此时工程中需要增加地面控制点,给出目标区域较为准确的高程信息,同时在飞行实验时事先对安装角偏差标定,以对目标点经纬度信息进行修正,获得较高的定位精度。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.* Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. *Acta Optica Sinia*, 2013, 33(7): 0711001.  
刘志明, 朱明, 陈黎, 等. 长焦距全景式航空遥感图像拖影分析及补偿抑制方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711001.
- [2] Stich E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance [C]. *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*, 2013: 136-140.
- [3] Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 105-116.  
王家骐, 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.
- [4] Hao Ruixin. Research on the method of localization of target based on laser ranging technology [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014: 12-23.  
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: 12-13.
- [5] Guo Li, Ang Haisong, Zheng Xiangming. Ground moving target geo-location from monocular camera mounted on a micro air vehicle [C]. *SPIE*, 2011, 8194: 819419.
- [6] Zhao Bin. Research on positioning technology of target in airborne photo-electricity measuring system [D]. Nanjing:



- Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 14-26.
- 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, 2011: 14-26.
- [7] Tan Ligang, Dai Ming, Liu Jinghong, *et al.* Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3133-3139.  
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): 3133-3139.
- [8] Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Xiong Wenzhuo, *et al.* Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform[J]. Acta Optica Sinia, 2015, 35(1): 0112005.  
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.
- [9] Xu Cheng, Huang Daqing. Error analysis for target location with unmanned aerial vehicle electro-optical detection platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2265-2270.  
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.
- [10] Sun Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 912-918.  
孙 辉. 机载光电平台目标定位与误差分析[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 912-918.
- [11] Li Deren, Wang Shugen, Zhou Yueqin. An introduction to photogrammetry and remote sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008: 164-169.  
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.
- [12] Zhao Jiabin, Zhang Tao, Yang Yongming, *et al.* Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera[J]. Acta Optica Sinia, 2014, 34(7): 0728003.  
赵嘉鑫, 张 涛, 杨永明, 等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728003.
- [13] Qin Yongyuan. Inertial navigation[M]. Beijing: Science Press, 2014: 171-180.  
秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 171-180.
- [14] Kong Xiangyuan, Guo Jiming, Liu Zongquan. Foundation of geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 105-118.  
孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 105-118.
- [15] Zhang Xueping. Research on key technologies of direct georeferencing in POS-supported aerial photogrammetry[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010: 33-37.  
张雪萍. POS 辅助航空摄影测量直接对地目标定位的关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010: 33-37.
- [16] Yuan Xiuxiao, Fu Jianhong, Zuo Zhengli, *et al.* Accuracy analysis of direct georeferencing by airborne position and orientation system in aerial photogrammetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(10): 847-850.  
袁修孝, 傅建红, 左正立, 等. 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(10): 847-850.
- [17] Held K J, Robinson B H. TIER II Plus airborne EO sensor LOS control and image geolocation[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1997: 377-405.