

doi:10.3788/gzxb20184704.0412001

一种基于 POS 系统的航空相机目标定位方法

杨洪涛^{1,2}, 张广栋¹, 史魁¹, 赵荣辉¹, 高波¹, 陈卫宁¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为实现对拍摄区域目标准确与快速的定位,提出一种针对仅依靠宽幅面阵航空相机进行无源目标定位的定位算法.利用与相机刚性连接的定位定向系统测量相机曝光时刻的位置与姿态信息,恢复摄影光束的空间位置.选取适当的物方坐标系,通过坐标变换建立共线方程,利用单幅相片辅以地面高程信息求解目标的大地坐标信息.分别采用全微分法与蒙特卡洛法建立误差模型并进行仿真计算.采用某相机挂飞数据验证算法的有效性,在飞行高度为 5 000 m 时,定位精度可以达到 30 m 以内,精度指标满足工程需要.

关键词:航空相机;定位定向系统;无源目标定位;坐标变换;误差分析

中图分类号:V249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0412001-8

Aerial Camera Geo-location Method Based on POS System

YANG Hong-tao^{1,2}, ZHANG Guang-dong¹, SHI Kui¹, ZHAO Rong-hui¹,
GAO Bo¹, CHEN Wei-ning¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to acquire the geographic location information of the target zone accurately and quickly, the location algorithm was developed for width area-array aerial camera processing passive target location. The paper uses camera's position and attitude information measured by position and orientation system which was rigidly connected with camera to regain beam's space position. Then paper chooses the suitable object coordinate system and builds collinearity equation by coordinate transformation to calculate the location information by single photo and target elevation information. Error model is built and simulated by total differential method and Monte-Carlo method respectively. The geo-location algorithm is verified by the flight test, when the plane flies at an altitude of 5 000 m, the location error is less than 30 m, which meets the requirement of the project.

Key words: Aerial camera; Position and orientation system; Passive target location; Coordinate transformation; Error analysis

OCIS Codes: 120.0280; 120.2830; 080.1753; 150.1135

0 引言

近年来国内外无人机行业发展飞速,在军民等各个领域迅速推广应用,取得了很好的成效.航空相机是无人机系统的重要载荷设备,成像载荷的性能直接决定着无人机系统的应用效能,随着对航空相机的应用要求逐渐提高,对高精度目标定位需求日益迫切.

以定位终端是否发射信号可以将定位分作两类:需发射信号的称为有源定位,不发信号仅靠接收信号便

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2016YFC0803001)资助

第一作者:杨洪涛(1977—),男,教授,博士,主要研究方向为航空、临近空间光电成像技术.Email:yanght@opt.ac.cn

通讯作者:张广栋(1990—),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为惯性导航、目标定位技术.Email:275916759@qq.cn

收稿日期:2017-12-18;录用日期:2018-01-04

<http://www.photon.ac.cn>

可完成定位的称作无源定位.目前国内外许多学者已经对有源定位算法进行了大量研究^[1-6],但大多数目标定位算法均为有源定位,即需要通过向外部发射信号来完成定位解算.檀立刚、刘晶红^[4-5]等对机载光电平台下的目标自主定位进行了深入的研究,通过测距机与编码器求取目标相对于平台的位置矢量,经过坐标变换,建立了目标定位模型与误差方程.周前飞等^[6]建立了机载光电成像平台多目标自主定位系统,采用了一种基于像元视线的方法,能够实现对多目标的定位.王家骥等^[7]针对光电系统目标定位模型的特点,建立了基于蒙特卡洛法的误差方程.徐诚等^[8]提出了一种基于多因素分析的误差建模方法.

随着陀螺、加速度计等惯性器件的迅速发展,由惯性器件所组成的定位定向系统(Position and Orientation System, POS)具有小型化、高精度的特点,从而使其不断得到新的应用.因此 POS 系统在目标定位方面应用日益广泛,POS 系统辅助光学相机进行定位,使得学者对无源定位研究日渐增多.张雪萍等^[9]对 POS 直接对地目标定位技术进行了分析.沈翔^[10]构建了国家坐标系下直接对地目标定位几何变形的严密模型.乔川,杜言鲁^[11-12]等依据 POS 系统提供的载机位姿信息以及相机中码盘量测的角度信息,利用地球椭球模型完成定位解算.

就目前研究情况来看,多数有源定位算法仍需要依靠测距信息^[5-6].除此之外,部分无源定位算法,还需利用机载 POS 系统辅以编码器提供曝光时刻位姿信息^[11-12].本文提出了一种基于 POS 系统的无源目标定位算法,将惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)与相机刚性连接,可以直接获得曝光时刻相机姿态信息,仅依靠 POS 系统测得的相机位置加上姿态信息与相机内方位元素,建立共线方程进行解算,利用单幅图片辅以地面高程信息即可实现目标定位.分别采用全微分法与蒙特卡洛法建立误差模型,对定位误差进行仿真验证,并采用飞行试验数据验证该算法的可行性.

1 目标定位算法

航空相机目标定位指的是利用摄影测量、图像与信息处理等技术,通过对航空相机所获取的图像信息进行数据处理与分析,求取图像中目标的准确地理位置信息的过程.转换过程中涉及到若干坐标系^[13].

1.1 坐标系定义

i 为图像坐标系,以图像左上角为坐标原点,坐标原点位于图像左上角,横轴指向图像右侧,记作 *u* 轴,纵轴指向图像下侧,记作 *v* 轴.像点像素坐标记作 (*u*, *v*),代表了像素在计算机存储器数组中的列数与行数,图像坐标系下的坐标以像素为单位.

c 为摄像机坐标系,该坐标系的原点位于图像中心,*x* 轴 *y* 轴分别与图像坐标系的 *u* 轴、*v* 轴平行,图像坐标系的坐标以像素为单位,而摄像机坐标系是以毫米为单位的物理坐标.

b 为相机机体坐标系,以相机投影中心为坐标原点,*x* 轴指向相机横轴右侧,*z* 轴沿相机立轴向上,垂直向上,*y* 轴与 *x*、*z* 轴构成右手坐标系.相机机体坐标系与 IMU 体坐标系重合.

g 为地理坐标系,通常以运载体质心为坐标原点,按照地理方向规定轴向,*x* 轴指向地理东向,*y* 轴指向地理北向,*z* 轴与 *x*、*y* 轴正交指向地理天向.通常被称作“东北天坐标系”,亦被常用为导航坐标系.

e 为地球直角坐标系,原点位于旋转椭球体中心,*z* 轴与地球自转轴重合,正向沿地球自转方向,*x* 和 *y* 轴位于赤道平面内,*x* 轴穿过本初子午线,*y* 轴穿过东经 90°子午线.用该坐标系内三维坐标 (*X_e*, *Y_e*, *Z_e*) 来表示位置.

地球球面坐标系的原点与地球直角坐标系相同,用经度、纬度、高度来表位置.

各坐标系之间的转换关系如下:

1) 地球球面坐标系与地球直角坐标系的转换

根据不同的任务需求,在实际应用中,航空相机目标定位系统需要地球球面坐标系与地球直角坐标系的相互转换^[14].

球面坐标至直接坐标的转换关系可以由解三角形表示为

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Nh} \cos L \cos \lambda \\ R_{Nh} \cos L \sin \lambda \\ [R_N(1-e^2) + h] \sin L \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R_N 为地球卯酉圈的曲率半径, e 为地球偏心率, R_{Nh} 为考虑飞行高度的地球卯酉圈的曲率半径.

地球直角坐标至地球球面坐标的转换无法直接求解, 这里给出近似闭环求解方法, 即

$$R = \sqrt{X_e^2 + Y_e^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z_e R_e}{R R_p}\right) \quad (3)$$

$$(e')^2 = \frac{R_e^2 - R_p^2}{R_p^2} \quad (4)$$

$$L = \arctan\left(\frac{Z_e + (e')^2 R_p \sin^3 \theta}{R - e^2 R_e \cos^3 \theta}\right) \quad (5)$$

$$\lambda = \arctan2(Y_e, X_e) \quad (6)$$

$$h = \frac{R}{\cos L} - \frac{R_e}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L}} \quad (7)$$

式中 R_e 为地球半长轴, R_p 为地球半短轴.

2) 地球与地理坐标系间的转换

设飞行平台所在地 S 的经纬度为 λ, L , 则 S 点的地理坐标系可由地球直角坐标系经三次基本旋转后确定出^[15], 如图 1.

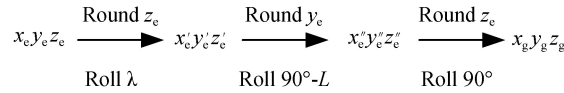


图 1 由地球直角坐标系到地理坐标系的三次旋转

Fig.1 Three rotations from earth coordinate system to geographic coordinate system

可以得到

$$C_e^g = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin L \cos \lambda & -\sin L \sin \lambda & \cos L \\ \cos L \cos \lambda & \cos L \sin \lambda & \sin L \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) 相机与地理坐标系间的转换

相机机体坐标系 b 与导航坐标系 n 之间的转换可通过一个由三个欧拉角 (θ, γ, ψ) 组成的转换矩阵来实现. 运载体欧拉角本质上是按照物理轴向定义的, 一般按照“立轴-横轴-纵轴”的方式进行, 而与具体数学轴向选择无关, 如图 2.

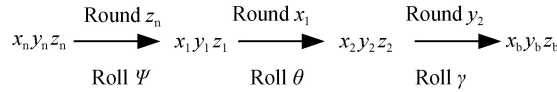


图 2 由导航坐标系到相机机体坐标系的三次旋转

Fig.2 Three rotations from navigation coordinate system to camera coordinate system

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \psi \sin \theta & -\cos \theta \sin \psi & \cos \psi \sin \gamma + \cos \gamma \sin \psi \sin \theta \\ \cos \gamma \sin \psi + \cos \psi \sin \gamma \sin \theta & \cos \psi \cos \theta & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \gamma & \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.2 目标定位模型

在执行侦查任务的过程中, 相机曝光时刻某地面目标 A 经摄影中心 S 在像片上对应的像点为 a . 在理想情况下, 地面目标 A 、摄影中心 S 和像点 a 应处于同一条直线上, 即满足共线方程条件. 中心投影的构象关系如图 3 所示.

选取原点在地球中心,各轴与导航系相互平行的坐标系为物方坐标系,再取原点位于摄影中心,各轴与导航系相互平行的坐标系为像方坐标系.设物点 A 和摄影中心 S 在物方坐标系中的坐标为 (X_A, Y_A, Z_A) 和 (X_S, Y_S, Z_S) ;地面点 A 对应的像点 a 在像方坐标系 $S-X'Y'Z'$ 下的坐标为 (X', Y', Z') ,根据相似三角形的关系,可以得到成像时刻共线方程为

$$\frac{X_A - X_S}{X'} = \frac{Y_A - Y_S}{Y'} = \frac{Z_A - Z_S}{Z'} = \lambda \quad (10)$$

式中, λ 为比例因子.

$(x, y, -f)$ 为像点 a 在像空间坐标系 $i-xyz$ 下坐标.由相机在拍摄时刻的三个姿态角通过坐标变换,可以将像点 a 在像空间坐标系下的坐标转换至像方坐标系下,坐标为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (11)$$

结合式(10)与(11)得到

$$\begin{bmatrix} X_A - X_S \\ Y_A - Y_S \\ Z_A - Z_S \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (12)$$

展开得到

$$\begin{cases} X_A - X_S = (Z_A - Z_S) \frac{C_{11}(x - x_0) + C_{12}(y - y_0) - C_{13}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - C_{33}f} \\ Y_A - Y_S = (Z_A - Z_S) \frac{C_{21}(x - x_0) + C_{22}(y - y_0) - C_{23}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - C_{33}f} \end{cases} \quad (13)$$

Z_S 减去 Z_A 为相机与目标相对高度 H' , 可得

$$\begin{cases} X_A = X_S - H' \frac{C_{11}(x - x_0) + C_{12}(y - y_0) - C_{13}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - C_{33}f} \\ Y_A = Y_S - H' \frac{C_{21}(x - x_0) + C_{22}(y - y_0) - C_{23}f}{C_{31}(x - x_0) + C_{32}(y - y_0) - C_{33}f} \\ Z_A = Z_S - H' \end{cases} \quad (14)$$

式(14)为基于共线条件方程的目标定位模型,也就是基于 POS 系统的航空相机目标定位模型.

2 目标定位误差模型

在实际工作中,机载 POS 系统与相机在进行目标定位的过程中所涉及到的所有参数均不可避免地带有误差.误差分析是衡量定位算法有效性的关键,本文分别采用全微分法与蒙特卡洛法对目标定位误差进行分析.

2.1 全微分法

在间接测量中,函数的形式主要为初等函数,且一般为多元函数,其表达式为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (15)$$

式中 x_1, x_2, \dots, x_n 为各个直接测量值, y 为间接测量值.

由高等数学可知,对于多元函数,其增量可用函数的全微分表示,则上式的函数 dy 为

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (16)$$

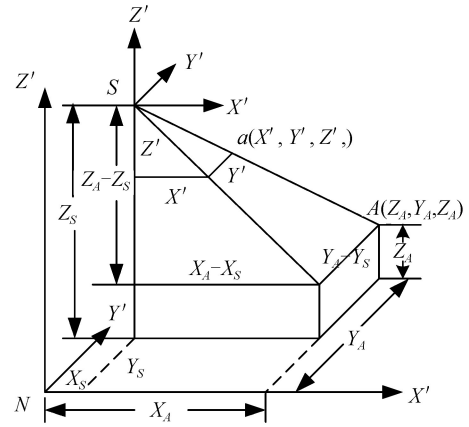


图3 中心投影的构象关系
Fig.3 The relation of central projection

已知各个直接测量值的系统误差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, 当这些误差值均为较小值时, 可以用来近似代替式 (16) 中的微分量, 从而可近似得到函数的系统误差, 记作 Δy , 即

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (17)$$

结合目标定位模型和误差合成理论, 可以得到目标在物方坐标系 X 轴向误差为

$$M_{X_A} = \left[\left(\frac{\partial X_A}{\partial X_S} \delta X_S \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial Z_S} \delta Z_S \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial Z_A} \delta Z_A \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial x} \delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial y} \delta y \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial f} \delta f \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial x_0} \delta x_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial y_0} \delta y_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial \theta} \delta \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial \gamma} \delta \gamma \right)^2 + \left(\frac{\partial X_A}{\partial \psi} \delta \psi \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

同理可得

$$M_{Y_A} = \left[\left(\frac{\partial Y_A}{\partial Y_S} \delta Y_S \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial Z_S} \delta Z_S \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial Z_A} \delta Z_A \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial x} \delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial y} \delta y \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial f} \delta f \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial x_0} \delta x_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial y_0} \delta y_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial \theta} \delta \theta \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial \gamma} \delta \gamma \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_A}{\partial \psi} \delta \psi \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$M_{Z_A} = \delta H \quad (20)$$

则目标定位的误差为

$$M_A = \sqrt{M_{X_A}^2 + M_{Y_A}^2 + M_{Z_A}^2} \quad (21)$$

2.2 蒙特卡洛法

传统的全微分方法能够进行误差分析, 但是非常复杂, 而在误差分析中采用蒙特卡洛思想, 既简单准确性又高.

在对目标定位误差进行分析时, 需要知道直接对地目标定位过程中各参数的测量值及其测量误差对定位结果的影响, 所以运用蒙特卡洛法建立误差传递模型为

$$\Delta M = G(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - G(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (22)$$

式中, x_i 为直接对地目标定位过程中各参数测量值; Δx_i 为各参数的测量误差; G 为计算过程.

在已知相机内外方位元素及目标高程的情况下, 假设目标定位误差模型为

$$[\Delta \lambda, \Delta L, \Delta H]^T = G(X + \Delta X) - G(X) \quad (23)$$

式中, λ, L, H 为目标在大地坐标系下坐标值; $\Delta \lambda, \Delta L, \Delta H$ 为目标定位结果误差; G 表示直接对地目标定位计算过程; $X, \Delta X$ 分别表示定位计算过程中的参数及其误差.

3 目标定位误差分析

根据某型号 POS 系统与相机参数, 得到仿真程序所采用数据见表 1.

表 1 定位仿真计算所采用的数据

Table 1 Data of navigation positioning simulation

Name	Symbol	Nominal value	Error
Longitude of camera	λ	108°	0.000 03°
Latitude of camera	L	34°	0.000 03°
Height of camera	h	5 345 m	5 m
Angle of pitch	θ	0°	0.008°
Angle of roll	γ	45°	0.008°
Angle of yaw	ψ	0°	0.07°
Principal point	x_0	0.056 mm	3 μ m
Principal point	y_0	0.047 mm	3 μ m
Focal distance	f	0.13 m	9 μ m
Image spot of target	X	8.3 mm	6 μ m
Image spot of target	Y	7 mm	6 μ m
Height of target	H	345 m	5 m

将表 1 参数代入全微分误差公式进行计算, 得到定位误差为 $M_{X_A} = 8.185$ m; $M_{Y_A} = 8.694$ m; $M_{Z_A} =$

$$5 \text{ m}; M_A = \sqrt{M_{XA}^2 + M_{YA}^2 + M_{ZA}^2} = 12.945 \text{ m}.$$

再以表 1 参数,采用蒙特卡洛方法对定位误差进行统计分析,结果如图 4 所示.

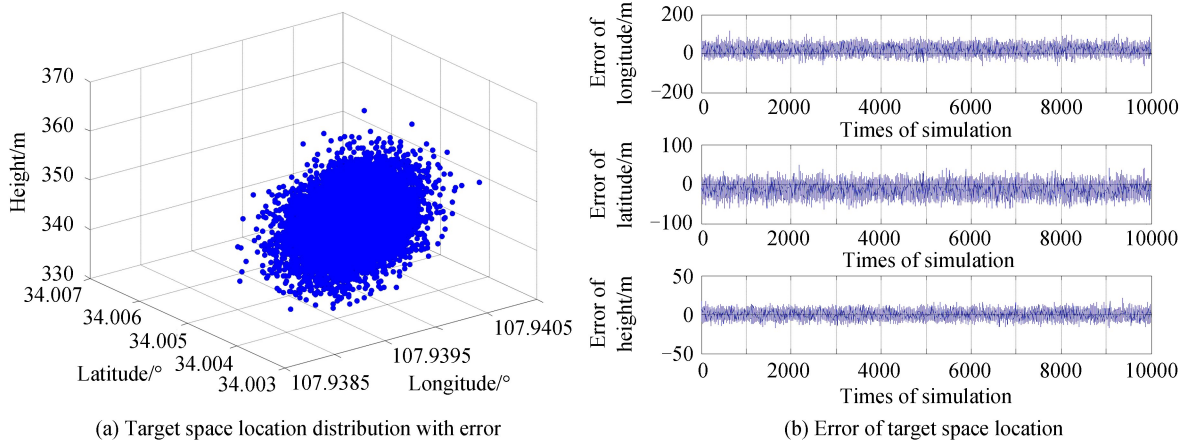


图 4 定位误差统计结果
Fig.4 Location error statistics

仿真进行 10 000 次,对其结果进行统计,得到概率分布如图 5.

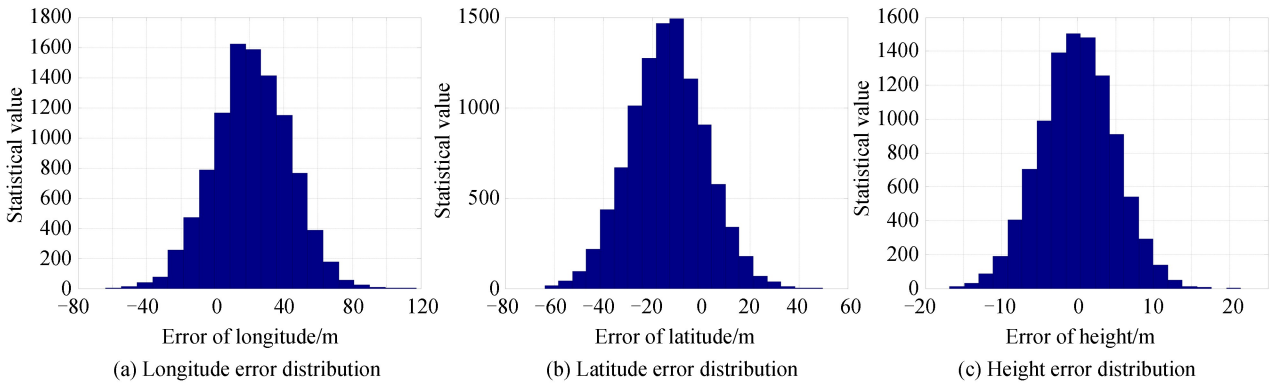


图 5 定位误差概率分布
Fig.5 Probability distribution of location error

可以看出目标定位的经度、纬度和大地高的误差分布都近似服从 $\mu=0$ 的正态分布.1 000 次定位误差标准差如表 2 所示.

表 2 定位结果
Table 2 Location result

Result of target location	Nominal value	Error(standard deviation)
Longitude	108°	0.000 24°
Latitude	34°	0.000 14°
Height	5 345 m	4.927 m

将结果换算成空间位置误差等于 24.92 m.与全微分法相比,蒙特卡洛方法更加符合误差随机分布的规律,准确性更高.

4 飞行试验验证

为验证算法有效性,选取某相机航拍图像一组,相机焦距为 130 mm.用本文算法对目标进行定位,并与 Google Earth 定位结果进行比较,以验证算法的有效性.相机拍摄图像见图 6.

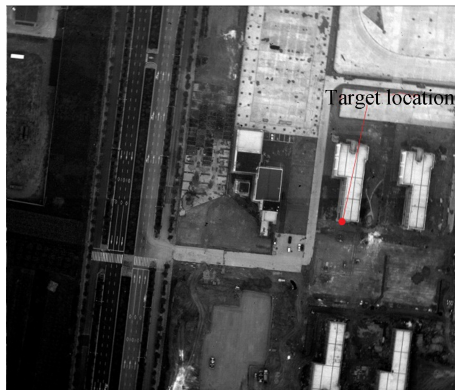


图 6 相机拍摄图像

Fig.6 Image taken with camera

曝光时刻 POS 系统输出相机参数如下: 纬度 = $35.180\ 782\ 3^{\circ}$; 经度 = $109.957\ 893\ 4^{\circ}$; 海拔 = $3\ 013.415\ 771\ 5\ \text{m}$; 方位角 = $276.828\ 064\ 0^{\circ}$; 俯仰角 = $0.002\ 612\ 0^{\circ}$; 横滚角 = $4.231\ 019\ 5^{\circ}$;

计算所得目标经度 = $109.957\ 699\ 4^{\circ}$; 纬度 = $35.182\ 837\ 97^{\circ}$; 高度 = $686.003\ 213\ \text{m}$; 在 Google Earth 上选取同一点; 得到目标位置信息, 经度 = $109.957\ 563\ 89^{\circ}$; 纬度 = $35.182\ 783\ 33^{\circ}$; 高度 = $686\ \text{m}$; 如图 7 所示. 可得二者误差 $R = 15.468\ 6\ \text{m}$. 本文算法可行性得到验证.



图 7 Google Earth 上同一目标点坐标

Fig.7 The same target coordinates on Google Earth

5 结论

基于 POS 系统的航空相机目标定位方法通过 IMU 与相机的刚性连接, 可以直接输出曝光时刻的相机姿态. 选取与导航坐标系平行的辅助系作为物方坐标系, 简化了坐标转换流程, 在已知目标高度的情况下可利用单幅图像完成直接对地定位. 分别采用全微分与蒙特卡洛法对误差进行分析, 并通过飞行试验对本文算法有效性进行验证, 结论证明该算法可获得较高的定位精度, 满足工程需要.

参考文献

- [1] HAO Rui-xin. Research on the method of localization of target based on laser ranging technology[D]. Xi'an: Xi'an technological University, 2014:12-13.
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.
- [2] GUO Li, ANG Hai-song, ZHENG Xiang-ming. Ground moving target geo-location from monocular camera mounted on a micro air vehicle[C]. SPIE, 2011, **8194** : 819419.
- [3] 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.
- [4] TAN Li-gang. Research of target automatic positioning technology in airborne photo-electricity survey equipment[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 43-56.
檀立刚. 机载光电侦查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: 43-56.

- [5] TAN Li-gang, DAI Ming, LIU Jing-hong, *et al.* Error analysis of target automatic positioning for airborne photoelectric measuring device[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21** (12): 3133-3140.
檀立刚,戴明,刘晶红,等.机载光电测量设备目标定位自主定位误差分析[J].光学精密工程,2013, **21** (12): 3133-3140.
- [6] ZHOU Qian-fei, LIU Jing-hong, XIONG Wen-zhuo, *et al.* Multitarget self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 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.
- [7] WANG Jia-qi, JIN Guang, YAN Chang-xiang. Orientation error analysis of airborne optic-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.
- [8] XU Cheng, HUANG Da-qing. Error analysis for target localization 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.
- [9] ZHANG Xue-ping. Research on key technologies of direct geo-referencing in POS-supported aerial photogrammetry[D]. Wuhan: Wuhan University,2010.
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.
- [10] SHEN Xiang. Direct georeferencing of airborne sensors in national frame[D]. Wuhan: Wuhan University,2014.
沈翔. 国家坐标系下机载传感器的直接对地目标定位[D].武汉: 武汉大学,2014.
- [11] DU Yan-lu, DING Ya-lin, XU Yong-sen, *et al.* Geo-location algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37** (3): 0328003.
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): 0328003.
- [12] QIAO Chuan, DING Ya-lin, XU Yong-sen, *et al.* Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25** (7): 1714-1726.
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.
- [13] DU Ji-yan, DUAN Lian-fei, HUANG Guo-man. The principle of UAV detection and target location[M]. Hefei: USTC Press, 2013: 31-33.
都基焱,段连飞,黄国满. 无人机电视侦查目标定位原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013: 31-33.
- [14] ZHOU Qi. All-earth inertial navigation algorithm for large aircraft[D]. Xi'an Northwestern Polytechnical University, 2013: 82-84.
周琪. 大飞机全球惯性导航算法研究[D]. 西安. 西北工业大学, 2013: 82-84.
- [15] QIN Yong-yuan. Inertial navigation[M]. Beijing: Science Press, 2014: 7-8.
秦永元.惯性导航[M].北京: 科学出版社,2014: 7-8.