

机载光电平台目标定位与误差分析

孙 辉

(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)

摘要:根据机载光电平台的特点,建立了6个坐标系,进行了8次线性变换,构建了从光电平台成像系统像面坐标系到大地地理坐标系的目标定位数学模型。计算了目标在大地地理坐标系的经纬度和高程坐标,分析了各种测量参数对目标定位精度的影响。通过建立误差模型和仿真数据进行目标定位实验,采用蒙特卡罗方法统计目标定位误差。实验结果表明,载机经纬度误差、载机姿态角度误差及光电平台指向角度误差是影响目标定位精度的主要因素,其中载机经纬度误差直接传递到目标定位误差,载机姿态角度误差和光电平台指向角度误差大体上以 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 比例作用到目标定位误差。本文方法有效可行,对机载光电平台目标定位具有实用价值。

关键词:机载光电平台;目标定位;大地坐标系;蒙特卡罗方法

中图分类号:V249 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130606.0912

Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform

SUN Hui

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

Abstract: On the basis of the characteristics of an airborne electro-optical platform, six coordinate systems were established and eight linear coordinate transformations were performed. A coordinate transformation model from a camera sensor plane to geodetic coordinate systems was established by using linear coordinate transformation, and the computation formula of geodetic coordinate of the target was derived based on the transformation of different coordinates. The influence of target localization due to various error factors was discussed, and the localization error was analyzed with Mont Carlo method. The experimental results show that the target location is affected by aircraft position errors, aircraft attitude errors and EO platform pose errors, among which the aircraft position errors are transferred directly into the target location, and the aircraft attitude errors and EO platform pose errors are transferred scaling with the range of $10^{-4} \sim 10^{-2}$ to the target location. This method is

收稿日期:2013-09-16;修订日期:2013-11-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(No. 2009CB72400607);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2008AA121803)

efficient and useful to the localization of targets for airborne EO platforms.

Key words: airborne electro-optical platform; target localization; geodetic coordinate system; Mont Carlo method

1 引言

机载光电平台是在地面成像系统基础上发展起来的新型光电成像设备,具有时效性强、机动灵活、作用范围大等优点,在军事侦察、目标定位、设备导航、空间遥感、灾害预报、资源探测等各方面发挥了越来越重要的作用^[1-4]。近年来,全球定位系统(Global Position System, GPS)、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)及计算机技术的发展和进步,为研制和应用新型机载光电平台带来了前所未有的机遇,新一代机载光电平台向着多功能、智能化、集成化方向发展,为提高飞机任务系统的整体性能奠定了良好的基础。

目标定位是机载光电平台关键技术之一,如何实现目标精确定位,完善误差分析和误差分配机制,是研制高性能机载光电平台需要解决的重要问题。近年来,有关目标定位技术在学术界和工程应用领域引起广泛关注,在光电平台目标自主定位与测量^[5-7]、飞行器飞行轨迹测量^[8]、航空吊舱目标定位^[9]、雷达侦察系统目标定位^[10]、星载 SAR 目标定位^[11]、小型无人机目标定位^[12]等方面提出了许多有效方法。其中文献[6]通过平台测量设备,结合载机 GPS 和航空姿态测量系统进行目标定位,同时讨论了机载光电平台自主定位的技术优势及其特点;文献[8]在分析光电跟踪测量设备组成基础上,全面系统讨论了影响测量精度的各方面因素,通过坐标变换和构建测量方程,进行测量误差分析和误差分配;文献[9]在不依赖激光测距机或无线电测高仪条件下,通过飞机与地面的相对高度推算飞机与目标之间的斜距,利用空间坐标变换,在平坦地势条件下对地面目标进行精确定位。

本文结合机载光电平台特点,通过建立 6 个坐标系统和 8 次线性变换,构建从光电平台成像系统像面坐标到大地地理坐标的目标定位数学模型;根据载机位置参数、载机姿态参数和光电平台

目标指向角度和距离计算目标大地坐标;通过样本数据定位实验,讨论载机测量参数和光电平台测量参数对目标定位精度的影响。本文方法可应用于机载光电平台对地面、海面和空中目标的精确定位。

2 空间坐标系与坐标变换

2.1 地心空间直角坐标系 $G(O-G_xG_yG_z)$

地心空间直角坐标系 G 使用直角坐标 (G_x, G_y, G_z) 表示空间点的位置,参见图 1。

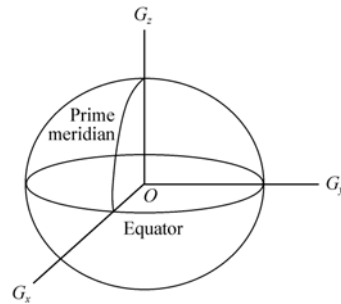


图 1 地心空间直角坐标系

Fig. 1 Geocentric coordinate system

2.2 地心大地坐标系 $E(\lambda, \phi, h)$

地心大地坐标系 E 使用经度 λ 、纬度 ϕ 和高程 h 表示空间点的位置,参见图 2。

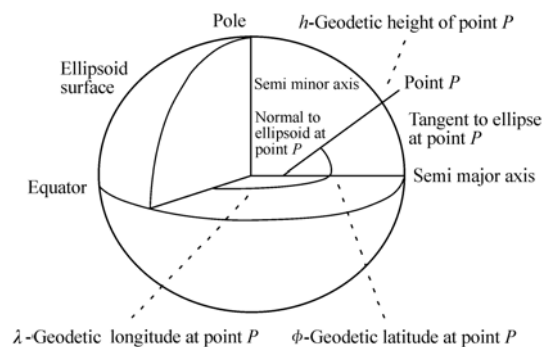


图 2 地心大地坐标系

Fig. 2 Geodetic coordinate system

从 E 系到 G 系变换公式为:

$$G = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h)\cos\phi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\phi\sin\lambda \\ (N(1-e)^2+h)\sin\phi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

从 G 到 E 系变换公式为:

$$\lambda = \text{atan}(y_G/x_G), \quad (2)$$

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{z_G + e_1^2 b \sin^3 \gamma}{\sqrt{x_G^2 + y_G^2 - e^2 a \cos^3 \gamma}}\right), \quad (3)$$

$$h = \frac{\sqrt{x_G^2 + y_G^2}}{\cos\phi} - N. \quad (4)$$

式(1)~(4)中, a 为参考椭球长半轴长度, b 为参考椭球短半轴长度, $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$, $e_1^2 = (a^2 - b^2)/b^2$, $\gamma = \text{atan}\left(\frac{a \times z_G}{b \times \sqrt{x_G^2 + y_G^2}}\right)$, $N = N(\phi) = a^2 / \sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}$.

2.3 载机地理坐标系 $S(O-S_x S_y S_z)$

载机地理坐标系原点 O 定义为载机质心, S_x 轴指向正北, S_z 轴指向正东, S_y 轴指向天向, 参见图3。

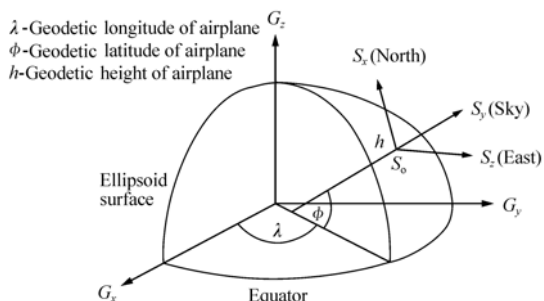


图3 载机地理坐标系

Fig. 3 Geographic coordinate system of the vehicle

从载机地理坐标系 S 到地心空间直角坐标系 G 的坐标变换可表示为:

$$G = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \begin{pmatrix} y_S \\ z_S \\ x_S \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中, \mathbf{Q}_1 表示绕 S_x 轴的旋转矩阵, \mathbf{Q}_2 表示绕 S_z 轴的旋转矩阵。

2.4 载机机体坐标系 $A(O-A_x A_y A_z)$

载机机体坐标系 A 原点 O 定义为载机质心, A_x 轴指向机头方向, A_z 轴指向机翼方向, A_y 轴指向机体上方, 参见图4。

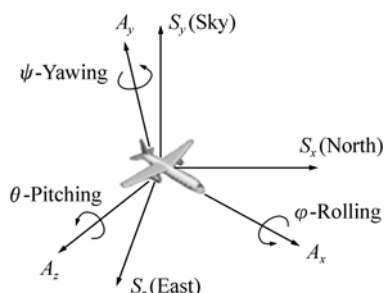


图4 载机机体坐标系

Fig. 4 Body coordinate systems of the vehicle

从载机机体坐标系 A 系到载机地理坐标系 S 系的坐标变换公式可表示为:

$$S = \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5 \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式(6)中 $\mathbf{Q}_3, \mathbf{Q}_4, \mathbf{Q}_5$ 分别表示绕 A_y, A_z, A_x 轴的旋转矩阵。

2.5 成像系统坐标系 $C(O-C_x C_y C_z)$

成像系统坐标系 C 是光学成像系统物空间坐标系统, C_x 轴指向目标方向, C_z 轴沿物镜平面向右, C_y 轴垂直于 $OC_x C_z$ 平面^[8], 参见图5, 图中的 α 和 β 分别表示平台方位和俯仰角度。

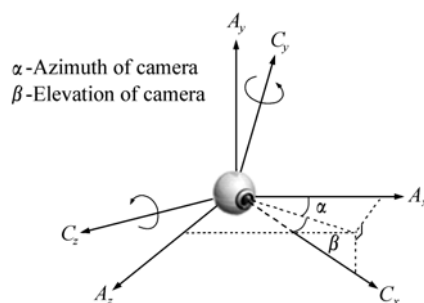


图5 成像系统坐标系

Fig. 5 Coordinate systems of the camera

从成像系统坐标系 C 系到载机机体坐标系 A 系的坐标变换公式为:

$$A = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_6 \mathbf{Q}_7 \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式(7)中, $\mathbf{Q}_6, \mathbf{Q}_7$ 分别表示绕 C_y, C_z 轴的旋转矩阵。

2.6 像面坐标系 $P(O-P_x P_y P_z)$

像面坐标系 P 是光学成像系统的像空间坐标系, 将 C 系沿 C_x 轴平移 f 即构成 P 系, 参见图6, 其中 f 表示物镜焦距。

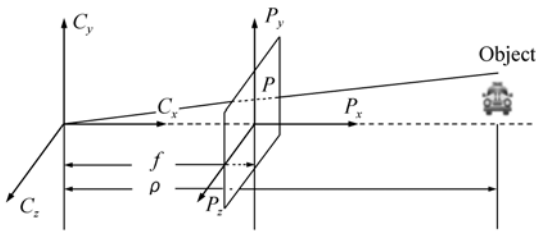


图6 像面坐标系

Fig. 6 Coordinate systems of the plane

从像面坐标系 P 系到成像系统坐标系 C 系的变换公式为:

$$C = \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_8 \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式(8)中 \mathbf{Q}_8 表示比例缩放和平移变换矩阵。

3 目标定位与误差分析

3.1 载机测量与光电平台测量参数

目标定位首先需要确定载机定位参数及光电平台测量参数, 其中载机定位参数包括载机大地坐标 (λ, ϕ, h) 和姿态角 (ψ, θ, φ) , 由全球定位系统(GPS)和惯性导航系统(INS)给出^[13]; 光电平台测量参数包括视轴指向方位角 α 、俯仰角 β 和目标距离 ρ , 视轴指向方位角和俯仰角由角度传感器, 如角位移编码器或感应同步器给出^[14], 目标距离由激光测距机给出。

3.2 目标定位

机载光电平台通过伺服系统控制光学成像系统视轴指向目标, 目标景物成像在像面中心, 建立影像点与景物点之间的对应关系, 推导从像面坐标到大地地理坐标之间的变换关系, 是本文重点讨论的关键问题。

目标成像在像面中心, 在像面坐标系(P 系)中的坐标为 $(0, 0, 0)$, 结合式(5)~(8), 可推导出目标在地心直角坐标(G 系)下的空间直角坐标 $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$, 计算公式如下:

$$OBJ = \begin{pmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ z_{obj} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5 \mathbf{Q}_6 \mathbf{Q}_7 \mathbf{Q}_8 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

将目标的空间直角坐标 $(x_{obj}, y_{obj}, z_{obj})$ 代入式(2)~(4), 即可得到目标的大地坐标 $(\lambda_{obj}, \phi_{obj}, h_{obj})$, 实现目标的大地坐标定位。

3.3 误差分析

3.3.1 误差来源

根据式(1)~(9), 目标定位误差与载机经纬度误差、载机姿态角度误差和视轴指向角度误差有关, 因此可定义目标定位误差分析模型如下:

$$\Delta \lambda_{obj} = \Delta \lambda_{obj}(\Delta \lambda, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi, \Delta \alpha, \Delta \beta), \quad (10)$$

$$\Delta \phi_{obj} = \Delta \phi_{obj}(\Delta \lambda, \Delta \phi, \Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi, \Delta \alpha, \Delta \beta), \quad (11)$$

式中, $\Delta \lambda_{obj}$ 和 $\Delta \phi_{obj}$ 分别表示目标经度和纬度的定位误差。

3.3.2 蒙特卡罗统计分析

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法是一种基于概率统计的数值计算方法^[15-16], 可以比较准确地描述客观事物特点, 解决一些常规数值方法难以解决的实际问题。本文使用蒙特卡罗方法分析和计算目标定位误差。首先根据载机和平台测量参数误差分布特点, 确定载机经纬度、载机姿态角和平台目标指向角度测量误差服从表1所列的随机分布, 通过对测量参数误差进行随机抽样处理, 根据式(9)计算目标经度、纬度和高程, 统计定位误差。

表1 随机误差分布表

Table 1 Distributions of random errors

序号	误差变量名称	变量符号	随机分布	误差分布/(°)	随机参数
1	载机经度	λ	正态分布	$\sigma_\lambda = 0.8 \exp(-7)$	λ_i
2	载机纬度	ϕ	正态分布	$\sigma_\phi = 0.8 \exp(-7)$	ϕ_i
3	载机航向角	ψ	正态分布	$\sigma_\psi = 0.02$	ψ_i
4	载机俯仰角	θ	正态分布	$\sigma_\theta = 0.02$	θ_i
5	载机横滚角	φ	正态分布	$\sigma_\phi = 0.02$	φ_i
6	目标指向方位角	α	均匀分布	$\Delta\alpha_{\max} = 0.0015$	α_i
7	目标指向俯仰角	β	均匀分布	$\Delta\beta_{\max} = 0.0015$	β_i

误差分析基本步骤如下:

Step1: 根据误差计算模型确定变量参数与误差分布空间;

Step2: 选择随机序列长度, 根据误差分布空间, 生成载机经纬度 (λ_i, ϕ_i)、载机姿态 ($\psi_i, \theta_i, \varphi_i$)、目标指向角度 (α_i, β_i) 随机参数;

Step3: 选择上述随机参数代入式(1)~(9), 计算目标经度 λ_i^{obj} 和纬度 ϕ_i^{obj} ;

Step4: 分别计算目标经度 λ_i^{obj} 的标准差 ϕ_i^{obj} 和纬度的标准差 σ_ϕ^{obj} 及相应的误差敏感度 μ 。

其中:

$$\sigma_\lambda^{\text{obj}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lambda_i^{\text{obj}} - \lambda_{\text{obj}})^2}, \quad (12)$$

$$\sigma_\phi^{\text{obj}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_i^{\text{obj}} - \phi_{\text{obj}})^2}, \quad (13)$$

$$\text{误差敏感度 } \mu = \frac{\text{目标定位标准差}}{\text{测量参数标准差}} \quad (14)$$

误差敏感度 μ 用于衡量目标定位误差对测量

参数误差的敏感程度, $\mu < 1$ 时表示敏感程度低, 测量参数误差经过比例缩小传递到定位误差; $\mu = 1$ 时, 表示测量参数误差等值传递到定位误差; $\mu > 1$ 时表示敏感程度高, 测量参数误差经过比例放大传递到定位误差。

4 实验结果与分析

为验证本文方法, 选择一组测量数据进行目标定位计算和误差分析实验, 通过实验结果进一步分析载机经纬度、载机姿态角度及平台指向角度对目标定位结果的影响。

实验中选择 WGS-84 世界坐标系统及其协议规定的地球常数, 载机位置参数、载机姿态参数及光电平台目标测量参数, 见表 2。将测量参数代入式(9), 计算目标的经纬度和高程坐标, 计算结果见表 3。

表2 载机和光电平台测量参数

Table 2 Measured parameters of aircraft and EO platform

载机定位参数			载机姿态参数			平台测量参数		
经度 $\lambda/(^\circ)$	纬度 $\phi/(^\circ)$	高程 h/m	航向角 $\psi/(^\circ)$	俯仰角 $\theta/(^\circ)$	横滚角 $\varphi/(^\circ)$	方位角 $\alpha/(^\circ)$	俯仰角 $\beta/(^\circ)$	距离 ρ/m
125	42	10 000	10	5	-2	45	-75	10 200

表3 目标定位结果

Table 3 Localization results of target

目标经度 λ_{obj}	目标纬度 ϕ_{obj}	目标高程 h_{obj}
125.031 955 12	42.020586 46	419.58n

根据误差分析的基本步骤, 首先选择随机参数序列长度 $n = 10^6$, 按照表 1 中的误差分布密度函数生成 7 个随机误差序列, 每个随机误差序列

和其它测量参数进行组合代入式(9), 计算目标经度和纬度, 并根据式(12)~(14)计算目标定位误差和误差敏感度, 误差统计结果见表 4。

表4 目标定位误差统计结果
Table 4 Statistics results of target localization errors

误差源名称	符号	目标经纬度标准差		误差敏感度	
载机经度	$\Delta\lambda$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 8.0 \times 10^{-8}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 6.4 \times 10^{-15}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\lambda} = 1.0$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\phi} = 8.0 \times 10^{-8}$
载机纬度	$\Delta\phi$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 4.0 \times 10^{-11}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 8.0 \times 10^{-8}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\lambda} = 5.0 \times 10^{-4}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\phi} = 1.0$
载机航向角	$\Delta\psi$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 9.6 \times 10^{-7}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 8.3 \times 10^{-8}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\psi} = 4.8 \times 10^{-4}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\psi} = 4.1 \times 10^{-4}$
载机俯仰角	$\Delta\theta$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 7.0 \times 10^{-7}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 3.0 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\theta} = 3.5 \times 10^{-4}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\theta} = 1.5 \times 10^{-3}$
载机横滚角	$\Delta\varphi$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 4.0 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 6.0 \times 10^{-7}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\varphi} = 2.0 \times 10^{-4}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\varphi} = 3.0 \times 10^{-4}$
平台方位角	$\Delta\alpha$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 1.4 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 1.5 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\alpha} = 9.3 \times 10^{-4}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\alpha} = 1.0 \times 10^{-3}$
平台俯仰角	$\Delta\beta$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}} = 7.2 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}} = 3.6 \times 10^{-6}$	$\sigma_{\lambda}^{\text{obj}}/\sigma_{\beta} = 4.8 \times 10^{-3}$	$\sigma_{\phi}^{\text{obj}}/\sigma_{\beta} = 2.4 \times 10^{-3}$

从表4的目标经纬度误差对测量参数误差的敏感度数据可以看出,载机经纬度的敏感度等于1,表明载机经纬度误差直接转化为目标定位误差;载机姿态角度和平台指向角度的敏感度为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$,表明载机姿态角度误差和平台指向角度误差以 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 的比例作用到目标定位误差。因此,在同等误差条件下,载机经纬度误差是决定目标定位误差的主要来源,载机经纬度的测量精度是影响目标定位精度的关键因素;在载机姿态角度误差和平台指向角度误差较大条件下,对目标定位精度仍然起着决定性作用。

5 结 论

本文根据机载光电平台组成特点,通过建立6个坐标系统和8次线性变换,构建从成像系统像面坐标系到大地地理坐标系的目标定位数学模型。从载机位置参数、载机姿态参数、光电平台目标参数出发,推导出目标的地心大地坐标计算公

式;根据测量参数误差分布,采用蒙特卡罗分析法估算目标定位误差;通过实验数据分析了测量参数误差与目标定位误差之间的关系,具有一定的理论和应用价值。实验结果表明,通过载机位置参数、载机姿态参数和光电平台目标指向角度参数等测量信息可以实现机载光电平台对目标的精确测量。在目标定位误差方面,载机经纬度的敏感度等于1,载机姿态角度和平台指向角度的敏感度为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 。载机经纬度误差对目标定位计算结果影响较大,载机姿态角误差、光电平台指向角度误差产生的误差影响较小,载机位置测量精度是影响目标定位精度的关键因素。

本文通过实验结果定量分析了目标定位误差与测量参数误差的关系,在实际工程应用中可以根据指标要求进行合理的误差分配和测量精度控制,以期减小计算误差,达到最佳的设计效果。本文方法适合机载光电平台对地面、海面和空中目标的大地坐标定位。

参考文献:

- [1] 宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
SONG F H. *Modern Spatial Electro-optical Imaging System and Its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [2] 孟庆季,张续严,周凌,等. 机载激光3D探测成像系统的关键技术[J]. 中国光学,2011,4(3):327-339.
MENG Q J, ZHANG X Y, ZHOU L, et al.. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 327-339. (in Chinese)
- [3] 张健,张雷,曾飞,等. 机载激光3D探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学,2011,4(3):213-232.
ZHANG J, ZHANG L, ZENG F, et al.. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 213-232. (in Chinese)
- [4] 杨权,刘晶红,马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. 液晶与显示,2011,26(5):677-682.
YANG Q, LIU J H, MA X F. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform

- [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 677-682. (in Chinese)
- [5] 艾宏山, 刘攀. 机载光电系统的目标定位研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(2): 77-80.
AI H SH, LIU P. Research on target positioning of airborne electro-optical system[J]. *Opt. Optoelectronic Technol.*, 2011, 9(2): 77-80. (in Chinese)
- [6] 刘晶红, 孙辉, 张葆, 等. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1305-1310.
LIU J H, SUN H, ZHANG B, et al. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric imaging platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1305-1310. (in Chinese)
- [7] 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]. *J. Changchun Univ. Sci. Technol. (Natural Science Edition)*, 2009, 32(4): 531-534. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 林旻序, 乔彦峰, 戴明, 等. 单载荷航空吊舱目标定位方法研究[J]. *红外技术*, 2011, 33(10): 593-597.
LIN M X, QIAO Y F, DAI M, et al. Research on single payload air pod target location method[J]. *Infrared Technol.*, 2011, 33(10): 593-597. (in Chinese)
- [10] 廖龙灵. 直升机载雷达侦察系统目标定位精度分析[J]. *电讯技术*, 2005, 45(4): 107-110.
LIAO L L. Goes straight up the airborne radar approach sensor y system localization of target precision analysis[J]. *Telecommunication Technology*, 2005, 45(4): 107-110. (in Chinese)
- [11] 袁孝康. 星载合成孔径雷达目标定位研究[J]. *上海航天*, 2002(1): 1-7.
YUAN X K. Studies of ground target location of Spaceborne SAR[J]. *Aerospace Shanghai*, 2002(1): 1-7. (in Chinese)
- [12] REDDING J, MCLAIN T, BEARD R, et al. Vision-based target localization from a fixed-wing miniature air vehicle [C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, June 14-16, 2006, Minnesota, USA, 2006: 2862-2867.
- [13] 张葆, 姚俊峰, 高利民. 机载 GPS 测量定位技术研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 172-178.
ZHANG B, YAO J F, GAO L M. Measuring orientation technology based on airborne GPS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 172-178. (in Chinese)
- [14] 孙莹, 万秋华, 王树洁, 等. 航天级光电编码器的信号处理系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1182-1188.
SUN Y, WAN Q H, WANG SH J, et al. Design of signal process system for spaceborne photo electric encode[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1182-1188. (in Chinese)
- [15] 徐利治, 陈希孺, 郑忠国, 等. 现代数学手册, 随机数学卷[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
XU L Z, CHEN X R, ZHENG ZH G, et al. *Modern Mathematics Handbook, Stochastic Mathematics* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 刘琳, 张兴德, 贺谊亮. 基于蒙特卡罗模拟法的红外光学系统公差分析[J]. *激光与红外*, 2010, 40(5): 496-499.
LIU L, ZHANG X D, HE Y L. Monte Carlo simulation and its application in the IR optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(5): 496-499. (in Chinese)

作者简介:



孙 辉(1963—),男,吉林柳河人,研究员,1985年于吉林大学获得学士学位,主要从事数字图像处理及计算机仿真研究。E-mail:sunh@ciomp.ac.cn