

文章编号 2095-1531(2015)06-0988-09

机载光电平台目标交会定位

孙 辉*, 李志强, 张建华, 韩松伟, 宋玉龙
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:根据直线交会测量原理,构建了机载光电平台目标定位数学模型。首先建立5个坐标系,确定了坐标系之间的变换关系,在地心直角坐标系下,根据光电平台观测目标的方位和俯仰角度参数,结合飞机的位置和姿态测量参数,通过坐标变换确定从光电平台到目标之间的观测直线方程。选择一组目标观测直线建立目标交会测量目标函数,根据最小二乘原理,建立关于直线交会点坐标的线性方程组。解出直线交会点的三维坐标并根据从地心直角坐标系到大地地理坐标系的变换关系,计算目标的大地经纬度和高程坐标,通过样本数据进行交会定位精度实验。实验结果表明,本文方法定位结果和实际测量数据接近,经度误差为 $0.65''$,纬度误差为 $0.82''$,高程误差为5 m,验证了本文方法的准确性。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;交会测量;坐标变换

中图分类号:V249 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150806.0988

Target localization with intersection measurement for airborne electro-optical platform

SUN Hui*, LI Zhi-qiang, ZHANG Jian-hua, HAN Song-wei, SONG Yu-long
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* Corresponding author, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

Abstract: Based on the principle of the intersection measurement, the mathematical model of measuring the target localization for airborne electro-optical platform (EOP) is established. Firstly, five coordinate systems are performed and transformations of different coordinate systems are given. Under the geocentric coordinate system, with the measurements of EOP pose angles, the aircraft position and the aircraft attitude, the mathematical expression of straight line segment between the EOP and the target point can be determined based on the transformation of coordinate system, some of which have been used to define an objective function of intersection measurement. In order to estimate the geodetic coordinate of the target, least squares (LS) algorithm is used to minimize the objective function. The matrix equation about 3D geocentric coordinate of target can be computed to be determined, solving this matrix equation and transforming from geocentric coordinates system to geodetic coordinates system, and the estimate of the geodetic coordinates of the target can be obtained. Final-

收稿日期:2015-06-02;修订日期:2015-07-10

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)

Supported by National Program on Key Basic Research Projects of China (No. 2009CB72400607), National High-tech R&D Program of China (No. 2008AA121803)

ly, the intersecting localization experiment is performed on a measurements sample. The result shows that the intersecting location is close to the true target location, the RMS of longitude is 0.65", the RMS of latitude is 0.82" and the RMS of altitude is 5 m. This method is efficient and will be useful to localization of target for airborne EOP.

Key words: Airborne electro-optical platform(EOP); target localization; intersection measurement; coordinate transformation

1 引言

机载光电平台通过跟踪系统和伺服系统控制光学成像系统搜索、捕获目标并锁定目标到成像系统视场中心,根据来自飞机 GPS/INS 的经纬度和姿态角度测量信息,结合光电平台对目标的指向角度测量信息,通过构建目标定位模型,计算目标的经纬度和高程数据,实现目标定位^[1]。

依据飞机和平台数量划分,机载光电平台目标定位具有单机定位和双(多)机交会定位两种方式,其中单机定位又可分为单点定位和两(多)点交会定位两种。如果机载光电平台安装了目标距离测量设备(如激光测距仪等),则目标相对机载光电平台的空位置可以由距离、方位和俯仰角度组成的三维空间信息完整描述,此时可以采用单点定位方式计算目标相对光电平台的空位置,再经过一系列的线性空间变换,就可以得到目标的经纬度坐标,实现目标精确定位^[2-3];在机载光电平台不具备目标距离测量设备情况下,只能得到目标的方向角度测量信息,目标相对机载光电平台的空位置信息只有方位和俯仰角度二维空间信息。因此,在单机情况下进行目标定位只有两种方法:一种是通过约束条件建立定位模型对目标进行定位^[4],另一种需要联合使用两点或两点以上的测量信息,然后采用直线交会处理技术确定空间目标的三维位置信息。

机载光电平台交会定位是在地面经纬仪交会测量原理基础上发展起来的新型技术,可以有效解决在缺少目标距离测量信息情况下的目标定位问题。目前,在国内外关于目标交会测量方面的文献中,主要侧重于地面靶场两台光电经纬仪或光电经纬仪和雷达之间的测量技术^[5-7]和目标交会测量误差分析方面的研究^[8-10],在机载有效载

荷目标交会测量目标定位方面报道较少^[11]。因此,在机载光电平台单机环境下,如何构建目标交会定位模型,提高交会定位精度,是研制高性能机载光电平台需要解决的重要问题之一,也是值得学术界和工程研究领域关注的话题。

本文借鉴了目前在地面经纬仪目标测量和跟踪系统中比较成熟的交会测量技术,根据机载光电平台特点,通过构建大地地理坐标系、地心直角坐标系、飞机地理坐标系、飞机机体坐标系和成像系统坐标系 5 个坐标系统,建立从成像系统坐标系到大地地理坐标系统的目标交会定位模型,根据飞机位置参数、飞机姿态参数和光电平台目标指向角度参数,采用直线交会技术,计算目标在大地地理坐标系的经纬度和高程坐标,实现目标精确定位,通过理论分析和样本实验结果进行验证。

2 空间坐标系构建与坐标变换

2.1 大地地理坐标系 $E(\lambda, \phi, h)$

大地地理坐标系是确定物体、目标空间位置的基础,目前我国选用的坐标基准是 CGCS2000 坐标系统,大体上与国际地球参考框架(ITRF)、WGS-84(World Geodetic System)框架一致。大地地理坐标系使用与地球实体相近的参考椭球描述地球,采用经度纬度和高程 (λ, ϕ, h) 描述空间点位置,经度 λ 定义为空间点与参考椭球的自转轴所在面与本初子午面的夹角,纬度 ϕ 定义为空间点与参考椭球面的法线与赤道面的夹角,高程 h 定义为空间点沿着参考椭球的法线方向到参考椭球面的距离,如图 1 所示。

2.2 地心直角坐标系 $G(O - G_x G_y G_z)$

地心直角坐标系 G 是一个惯性坐标系,采用 (x, y, z) 描述空间位置,坐标系原点 O 在地球质心, G_x 轴指向地球本初子午线与赤道的交点, G_z 轴

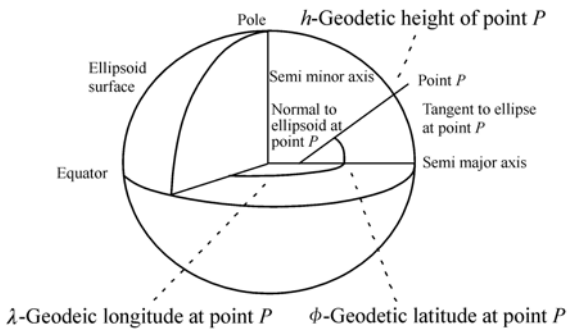


图 1 大地地理坐标系

Fig. 1 Geodetic coordinate system

指向正北极, G_y 轴垂直于 $OG_x G_z$ 平面, 如图 2 所示。

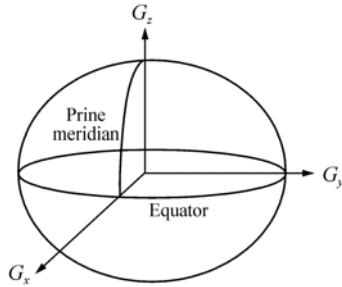


图 2 地心直角坐标系

Fig. 2 Geocentric 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:

$$\lambda = \text{atan}\left(\frac{y_G}{x_G}\right), \quad (2)$$

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

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

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。

$$e^2 = (a^2 - b^2)/a^2, \quad (5)$$

$$e_1^2 = (a^2 - b^2)/b^2, \quad (6)$$

$$\gamma = \text{atan}\left(\frac{a \times z_G}{b \times \sqrt{x_G^2 + y_G^2}}\right), \quad (7)$$

$$N = N(\phi) = a^2 / \sqrt{a^2 \cos^2(\phi) + b^2 \sin^2(\phi)}. \quad (8)$$

测量空间位置参数的设备主要是 GPS、GL-NASS、INS 等, 目前通常采用组合方式提高数据可靠性。

2.3 飞机地理坐标系 $S(O - S_x S_y S_z)$

飞机地理坐标系 S 采用 (x, y, z) 描述空间位置, 坐标系原点 O 在飞机质心, S_x 轴指向正北方向, S_z 轴指向正东方向, S_y 轴垂直于 $OS_x S_z$ 平面指向天向, 如图 3 所示。

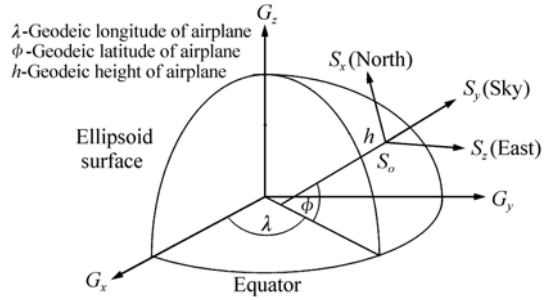


图 3 飞机地理坐标系

Fig. 3 Geographic coordinate system of the air vehicle

从飞机地理坐标系 S 到地心直角坐标系 G 的坐标变换可表示为:

$$G = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_x(\lambda) \mathbf{Q}_z(\phi) \begin{pmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中, $\mathbf{Q}_x, \mathbf{Q}_z$ 分别表示绕 A_x, A_z 轴的旋转矩阵。

2.4 飞机机体坐标系 $A(O - A_x A_y A_z)$

飞机机体坐标系 A 的原点 O 与 S 系原点重合, A_x 轴指向机头方向, A_z 轴指向机翼方向, A_y 轴指向飞机上方。

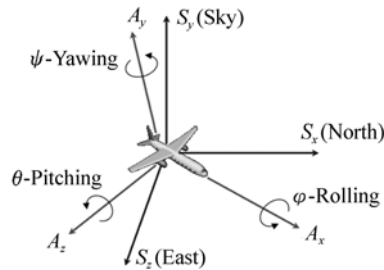


图 4 飞机机体坐标系

Fig. 4 Body coordinate system of the air vehicle

飞机空间姿态由航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚

角 φ 三个参数描述,分别表示绕 A_y 、 A_z 和 A_x 轴的旋转角度,如图4所示。

从 A 系到 S 系的变换关系可表示为:

$$S = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_y(\psi)\mathbf{Q}_z(\theta)\mathbf{Q}_x(\varphi) \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中, \mathbf{Q}_x 、 \mathbf{Q}_y 、 \mathbf{Q}_z 分别表示绕 A_x 、 A_y 、 A_z 轴的旋转矩阵。

目前测量飞机空间姿态参数的设备主要是陀螺、惯导和 POS 设备。

2.5 成像系统坐标系 $C(O-C_xC_yC_z)$

成像系统坐标系 C 是光学成像系统的物空间坐标系统,采用 (x, y, z) 描述空间位置,原点 O 是成像系统焦点 C_x 轴指向视轴方向, C_z 轴与 C_x 垂直向右, C_y 轴与 OC_xC_z 平面垂直,如图5所示。

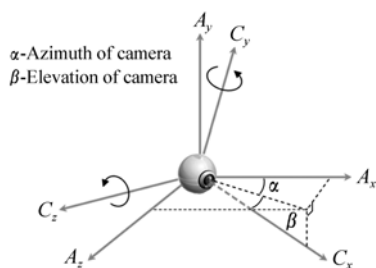


图5 成像系统坐标系

Fig. 5 Coordinate system of the camera

2.6 目标交会定位

在光电平台搜索目标景物时,图像跟踪系统利用采集的目标图像信息,通过对图像进行处理和分析,获取目标测量脱靶量数据^[12-13],通过解算得到目标光轴的角度偏差参数并发送到伺服系统。伺服系统通过伺服环路控制电机驱动光电载荷,保持成像系统坐标系的 C_x 轴沿视轴方向指向目标景物中心^[14]。在光电平台具备激光测距机等距离测量设备时,目标在成像系统坐标系的坐标可由目标距离 d 、方位角 α 和俯仰角 β 完整描述,此时首先计算目标在飞机机体坐标系 (A 系) 的空间坐标,然后通过 A 系 \rightarrow S 系 \rightarrow G 系 \rightarrow E 系的一系列空间变换得到目标的大地经纬度坐标,实现目标精确定位^[2]。

在光电平台不具备距离测量手段时,目标测

量结果只有方位角 α 和俯仰角 β 二维坐标参数,依据常规的坐标计算方法不能计算目标在成像系统坐标系的坐标,也就无法完成目标定位。此时,需要联合使用两点或两点以上的目标测量信息,通过直线交会处理技术计算目标的空间位置实现目标定位。因此,如何构建机载光电平台目标交会定位模型,计算目标的大地经纬度坐标,是本文重点讨论的内容。

3 目标观测直线交会定位

3.1 目标直线系数计算

机载光电平台在不同时刻跟踪同一目标时,成像系统视轴指向目标中心,由视轴及其延长线构成的目标观测直线在目标中心相交,因此机载光电平台交会计算首先需要解决的问题就是如何建立目标观测直线方程和确定直线方程系数。对机载光电平台而言,成像系统视轴指向目标景物,在不同的坐标系统下,目标观测直线可以有不一样的表示形式,为便于计算,本文将全部观测直线统一到地心直角坐标系,在该坐标系下推导目标观测直线方程系数并进行目标交会处理。

首先确定飞机测量参数及平台测量参数。飞机位置测量参数包括经度、纬度和海拔高度;飞机姿态测量参数包括航向角、俯仰角和横滚角,由全球定位系统 (GPS) 和惯性导航系统 (INS) 给出^[15];光电平台测量参数包括目标距离、目标方位角度和俯仰角度,目标距离一般由激光测距设备给出,目标观测角度一般由角度传感器,如角位移编码器、感应同步器等给出^[16]。由于本文只讨论光电平台未安装激光测距设备条件下的交会问题,所以在光电平台测量参数中不包括目标距离因素。

按照同步采样规则对上述测量数据进行采样,不妨设时间序列 $\{t_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, 飞机经纬度和高程序列分别为 $\{\lambda_i\}$ 、 $\{\phi_i\}$ 和 $\{h_i\}$, 飞机航向角度、俯仰角度和滚动角度序列分别为 $\{\psi_i\}$ 、 $\{\theta_i\}$ 和 $\{\varphi_i\}$, 平台方位角度和俯仰角度序列分别为 $\{\alpha_i\}$ 和 $\{\beta_i\}$ 。在 t_i 时刻,光电平台目标观测直线 L_i 从光电平台的成像系统坐标系原点出发指向目标景物,设原点在地心直角坐标系 G 下的坐标

值为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 直线 L_i 的方向余弦为 (l_i, m_i, n_i) , 则根据式(1), $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 可直接表示为:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h)\cos\phi_i\cos\lambda_i \\ (N+h)\cos\phi_i\sin\lambda_i \\ [N(1-e^2)+h_i]\sin\phi_i \end{pmatrix}. \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} l_i \\ m_i \\ n_i \end{pmatrix} = Q_x(\lambda_i)Q_z(\phi_i)Q_y(\psi_i)Q_z(\theta_i)Q_x(\varphi_i) \begin{pmatrix} \cos\beta_i\cos\alpha_i \\ \cos\beta_i\sin\alpha_i \\ \sin\beta_i \end{pmatrix}. \quad (12)$$

在地心直角坐标系下, 全部目标观测直线构成目标直线序列 $\{L_i\}$, 序列中的直线方程描述如下:

$$L_i: \frac{x-x_i}{l_i} = \frac{y-y_i}{m_i} = \frac{z-z_i}{n_i}. \quad (13)$$

3.2 目标直线交会条件的判定

直线交会定位是首先建立目标观测直线方程, 计算直线方程系数, 然后通过计算直线的交点坐标实现目标位置测量。根据空间解析几何知识, 空间任意两条直线之间有重合、平行、相交和异面直线4种位置关系, 其中, 只有相交和异面直线两种情况满足直线交会条件, 在两条直线重合和平行时不能进行直线交会计算。因此在交会计算之前, 必须判定两条直线是否重合或平行。

直线 L_i 的方向余弦 (l_i, m_i, n_i) 可以通过计算直线 L_i 在飞机成像坐标系下的方向余弦, 再经过从 A 系 \rightarrow S 系 \rightarrow G 系的两次空间坐标变换得到, 根据式(9)、(10), L_i 的方向余弦计算公式如下:

不妨用 L_i 和 L_j 表示直线序列 $\{L_i\}$ 中的任意两条直线, 则重合或平行的判定条件如下:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ l_i & m_i & n_i \\ l_j & m_j & n_j \end{vmatrix} = 0. \quad (14)$$

3.3 直线交会定位

设有式(9)表示的直线序列 $\{L_i\}, i=1, 2, \dots, N$, 则 n 点交会的基本思想是: 对于上述直线序列 $\{L_i\}$, 从中选择其中的 n 条直线 ($2 \leq n \leq N$), 求取空间上的一点 $P(x_p, y_p, z_p)$, 使得点 P 到 n 条直线之间的距离之和 $E(x_p, y_p, z_p)$ 最小, $P(x_p, y_p, z_p)$ 即为 n 条直线的交会坐标。

根据空间几何知识, $E(x_p, y_p, z_p)$ 计算公式如下:

$$E(x_p, y_p, z_p) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_p - x_i^F)^2 + (y_p - y_i^F)^2 + (z_p - z_i^F)^2]}, \quad (15)$$

式中, $S_i(x_i^F, y_i^F, z_i^F)$ 表示点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 到直线 L_i 的垂足坐标, 根据直线参数方程可以导出 $S_i(x_i^F, y_i^F, z_i^F)$ 的计算公式如下:

$$\begin{aligned} x_i^F &= x_i + l_i[l_i(x_p - x_i) + m_i(y_p - y_i) + n_i(z_p - z_i)] \\ y_i^F &= y_i + m_i[l_i(x_p - x_i) + m_i(y_p - y_i) + n_i(z_p - z_i)]. \\ z_i^F &= z_i + n_i[l_i(x_p - x_i) + m_i(y_p - y_i) + n_i(z_p - z_i)] \end{aligned} \quad (16)$$

因此, 多点交会定位就可以简化为如何求解 (x_p, y_p, z_p) , 使得 $E(x_p, y_p, z_p)$ 最小问题。根据最小二乘原理, 首先对 $E(x_p, y_p, z_p)$ 分别求取关于变

量 x_p, y_p, z_p 的1阶偏导 $\frac{\partial E}{\partial x_p}, \frac{\partial E}{\partial y_p}, \frac{\partial E}{\partial z_p}$, 并令其值为0, 即:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [(1-l_i^2)(x_p - x_i) - l_i m_i (y_p - y_i) - l_i n_i (z_p - z_i)] &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [(-l_i m_i)(x_p - x_i) + (1+m_i^2)(y_p - y_i) - m_i n_i (z_p - z_i)] &= 0. \\ \sum_{i=1}^n [(-l_i n_i)(x_p - x_i) - m_i n_i (y_p - y_i) + (1-n_i^2)(z_p - z_i)] &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

进一步整理式(17),可建立关于 x_p, y_p, z_p 的线性方程组如下:

$$AW = b, \tag{18}$$

式中:

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (1 - l_i^2) & - \sum_{i=1}^n l_i m_i & - \sum_{i=1}^n l_i n_i \\ - \sum_{i=1}^n l_i m_i & \sum_{i=1}^n (1 - m_i^2) & - \sum_{i=1}^n m_i n_i \\ - \sum_{i=1}^n l_i n_i & - \sum_{i=1}^n m_i n_i & \sum_{i=1}^n (1 - n_i^2) \end{pmatrix}, \tag{19}$$

$$W = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix}, \tag{20}$$

$$b = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n [x_i(1 - l_i^2) - y_i l_i m_i - z_i l_i n_i] \\ \sum_{i=1}^n [-x_i l_i m_i + y_i(1 - m_i^2) - z_i m_i n_i] \\ \sum_{i=1}^n [-x_i l_i n_i - y_i m_i n_i + z_i(1 - n_i^2)] \end{pmatrix}. \tag{21}$$

由式(19)~(21)可以看出,因为 A 和 b 矩阵系数都是已知的,所以当 A 是非奇异矩阵时,线性方程组 $AW = b$ 有且只有一个解:

$$W = A^{-1}b, \tag{22}$$

由于交会点坐标 $P(x_p, y_p, z_p)$ 是在地心直角坐标系下的坐标,根据式(2)~(4),经过 G 系→ E 系的坐标变换,即可得到目标在大地地理坐标系下的经纬度和高程坐标,完成目标交会定位。

4 实验结果

为验证本文方法,选择一组航空飞行试验数据进行目标交会定位实验,实验中选择 WGS-84 世界坐标系及其协议规定的地球常数,飞机位置参数和飞机姿态参数来自飞机上安装的 GPS/INS 设备测量结果,目标观测方位角度和俯仰角参数来自光电平台的轴角编码器测量结果。

由于实验样本数据中包含了系统误差、安装误差、随机测量误差等因素,为准确验证交会算法测量精度,根据误差分布规则进行了误差修正。

首先选择一个地面目标,通过 GPS/INS 标定该目标的大地经纬度和高程数据作为该目标坐标基准值。在飞机飞行过程中,机载光电平台通过

跟踪和伺服控制设备对该目标进行捕获并锁定,同时记录该时刻的飞机经纬度、姿态角度、平台方位角度和俯仰角度等测量数据作为实验样本数据,采用本文介绍的交会方法计算当前样本数据的目标经纬度和高程数据,与标定的目标坐标基准值进行对比,计算当前样本数据的交会定位误差。全部数据采样完毕后对交会定位误差进行统计,计算全部样本数据的标准差。

实验样本数据序列长度 $N = 510$,构成目标观测直线序列长度 $N = 510$ 。交会实验选择交会点数 $n = 10$,两种交会计算方法的经度、纬度和高程误差曲线分别见图 6、图 7 和图 8,交会误差统计

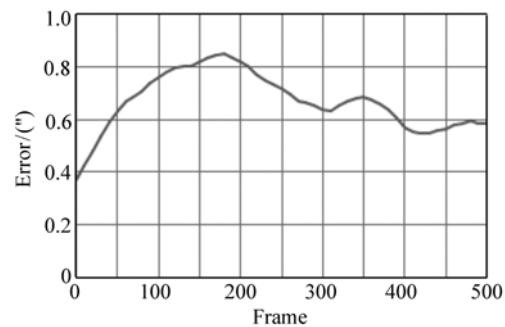


图 6 目标经度误差曲线
Fig. 6 Error curve of target longitude

结果见表1。

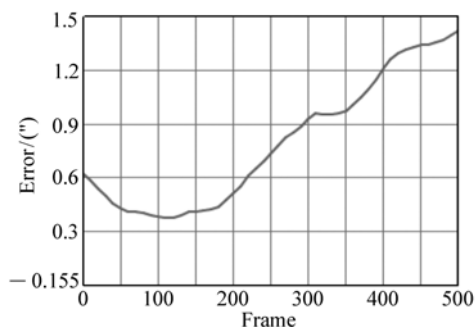


图7 目标纬度误差曲线

Fig.7 Error curve of target latitude

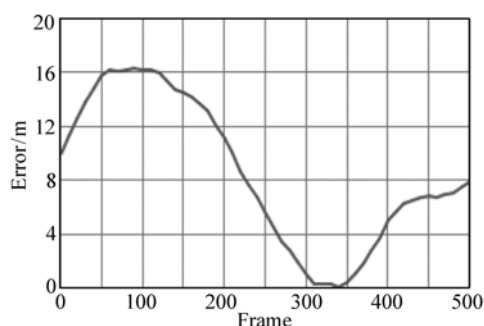


图8 目标高程误差曲线

Fig.8 Error curve of target altitude

表1 交会误差统计结果

Tab.1 Statistical result of intersection error

经度误差/"	纬度误差/"	高程误差/m
0.65	0.82	5.0

从图6~图8显示的误差曲线可以看出,本文提出的交会定位方法可以完成目标定位计算,在存在测量误差情况下,通过误差修正技术,可以将目标经度误差控制在1.0"范围内,目标纬度定位误差控制在1.5"范围内,目标高程误差控制在20 m范围内。在误差定位精度方面,从表1的交

会定位误差统计结果中可以看出,目标经度定位误差为0.65",纬度定位误差为0.82",高程定位误差为5 m。

5 结 论

为解决机载光电平台在未安装距离测量设备情况下的目标定位问题,本文针对机载光电平台特点,通过建立5个坐标系统,构建了从成像系统坐标系到大地地理坐标系的目标交会定位数学模型。

本文借鉴了目前比较成熟的目标定位技术,突破了传统的基于固定基站完成两点交会测量的限制,在机载光电平台实现了动态基站、多点交会测量。文中在交会测量模型构建及算法实现方面进行了有益探索和尝试,根据飞机位置参数、飞机姿态参数和光电平台角度参数,提出了地心直角坐标系下的目标观测直线方程系数的计算方法,介绍了两点交会计算的判定条件,分析讨论了直线交会技术的思路,详细介绍了通过求解线性方程组的方法计算交会坐标的实现过程,通过坐标变换计算目标在大地地理坐标系下的经纬度坐标,通过样本数据实验检验了直线交会定位的计算精度。

在机载光电平台图像跟踪系统捕获目标,伺服控制系统稳定跟踪,实现视轴稳定并指向目标中心情况下,根据飞机位置参数、飞机姿态参数和光电平台角度参数等测量信息,采用直线交会计算方法可以实现机载光电平台对观测目标的定位功能。除此之外,通过对地面目标经纬度标定,可以对测量误差进行修正,有效减小测量误差,提高交会定位精度。飞行试验样本数据实验结果表明,采用本文技术路线和交会方法,交会定位结果和实际测量数据接近,最小定位误差精度差可以达到0.65"。

参考文献:

- [1] 樊邦奎,段连飞,赵炳爱,等. 无人机侦察目标定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
FAN B K, DUAN L F, ZHAO B A, et al. UAV Reconnaissance Target Location Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 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.

- SUN H. Target localization and error analysis for airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
- [3] 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 J. Scientific Instrument*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
- [4] 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 Technology*, 2011, 33(10): 593-597. (in Chinese)
- [5] 王英, 曾光宇. 双线阵 CCD 交会测量立靶精度系统研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(10): 33-38. LWANG Y, ZENG G Y. Intersection measuring system of erecting target with dual liner CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 33-38. (in Chinese).
- [6] 刘旨春, 郭立红, 关文翠, 等. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1823-1830.
LIU Z CH, GUO L H, GUAN W C, et al. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1823-1830. (in Chinese)
- [7] 卢海波. 光电经纬仪与雷达交会测量[J]. *长春理工大学学报*, 2009, 26(3): 92-95.
LU H B. The method of intersection measure with E-O theodolite and radar in different station[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2009, 26(3): 92-95. (in Chinese)
- [8] 刘鑫伟, 胡云安, 刘亮. 光电经纬仪双站交会测量算法改进及其误差分析[J]. *海军航空工程学院学报*, 2012, 27(5): 499-502.
LIU X W, HU Y A, LIU L. An improved data processing method and error analysis on trajectory measurement by intersection of two photoelectric theodolites in shooting range[J]. *J. Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2012, 27(5): 499-502. (in Chinese).
- [9] 孙泽林, 王昭, 翟唤春. 双经纬仪交会测量火炮调炮精度的误差分析与抑制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2434-2441.
SUN Z L, WANG ZH, ZHAI H CH. Analysis and control of error on two theodolites intersection measurement for gun rotated accuracy of artillery[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2434-2441. (in Chinese)
- [10] 张涛, 李雪雷, 米阳. 光电经纬仪数据交会误差分析[J]. *智能计算机与应用*, 2013, 3(3): 50-52.
ZHANG T, LI L L, MI Y. Error analysis of theodolite data intersection[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2013, 3(3): 50-52. (in Chinese)
- [11] 曹志刚, 柴春红, 王正武, 等. 机载雷达的空中定位研究[J]. *航空计算技术*, 2005, 35(2): 102-104.
CAO ZH G, CHAI C H, WANG ZH W, et al. Research of air localization by airborne radar[J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2005, 35(2): 102-104. (in Chinese)
- [12] 田隽, 钱建生, 李世银, 等. 自适应多测量融合粒子滤波的视场跟踪[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2254-2261.
TIAN J, QIAN J S, LI SH Y, et al. Visual tracking with adaptive multi-cue fusion particle filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2254-2261. (in Chinese)
- [13] 闫辉, 许廷发, 吴青青, 等. 多特征融合匹配的多目标跟踪[J]. *中国光学*, 2014, 6(2): 163-170.
YAN H, XU T F, WU Q Q, et al. Multi-object tracking based on multi-feature joint matching[J]. *Chinese Optics*, 2014, 6(2): 163-170. (in Chinese)
- [14] 庞新良, 范大鹏, 滕旭东, 等. 数字式机载光电伺服系统的实现[J]. *光电工程*, 2007, 34(3): 10-15.
PANG X L, FAN D P, TENG X D, et al. Realization of digital airborne opto-electronic servo-system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(3): 10-15. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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)

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方面的研究。E-mail:sunh@ciomp.ac.cn



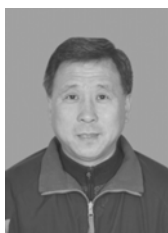
韩松伟(1980—),男,吉林蛟河人,助理研究员,主要从事电路设计、信号、图像处理技术方面的研究。E-mail:hsw2109@sina.com



李志强(1980—),男,吉林白城人,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事基于DSP及FPGA的数字通讯技术方面的研究。E-mail:mybugatti@126.com



宋玉龙(1980—),男,山东济宁人,博士,副研究员,主要从事基于FPGA的高速信号处理技术方面的研究。E-mail:songyl@ciomp.ac.cn



张建华(1958—),男,吉林长春人,高级实验师,主要从事电子学技术方面的研究。E-mail:13450065232@qq.com