

框幅式航测相机中像移量对直接地理定位精度影响的研究

赵嘉鑫^{1,2}, 张涛¹, 张景国¹, 远国勤¹

(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: 在航空摄影测量中, 载机前向飞行和姿态旋转引起的像移模糊会为同名像点的量测引入误差, 使共线方程偏离共线的条件, 进而导致直接地理定位的精度下降。为定量分析像移对物点直接定位的影响, 从摄影测量的共线方程出发, 在充分考虑前向飞行和姿态旋转的条件下, 建立了框幅式相机中 CCD 靶面各点像移量的数学模型。根据该模型计算出像移轨迹中的质心坐标和其对应的曝光时标, 并以质心确定同名像点坐标, 以中心曝光时间作为曝光时标以获得对应的外方位元素。仿真结果表明, 在理想条件下, 以上述方法进行双像前方交会的物方定位误差最大为 0.12 mm, 有效降低了像移对直接地理定位的影响。文中为分析框幅式航测相机中像移量对位置精度的影响和曝光时标的确定提供了理论依据。

关键词: 遥感; 像移; 共线方程; 直接地理定位; 航空测绘

中图分类号: V447.3; TN942.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0632-07

Study of the effects on frame aerial photography direct-georeferencing accuracy caused by image motion

Zhao Jiaxin^{1,2}, Zhang Tao¹, Zhang Jingguo¹, Yuan Guoqin¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging 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)

Abstract: In aerial photogrammetry, image motion blur due to aircraft forward flight and rotation is one of the error resources in image coordinate measurement, which could lead to misalignment in collinearity equation and accuracy decline in direct georeferencing. For the purpose of analysis the influence of image motion blur on direct georeferencing, the motion blur of frame imagery was modeled based on collinearity equation with consideration of both rotation and translation movement. The linearity approximation equation was also derived. Analysis shows that the centroid of smear track could be used as image point in intersection only with mid-exposure time as the nominal photo exposure time to eliminate the blur problem in image measurement. Simulation result shows that maximum RMS in object space could be reduce to 0.12 mm by using the method above.

Key words: remote sensing; image motion; collinearity equation; direct georeferencing; aerial photography

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61308099)

作者简介: 赵嘉鑫(1985-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。Email: jxchao@126.com

0 引言

在航空摄影测量中,直接定位法(Direct Georeferencing)是将航摄相机与定位定向系统(POS)集成在一起,通过直接获得相片在曝光时标(Event Time Stamp)的 6 个外方位元素从而大大减少地面控制点和空三作业来直接进行航空影像的空间地理定位的一种方法^[1-3]。而由于受到探测器感光度的限制,航摄相机需要保证一定的曝光时间,因此每张相片的曝光时标并不是无限短的“时刻”,而是一个时间区间。在这个时间区间内,由于载机的前向飞行、姿态变化等原因,使被摄影物影像与 CCD 之间存在相对的前向运动和旋转运动,产生前向像移和旋转像移^[4-5]。像移对摄影测量有两方面的影响:一是像移模糊使不同目标的像相互混叠、使目标对比度和分辨率下降,影响图像质量;另一方面,像移模糊也给地面物体的像点坐标量测引入了较大误差,这种误差和透镜畸变、大气折光等引起的像点误差带来的影响一样,都会使像点、投影中心和物点偏离三点共线的条件。由于直接定位法没有地面控制点参与平差,因此对误差非常敏感,如果不进行像点位置纠正,则对直接定位的成果精度有很大的影响^[6-7]。

目前,学者对像移量的研究主要集中在:在不同的假设条件下,建立像移的数学模型以进行误差分配或作为像移补偿机构设计的依据,以减小像移量对像质的影响。如参考文献[4]较早研究了用矢量几何分解求解旋转像移量的方法;参考文献[5]首先用共线方程推导了像移矢量以用于设计像移补偿机构,但其非线性解并不易计算;参考文献[8-9]利用坐标变换求解了像移速度矢量;参考文献[10]利用共线方程给出了像面中心点旋转像移量的近似解;参考文献[11]用 Monte Carlo 方法对旋转像移量进行了误差分析。而对于像移带来的像点误差对定位的影响,则少有研究。

在摄影测量的直接定位法测图中,需要对 IMU 漂移误差、集成系统误差、各传感器之间的时间同步误差、畸变误差等各类误差进行严格的纠正以提高定位精度^[12-14]。而像移带来的像点误差是由曝光时间内投影光束的变化导致的,是曝光时间、飞行速度等参数的函数,因此无法和其他像点误差一样可以

通过实验室或检校场进行标定。但在曝光时间内,由连续移动的像点所构成的像移轨迹实际上对应着连续变化的外方位元素序列,因此存在这样一种可能:在像移轨迹中选择合适的特征像点(如质心),并以该点对应的时标 t 作为相片的曝光时标,再通过 POS 数据的内插得到 t 对应的外方位元素来满足三点共线条件,以提高定位精度。

文中的主要目标是:从共线方程出发,在全面考虑载机平台前向运动和旋转运动的情况下,推导框幅式航测相机中 CCD 靶面各点像移量的解析式,并根据其解析式,在像移轨迹中求解质心坐标用以确定像点坐标,推出质心对应的曝光时标 t ,并以 t 作为相片的曝光时标获得对应外方位元素做双像前方交会求解物方坐标,并统计误差。

1 像移量分析

像移的示意图如图 1 所示。在曝光时间内,由于载机的前向飞行和姿态改变,使投影中心的位置(外方位元素的线元素)和投影光束的方向(外方位元素的角元素)发生了变化,因此物点 A 在 CCD 像面上产生了前向像移和旋转像移。其中,曝光初始时刻 t_0 物点 A 在 CCD 上的像点位置为 a_0 , 经过曝光时间 t 后的像点位置为 a_t , 像移矢量为 $\overrightarrow{a_0a_t}$ 。

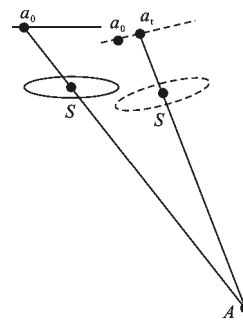


图 1 像移示意图

Fig.1 Generation of image motion

1.1 坐标系定义

文中采用 φ 、 ω 、 κ 转角系统坐标系^[15],投影时的三点共线如图 2 所示。 S 为曝光初始时刻 t_0 的投影中心, $O-XYZ$ 为地辅坐标系, $S-O$ 为相机主光轴, A 为物点, a 为物点 A 在像片上的投影。 $S-xyz$ 首先绕 OY 轴方向转动 φ 角,再绕 $S-x$ 轴转动 ω 角,再绕 $S-z$ 轴转动 κ 角,构成绕连动轴转动的 $S-xyz$ 相片坐标

系。规定 $O-Y$ 方向为飞行方向, H 为平均航高, f 为主距, 物点 A 在 $O-XYZ$ 中的坐标为 $[X_A, Y_A, Z_A]^T$ 。

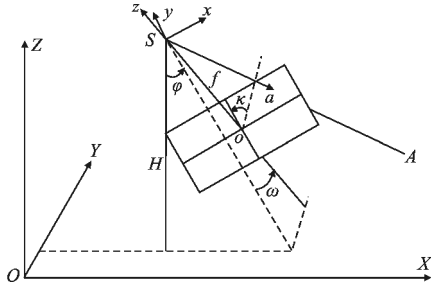


图 2 坐标系中的三点共线条件

Fig.2 Colinearity situation of three points

1.2 像点位置分析

设物点 A 为已知量时, 可以通过共线方程反求出曝光时间前后的像点位置。

1.2.1 曝光初始时刻的像点位置

正直摄影时, 由于稳定平台的位置稳定误差, 像面发生偏转, 造成相机实际对地倾斜成像。假设 t_0 时刻, 地面上物点 A 对应像点在像空间坐标为 $[x(t_0), y(t_0), -f]^T$ 。设 φ, ω, κ 为稳定平台的补偿角残差, 同时假设主点 $x_0=0, y_0=0$, 主距 f 为已知值。在曝光开始时刻 t_0 可得旋转矩阵 $R(t_0)$ 为:

$$R(t_0) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & -\cos\omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(t_0) & a_2(t_0) & a_3(t_0) \\ b_1(t_0) & b_2(t_0) & b_3(t_0) \\ c_1(t_0) & c_2(t_0) & c_3(t_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

此时物点 A 对应的像点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x(t_0) \\ y(t_0) \\ -f \end{bmatrix} = \lambda(t_0)^{-1} R(t_0)^{-1} \begin{bmatrix} X_A - X_S \\ Y_A - Y_S \\ Z_A - Z_S \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:

$$\lambda = \frac{Z_A - Z_S}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \quad (3)$$

由公式(1), 得共线方程如下:

$$x(t_0) = -f \frac{a_1(t_0)(X_A - X_S) + b_1(t_0)(Y_A - Y_S) + c_1(t_0)(Z_A - Z_S)}{a_3(t_0)(X_A - X_S) + b_3(t_0)(Y_A - Y_S) + c_3(t_0)(Z_A - Z_S)} \quad (4)$$

$$y(t_0) = -f \frac{a_2(t_0)(X_A - X_S) + b_2(t_0)(Y_A - Y_S) + c_2(t_0)(Z_A - Z_S)}{a_3(t_0)(X_A - X_S) + b_3(t_0)(Y_A - Y_S) + c_3(t_0)(Z_A - Z_S)} \quad (5)$$

1.2.2 曝光结束时刻的像点位置

曝光过程中, 通常载机的前向速度远大于天向速

度和旁向速度, 因此载机的飞行主要产生前向像移。为简化计算, 假设速度方向与 $O-Y$ 轴正方向相同。因此, 摄站 S 坐标在曝光结束后变为 $(X_S, Y_S + Vt, Z_S)$ 。

另外, 曝光时间内, 稳定平台的补偿位置也发生了变化。由于 t 较小, 可以假设稳定平台的姿态补偿导致的光束角元素是匀速变化的, 令角速度补偿残差为 $\dot{\varphi}, \dot{\omega}, \dot{\kappa}$, 则此时的旋转矩阵 $R(t_0+t)$ 为:

$$R(t_0+t) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \dot{\varphi}t) & 0 & -\sin(\varphi + \dot{\varphi}t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi + \dot{\varphi}t) & 0 & \cos(\varphi + \dot{\varphi}t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega + \dot{\omega}t) & -\sin(\omega + \dot{\omega}t) \\ 0 & \sin(\omega + \dot{\omega}t) & -\cos(\omega + \dot{\omega}t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\kappa + \dot{\kappa}t) & -\sin(\kappa + \dot{\kappa}t) & 0 \\ \sin(\kappa + \dot{\kappa}t) & \cos(\kappa + \dot{\kappa}t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(t) & a_2(t) & a_3(t) \\ b_1(t) & b_2(t) & b_3(t) \\ c_1(t) & c_2(t) & c_3(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到经过 t 时间曝光后, 物点 A 在像面上对应像点的坐标:

$$x(t_0+t) = -f \frac{a_1(t)(X_A - X_S) + b_1(t)(Y_A - Y_S - Vt) + c_1(t)(Z_A - Z_S)}{a_3(t)(X_A - X_S) + b_3(t)(Y_A - Y_S - Vt) + c_3(t)(Z_A - Z_S)} \quad (7)$$

$$y(t_0+t) = -f \frac{a_2(t)(X_A - X_S) + b_2(t)(Y_A - Y_S - Vt) + c_2(t)(Z_A - Z_S)}{a_3(t)(X_A - X_S) + b_3(t)(Y_A - Y_S - Vt) + c_3(t)(Z_A - Z_S)} \quad (8)$$

1.3 像移量分析

根据物点 A 在曝光时间前后的像点位置, 可以得到像移量如下式所示:

$$e_x = x(t_0+t) - x(t_0) \quad (9)$$

$$e_y = y(t_0+t) - y(t_0) \quad (10)$$

将公式(9)和公式(10)线性化, 即将 $x(t_0+t)$ 在 $x(t_0)$ 处进行泰勒一阶近似:

$$e_x = \frac{\partial x}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial x}{\partial Y_S} \Delta Y_S \quad (11)$$

$$e_y = \frac{\partial y}{\partial \varphi} \Delta\varphi + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \Delta\kappa + \frac{\partial y}{\partial Y_S} \Delta Y_S \quad (12)$$

式中: $\Delta\varphi = \dot{\varphi}t, \Delta\omega = \dot{\omega}t, \Delta\kappa = \dot{\kappa}t, \Delta Y_S = Vt$ 。

由于角误差残差和角速度残差为小值, 所以在公式(11)、公式(12)中, 取小角近似, 同时取关于角残差的一阶项有:

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi} = y(t_0)\omega - \frac{x(t_0)}{f}[x(t_0) - y(t_0)\kappa] - f \quad (13)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = -f\kappa - \frac{x(t_0)}{f}[x(t_0)\kappa + y(t_0)] \quad (14)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa} = y(t_0) \quad (15)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_s} = -\frac{1}{H_A}(\kappa f - \omega x(t_0)) \quad (16)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = -x(t_0)\omega - \left\{ \frac{y(t_0)}{f}[x(t_0) - y(t_0)\kappa] - f\kappa \right\} \quad (17)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega} = -f - \frac{y(t_0)}{f}[x(t_0)\kappa + y(t_0)] \quad (18)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \kappa} = -x(t_0) \quad (19)$$

$$\frac{\partial y}{\partial Y_s} = \frac{1}{H_A}(\varphi x(t_0) + 2\omega y(t_0) - f) \quad (20)$$

式中: $H_A = Z_s - Z_A$ 。整理上式成矩阵形式,有:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = R_{av} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\kappa} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\kappa} \\ \dot{\kappa} \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} + R_a \begin{bmatrix} \varphi \\ \omega \\ \kappa \end{bmatrix} + R_v \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} + Lt \quad (21)$$

其中

$$R_{av} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & y(t_0) & 0 & 0 & \frac{x(t_0)y(t_0)}{f} & -f - \frac{x^2(t_0)}{f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x(t_0) & 0 & 0 & \frac{y^2(t_0)}{f} + f & -\frac{x(t_0)y(t_0)}{f} & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$R_a = \begin{bmatrix} 0 & \frac{x(t_0)}{H_A}V & -\frac{f}{H_A}V \\ \frac{x(t_0)}{H_A}V & \frac{2y(t_0)}{H_A}V & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$R_v = \begin{bmatrix} -f & -\frac{x(t_0)y(t_0)}{f} & y(t_0) \\ -\frac{x(t_0)y(t_0)}{f} & -f - \frac{y^2(t_0)}{f} & -x(t_0) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$L = [0 \quad -f/H_A \cdot V]^T \quad (25)$$

由上面的分析和公式(21)~(25)可知:

(1) 当 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\omega}$ 、 $\dot{\kappa}$ 较小时, e_x 和 e_y 可以近似为曝光时间 t 的一阶函数,同时有 $e_y = Cxe_x$, 其中 C 是与 t 无关的量。

(2) e_x 和 e_y 与 CCD 上种子点的位置相关, 不同种子点的像移大小和方向不同。

(3) 当 φ 、 ω 、 κ 和 $\dot{\varphi}$ 、 $\dot{\omega}$ 、 $\dot{\kappa}$ 较小时, e_x 也会较小, 而 e_y 会受 $f/H_A \cdot Vt$ 较大的影响, 说明飞行速度和摄影比例尺主要影响 Y 方向(飞行方向)的像移。当 $f/H_A \cdot Vt$ 较大时, 相机需要进行前向像移补偿。

1.4 种子点的像移量仿真

为研究面阵 CCD 靶面上不同位置坐标的像移情况, 在 CCD 靶面均匀选择 300 个种子点。为分析飞行参数、稳定平台参数和相机参数对像移的影响, 仿真中不引入随机误差, 平台角补偿残差和角速度补偿残差作为系统误差处理, 并假设地面平坦($H_A = H$)。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameter

Parameter	Value
CCD pixel size/ μm	9
Focal length/mm	120
Residual attitude deviation/ $^\circ$	0.5
Residual angular motion/ $^\circ \cdot \text{s}^{-1}$	0.3
Exposure time/ms	5
Flight height/m	2000
Velocity/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	110

根据公式(21)仿真得到不同像点像移量大小如图 3 所示, 统计结果如表 2 所示。

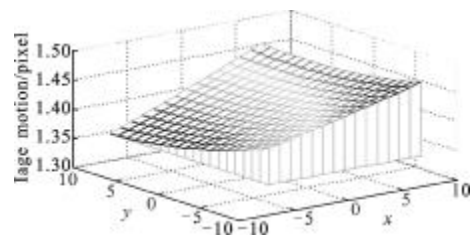


图 3 CCD 各种子点像移量

Fig.3 Image motion magnitude of CCD seed points

表 2 像移量仿真统计结果

Tab.2 Image motion simulation statistics

	Max/pixel	Min/pixel	Mean error/pixel	RMS/pixel
x	-0.444 0	-0.299 1	-0.003 2	0.003 1
y	1.4210 3	-1.313 6	0.000 2	0.000 4

从仿真结果可知:

(1) 公式 (21) 推出的近似像移量的 RMS 约为 0.003 1 个像素, 说明像移量的一阶近似解可以很好的逼近理论值。

(2) CCD 上不同位置的像点像移大小和方向不相同,但飞行方向(y 方向)的像移量大于旁向(x 方向)一个量级。

(3) 在仿真条件下,最大像移量为 1.475 个像素,满足国内数字航空摄影规范中关于框幅式数字航空摄影的标准^[16]。

2 像点位置与曝光时标的确定

当曝光时间较长时,存在两个问题:如何在像移模糊图像中确定像点位置;如何确定相片的曝光时标。对于第一个问题,目前通常是使用数字摄影测量工作站、采用定位算子等方法,进行半自动或全自动的控制点像点坐标量测,通过最小二乘相关或基于特征的方法匹配同名点^[17],而存在像移模糊的图像很容易引入像点位置量测误差。而对于第二个问题,通常由航摄仪根据指令和计算的拍照周期等参数在预定的摄站附近进行曝光并产生摄影脉冲,POS 系统根据该摄影脉冲记录其对应的 GPS 时间(Event Time),并用内插获得该时间对应的外方位元素。如果 POS 记录的时间与实际曝光时标存在偏差,则会引入曝光时间同步误差^[18]。因此,像移引起的像点位置变化和曝光时标的确定是相关的,如果选择合适的特征像点,并求出该像点对应的曝光时标,则可以减小上述误差对定位的影响。

数字摄影测量中,用于同名点匹配的像点通常是航摄相片中的明显特征点(如角点),这些点的特征之一是在某一较小邻域内其灰度值明显区别于图像背景,因此在发生运动模糊后,也会产生较明显的像移模糊轨迹^[19]。在做同名点坐标量测时,不难获得相邻像对中同名点像移模糊轨迹的质心坐标。因此不妨以质心坐标作为同名像点的坐标,再求解其所对应的时标,最后以该时标作为曝光时标来获得其对应的外方位元素值。

像移轨迹质心坐标计算如下:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\int_L x\rho(x,y)ds}{\int_L \rho(x,y)ds} \\ y_c = \frac{\int_L y\rho(x,y)ds}{\int_L \rho(x,y)ds} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\rho(x,y)$ 为像移轨迹中坐标 (x,y) 处的灰度值,在假设像移轨迹中的灰度值是均匀分布且不考虑

CCD 尺寸的理想情况下, $\rho(x,y)=C$ 。L 为像移轨迹的函数,根据公式(9)和公式(10),L 可以近似为:

$$\begin{cases} x(t)=x(t_0)+e_x(t) \\ y(t)=y(t_0)+e_y(t) \end{cases} \quad (27)$$

根据公式(21),并考虑到像移量 $e_x(t)$ 和 $e_y(t)$ 近似为 t 的一阶齐次函数,不难得到:

$$x_c = \frac{\int_{x(t_0)}^{x(t)} x \sqrt{1 + \left(\frac{de_y(t)}{de_x(t)}\right)^2} dx}{\int_{x(t_0)}^{x(t)} \sqrt{1 + \left(\frac{de_y(t)}{de_x(t)}\right)^2} dx} = x(t_0) + \frac{1}{2} e_x(t) = x(t_0) + e_x\left(\frac{1}{2}t\right) \quad (28)$$

$$y_c = \frac{\int_{y(t_0)}^{y(t)} y \sqrt{1 + \left(\frac{de_x(t)}{de_y(t)}\right)^2} dy}{\int_{y(t_0)}^{y(t)} \sqrt{1 + \left(\frac{de_x(t)}{de_y(t)}\right)^2} dy} = y(t_0) + \frac{1}{2} e_y(t) = y(t_0) + e_y\left(\frac{1}{2}t\right) \quad (29)$$

由公式(28)~(29)可知,像移轨迹质心的位置为曝光过程中像点在中心曝光时间的位置,因此,像移轨迹质心对应中心曝光时间的外方位元素。据此可以确定像点坐标和相片的曝光时标,以实现三点共线的条件并减小像移对定位引入的问题。

3 定位误差仿真分析

在假定质心定位准确的理想情况下,为分析将中心曝光时间作为曝光时标的定位效果,将曝光时间 t 进行分割,步长为 0.02 ms,将每个时刻分别作为不同的曝光时标进行仿真。

仿真输入的物方坐标为平面上均匀分布的 200 个点,其高程坐标假设服从 $N-(0,40)$ 分布。在平均航高为 2 000 m 的两个投影中心分别成像,左片和右片的重叠率满足 60%。同名像点坐标使用由公式(28)~(29)确定的像移轨迹质心坐标,在对应不同曝光时标的外方位元素的情况下,利用双像前方交会求解物点坐标,并统计高程坐标和平面坐标的 RMS。为分析像点误差和曝光时刻误差的影响,仿真中不引入如像主点误差、主距误差等其他误差项,同时将稳定平台的误差作为系统误差,仿真参数见表 1,仿真结果见图 4 和图 5。

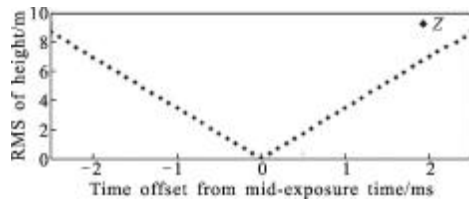


图 4 高程中误差

Fig.4 RMS of height

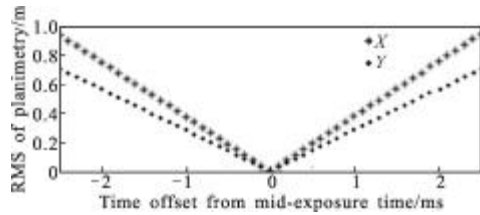


图 5 平面中误差

Fig.5 RMS of planimetry

从上图可以看出,当确定的曝光时标偏离中心曝光时间时,所引起的外方位元素误差会传递到物方定位中。曝光时标偏离中心曝光时间越大,引起的定位误差越大,而高程误差较平面误差大。用中心曝光时间作为曝光时标进行前方交会得到的物方坐标的 RMS 最小,在 X、Y、Z 三个方向的 RMS 分别为 0.009 mm, 0.01 mm, 0.12 mm; 如果用偏离最大的时刻作为曝光时标,在 X、Y、Z 三个方向的 RMS 分别为 0.715 m, 0.951 m, 8.742 m。因此,用像移轨迹质心坐标作为同名像点的坐标并将中心曝光时间作为曝光时标可有效减小像移对物方定位的影响。这一方面需要配准算法精确的获得像移轨迹中心,另一方面需要严格控制 POS 与快门之间的时间同步误差。这方面的问题超出了文中的范围,不作讨论。

4 结论

在航空摄影测量中,由于载机平台的姿态变化,使像点在曝光期间内产生像移。像移模糊一方面使图像质量下降,另一方面为像点的量测引入了误差。这种像点误差和透镜畸变、大气折光引起的像点位置误差不同的是:物方某一点在像面上的成像不单是偏离理想像点,而是一个像移轨迹,该轨迹与成像过程中的飞行速度、姿态变化速度和曝光时间相关,因此无法通过实验室和检校场进行标定。但是可以通过选择像移轨迹的质心,并求出该质心对应的时标以作为整幅照片的曝光时标,以该曝光时标对应

的外方位元素进行前方交会求解物方坐标。

测绘相机用于直接定位时,由于没有控制点参与平差,因此需要对各种误差进行严密的分析和控制以提高精度。像移无疑会对直接地理定位产生影响,该影响又与时间同步误差具有一定的联系,如果抛开像移量单纯讨论时间同步误差是不完全的。本文就尝试用共线方程推导出像移量关于曝光时间的线性解析式,推导出其像移轨迹质心坐标的计算方法,为分析像移量提供了理论依据。

为定量的分析像移对定位的影响,文中从共线方程出发,推导出像移量的解析式,并进行了一阶近似。通过近似解,得到质心坐标,并推出质心对应的时标是中心曝光时间。仿真数据表明,在选择同名像点的质心作为像点坐标、并选择中心曝光时间作为相片曝光时标的情况下,向物点定位引入的误差最大为 0.12 mm,可以有效减小像移对定位的影响。

参考文献:

- [1] Li Deren, Wang Shugen, Zhou Yueqin. An Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008: 164-169. (in Chinese)
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.
- [2] Cramer M, Stallmann D, Haala N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications[J]. Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3): 198-205.
- [3] Guo Dahai. Theory and Practice of Airborne Pos-Supported Photogrammetry Technique [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:1-2. (in Chinese)
郭大海. 机载 POS 系统直接地理定位技术理论与实践[M]. 北京:地质出版社, 2009: 1-2.
- [4] Kawachi D. Image motion due to camera rotation [J]. Photogrammetric Engineering, 1965, 31(5): 861-867.
- [5] Sanjib Ghosh. Image motion compensation through augmented collinearity equations [J]. Optical Engineering, 1985, 24(6): 1044-1017.
- [6] Yuan Xiuxiao. A novel method of systematic error compensation for a position and orientation system [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(8): 953-963.
- [7] Yuan Xiuxiao, Zhang Xueping. Theoretical accuracy of direct georeferencing with position and orientation system in aerial photogrammetry[C]//ISPRS, 2008, 37(B1): 617-622.

- [8] Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang et al. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1585-1589. (in Chinese)
王家骥, 于平, 颜昌翔, 等. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [9] Zhai Linpei, Liu Ming, Xiu Jihong. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 490-494.
- [10] Zhang Dexin, Ma Guangfu, Qu Guozhi. Calculating attitude disturbance image motion of one aerial reconnaissance CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 30-33. (in Chinese)
张德新, 马广富, 曲国志. 某型航侦 CCD 相机姿态扰动像移计算[J]. *光电工程*, 2010, 37(3):30-33.
- [11] Xu Yongsen, Ding Yalin, Tian Haiying. The simulation of aerial remote sensor's gesture image motion [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1304-1306. (in Chinese)
许永森, 丁亚林, 田海英. 航空遥感器姿态像移仿真分析[J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1304-1306.
- [12] Jan Skaloud. Problems in direct georeferencing by INS/DGPS in the airborne environment[C]//ISPRS Workshop Barcelona, 1999.
- [13] Cramer M. Direct Geocoding-is aerial triangulation obsolete [J]. *Photogrammetric Week*, 1999: 59-70.
- [14] Mostafa M M R, Hutton J, et al. Direct georeferencing of frame imagery-an error budget [C]//Proceedings, The Third International Mobile Mapping Symposium, 2001(1): 3-5.
- [15] Wang Zhizhuo. Principles of Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007:7-8. (in Chinese)
王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 7-8.
- [16] National Standardization Technical Committee. GB/T 27920.1-2011. Specification for digital aerial photography-Part 1: Frame digital aerial photography[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.(in Chinese)
国家标准化管理委员会. GB/T 27920.1-2011. 数字航空摄影规范 第 1 部分: 框幅式数字航空摄影[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [17] Zhang Zuxun. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.(in Chinese)
张祖勋. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.
- [18] Jan Skaloud. Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS [D]. Calgary: The University of Calgary, 1999: 116-117.
- [19] Boracchiand G, Caglioti V. Motion blur estimation at corners [C]//Proceedings of VISAPP 2007 Conference, Barcelona, 2007.