

WANG Tao, ZHANG Yongsheng, ZHANG Yan, et al. Airborne Linear CCD Sensor Geometric Calibration Based on Self-calibration [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 393-400. (王涛, 张永生, 张艳, 等. 基于自检校的机载线阵 CCD 传感器几何标定 [J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 393-400.)

基于自检校的机载线阵 CCD 传感器几何标定

王涛, 张永生, 张艳, 范大昭

信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052

Airborne Linear CCD Sensor Geometric Calibration Based on Self-calibration

WANG Tao, ZHANG Yongsheng, ZHANG Yan, FAN Dazhao

Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: The self-calibration bundle block adjustment technique based on the additional parameters is applied to the airborne linear CCD sensor geometric calibration. Taking the ADS40 sensor for example, the integrated sensor imaging relationship is analyzed firstly, and then the GPS observations model, the IMU misalignment angle model are introduced. The self-calibration bundle block adjustment model for the calibration is set up. Upon the detailed investigation on the imaging error properties, the suitable sensor calibration parameter model is built up. Finally the ADS40 data on the test field is used for the calibration experiments. Experimental results prove that the geometric calibration method is correct and effective, which can significantly improve the measuring accuracy and the reliability.

Key words: airborne linear CCD sensor; self-calibration bundle block adjustment; ADS40; geometric calibration

摘要: 将基于附加参数的自检校光束法区域网平差技术应用于机载线阵 CCD 传感器几何标定中, 以 ADS40 为对象, 分析集成传感器成像几何关系, 引入 GPS 观测值数学模型和 IMU 视轴偏心角模型, 建立用于标定的自检校光束法区域网平差模型; 在深入分析机载三线阵 CCD 传感器成像误差特性的基础上, 建立有效的相机标定参数模型; 并采用检校场 ADS40 数据进行了标定试验, 结果表明几何标定方法可行有效, 可显著提高测量精度和可靠性。

关键词: 机载线阵 CCD 传感器; 自检校光束法区域网平差; ADS40; 几何标定

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0393-08

基金项目: 国家自然科学基金(41001262); 对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(K201004); 信息工程大学测绘学院自立课题(Y201001)

1 引言

发展和使用 CCD 数字航空摄影系统是当前摄影测量发展的一个方向。机载数字传感器 ADS40 (airborne digital sensor) 是最具代表性的测量型数字航摄仪之一, 它采用三线阵 CCD 扫描成像模式, 并通过集成 POS (positioning and orientation system), 能够在航空摄影的同时记录成像时刻影像外方位元素^[1]。

为精确测定传感器成像参数, 航测仪出厂前要在实验室经过严格标定, 但由于难以顾及温度、气压、平台震颤等动态成像影响因素, 难免出现偏差; 同时长期使用造成的损耗及老化, 也会使成像参数发生变化。因此如何准确、及时获取航摄条件下成像参数是实现影像高精度定位的关键, 采用航摄飞行标定是切实可行的方法。国内外曾针对传统胶片式模拟相机进行过大量研究和实践,

但机载线阵 CCD 传感器在成像特性和作业流程上与传统方式有较大区别, 集成 POS 系统也带来传感器空间关系测定等问题, 标定内容多, 解算难度大, 现有的标定方法难以完全适用。

欧洲空间数据研究中心 EuroSDR、瑞士苏黎世理工大学、Leica 公司等国外有关单位积极开展机载数字传感器的性能评估与几何标定工作^[2-9]。针对 ADS40, 文献^[10]介绍了 Leica 公司进行几何标定的原则、方法和主要步骤; 文献^[11-16]等则从影像自检校平差的角度分别就平差模型构建、附加参数设置、精度分析和评估等方面进行了研究和试验。文献^[17]基于自检校技术设计了 ADS40 相机检校方案, 并基于 ORIMA 软件系统进行了试验, 效果明显。但总体看该技术领域的发展尚不成熟, 在模型设置、参数解算等具体技术环节上仍有待深入探讨, 尤其缺乏针对机载线阵 CCD 传感器的专项研究。为此,

本文从分析 ADS40 集成传感器成像几何关系入手,引入 GPS 观测值数学模型、IMU 视轴偏心角模型,在此基础上根据机载三线阵传感器成像误差特性分析设计了相机自检校误差参数模型以及用于标定的自检校光束法区域网平差模型,并以登封遥感检校场 ADS40 数据来验证所建立模型的正确性和方法的可行性。

2 ADS40 集成传感器成像几何关系

ADS40 为三线阵扫描航摄影仪,集成有 GPS/IMU 系统(图 1)。为能直接测量外方位元素,最理想的安装方式是将机载 GPS 天线和 IMU 安置在摄影相机物镜的后节点上,且使 IMU 三轴线 (X_b, Y_b, Z_b) 与相机坐标轴 (X_c, Y_c, Z_c) 严格平行,但在实际应用中却不可能完全做到。因此 GPS 天线相位中心相对相机投影中心总会存在固定的位置偏移,称为 GPS 偏心矢量;而 IMU 坐标轴与相机轴线之间总会存在微小的角度差,称为 IMU 视轴偏心角。同时 GPS 和 IMU 系统还都存在漂移特性,尤以 IMU 为甚,称为漂移误差,仅利用 IMU 与 GPS 数据进行卡尔曼滤波难以完全消除。在实际应用中, GPS 偏心矢量可在航空摄影前通过地面测量得到,并在后处理过程中予以改正;IMU 轴线一般不可视,难以直接测量偏心角,必须通过航摄飞行进行标定。因此对集成传感器航空遥感系统,除了要进行摄影相机成像参数标定外,如镜头畸变、CCD 变形和移位等,还包括 GPS、IMU 与相机空间相对方位的解算和确定。

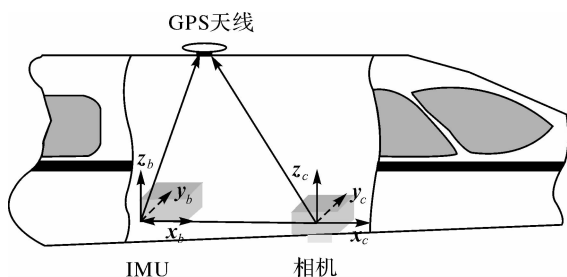


图 1 GPS/IMU 辅助航空摄影系统

Fig. 1 Aerial photography system equipped with GPS/IMU

2.1 GPS 观测值数学模型的建立^[18]

如图 2 所示,设 GPS 天线相位中心 A 点在像空间辅助坐标系 $S-uvw$ 中的坐标为 (u, v, w) , 则有

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

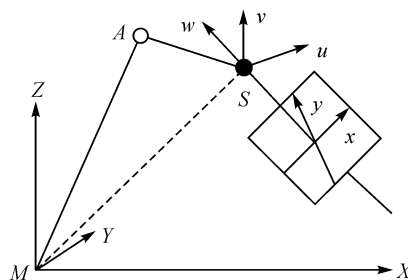


图 2 机载 GPS 定位原理

Fig. 2 Positioning principle of aerial system with GPS

基于载波相位观测量的动态 GPS 定位,在时间不太长的航摄飞行中,会产生随航摄时间线性变化的系统误差^[19],一般称为 GPS 平移和漂移误差,在式(1)中引入该系统误差改正模型

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + (t - t_0) \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, t_0 为参考时刻; $a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z$ 统称为摄站坐标的系统漂移参数。将 GPS 摄站坐标引入后会增加偏心分量 u, v, w 和线性漂移误差改正参数等未知数。于是 GPS 摄站坐标误差方程形式为

$$\begin{bmatrix} v_{X_A} \\ v_{Y_A} \\ v_{Z_A} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\omega \\ \Delta k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \end{bmatrix} + \mathbf{R} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{bmatrix} + (t - t_0) \begin{bmatrix} \Delta b_x \\ \Delta b_y \\ \Delta b_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}^0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{A} 为 GPS 摄站坐标 X_A, Y_A, Z_A 对未知数

φ, ω, κ 所求一阶偏导数, $\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}^0$ 为未知数近似值

代入式(2)求得的 GPS 摄站坐标。

上式写成矩阵形式为

$$\mathbf{V}_{\text{GPS}} = \mathbf{A}\mathbf{t} + \mathbf{R}\mathbf{r} + \mathbf{D}\mathbf{d} - \mathbf{L}_{\text{GPS}} \quad (4)$$

它是 GPS 摄站坐标的观测方程,式中, \mathbf{V}_{GPS} 为

GPS 摄站观测坐标值的改正数向量; t 为像片外方位元素未知数的增量向量; r 为偏心分量未知数的增量向量; d 为线性漂移误差改正数向量; \bar{A} 为对应于 t 的系数矩阵; R 为对应于 r 的系数矩阵; D 为对应于 d 的系数矩阵; L_{GPS} 为 GPS 摄站坐标观测值的常数项向量。

2.2 IMU 视轴偏心角模型的建立^[20]

设外方位角元素 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 构成的旋转矩阵为 R_{AT} , IMU 角方位元素观测值 (Ω, Φ, K) 构成的旋转矩阵为 R_{IMU} , IMU 偏心角 (e_x, e_y, e_z) 构成的旋转矩阵为 R_{MIS} , 且 R_{AT} 、 R_{IMU} 与 R_{MIS} 之间满足如下关系

$$R_{AT} = R_{IMU} R_{MIS} \quad (5)$$

$$\text{即} \quad R_{IMU} = R_{AT} R_{MIS}^T \quad (6)$$

不妨设上式中的各旋转角均采用 $\omega - \varphi - \kappa$ 角元素系统, 考虑到 Ω, Φ 一般数值较小, 于是可求出 (Ω, Φ, K)

$$\left. \begin{aligned} \Omega &= -\arctan(r_{23}/r_{33}) \\ \Phi &= \arcsin(r_{13}) \\ K &= n\pi - \arctan(r_{12}/r_{11}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于 K 角, 可根据 r_{12} 和 r_{11} 确定整数 n 的数值。式(7)即为 IMU 角度观测值的偏心角模型。

3 用于标定的自检校光束法区域网平差

自检校技术是解析摄影测量平差中最有效的系统误差补偿方法, 它把可能存在的系统误差作为待定参数, 列入区域网空中三角测量的整体平差运算之中, 对主参数和系统误差参数同时进行最优估计并评定精度, 以达到消除或减弱系统误差的目的, 其中最适宜引入附加参数的是光束法区域网平差。如果从传感器成像的几何及物理因素出发, 使自检校附加参数能正确反映传感器内方位元素、摄影物镜光学畸变等系统性误差因素, 并通过区域网平差等方法精确解求各项参数, 即可实现基于自检校的传感器几何标定。

3.1 基本误差方程

基于附加参数的自检校光束法平差的基本公式为

$$\left. \begin{aligned} x + \Delta x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y + \Delta y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 代表该像点处引入的附加参数函数。将控制点也处理成带权观测值, 则平差基本误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} V_X &= B d + A t + C a - L_X & P_X \\ V_C &= E_d d - L_C & P_C \\ V_A &= E_a a - L_A & P_A \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, V_X, V_C, V_A 分别为像点坐标、地面控制点坐标和自检校参数观测值改正数向量; $d = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 为物方点坐标未知数增量向量; $t = [\Delta \varphi \ \Delta \omega \ \Delta \kappa \ \Delta X_s \ \Delta Y_s \ \Delta Z_s]^T$ 为外方位元素未知数增量向量; $a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \cdots]^T$ 为自检校附加参数向量; A, B, C 为相应于未知数 t, d, a 的系数矩阵; E_d, E_a 为单位矩阵; L_X, L_C, L_A 为相应观测值残差向量; P_X, P_C, P_A 为相应观测值的权矩阵。

3.2 用于标定的自检校区域网平差模型

如何在自检校区域网平差中引入 POS 数据是关键性问题之一。三线阵传感器定向参数众多, 且每个采样周期都对应一套外方位元素, 解算过程中不可能、也无必要一一求解, 因此选择合适的描述外方位元素变化的轨道模型十分关键。三线阵影像平差常采用定向片法, 即在飞行轨道上按一定时间间隔抽取若干离散的扫描周期, 称为定向片, 并将定向片时刻的外方位元素作为平差未知数进行解求, 然后内插出其他采样时刻的外方位元素。该方法优势在于便于引入 GPS/IMU 观测值且方式灵活, 可直接将 GPS/IMU 测量值作为外方位元素观测值, 也可同时考虑其系统性误差改正。如果将 GPS 观测值数学模型引入自检校平差, 则误差方程式在公式(9)的基础上变为

$$\left. \begin{aligned} V_X &= B d + A t + C a - L_X & P_X \\ V_C &= E_d d - L_C & P_C \\ V_A &= E_a a - L_A & P_A \\ V_{GPS} &= \bar{A} t + R r + D d - L_{GPS} & P_{GPS} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, r 为偏心分量未知数的增量向量; d 为线性漂移误差改正数向量; \bar{A}, R, D 为 GPS 摄站坐标误差方程式对应于 t, r, d 未知数的系数矩阵。若 GPS 偏心分量事先用地面测量手段精确测得, 则 r 为零; 如果进行 IMU 偏心角的联合标定, 直接应用式(7)的偏心角模型比较复杂, 且涉及大量的三角函数计算, 同时当航偏角 k 接近 90° 时, 式(7)中的 $r_{11} \approx 0$, 此时 r_{11} 较小的误差或数值舍入会使结果偏差很大, 误差方程状态较不稳定, 极有可能出现迭代不收敛的情况。简单起见, 也可采用类

似 GPS 系统误差改正的方式,将 IMU 视准轴误差视为系统偏移和漂移处理,则 IMU 测量误差改正模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{\text{IMU}} \\ \varphi_{\text{IMU}} \\ \kappa_{\text{IMU}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_\omega \\ a_\varphi \\ a_\kappa \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_\omega \\ b_\varphi \\ b_\kappa \end{bmatrix} (t-t_0) \quad (11)$$

式中, $(a_\omega, a_\varphi, a_\kappa, b_\omega, b_\varphi, b_\kappa)$ 统称为 IMU 姿态角的漂移误差改正参数。在式(10)基础上引入式(11),则平差基本误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} V_X &= B d + A t + C a - L_X & P_X \\ V_C &= E d - L_C & P_C \\ V_A &= E_a a - L_A & P_A \\ V_{\text{GPS}} &= \bar{A} t + R r + D d - L_{\text{GPS}} & P_{\text{GPS}} \\ V_{\text{INS}} &= \bar{A}_I t + Q q + E e - L_{\text{INS}} & P_{\text{INS}} \end{aligned} \right\}$$

式中, q 为偏心角分量未知数的增量向量; e 为线性漂移误差改正数向量; \bar{A}_I, Q, E 为 IMU 观测值误差方程式对应于 t, q, e 未知数的系数矩阵。

4 机载三线阵 CCD 传感器成像误差模型

数字航测相机没有框标概念,成像面上各 CCD 单元的焦面坐标仅能通过实验室和外场检校获得,在动态航摄条件下由于受环境影响,或相机长时间使用等原因,部分 CCD 像元或会发生几何形变和位置错移,CCD 阵列在焦平面内则可能整体平移和旋转,或发生离焦偏移,其对三线阵 CCD 传感器的影响变化如图 3 所示。可见线阵 CCD 传感器成像关系复杂,误差因素多。如何从传感器成像的几何及物理因素出发,建立合理有效的像差描述模型,使自检校附加参数能正确反映传感器成像特性,是进行几何标定的重要前提。

4.1 镜头光学畸变引起像点变化的分析

镜头光学畸变差是指相机物镜系统设计、制作和装配引起的像点偏离其理想位置的点位误差。它是非线性的,主要包括径向畸变和偏心畸变。径向畸变可用下述奇次多项式表示

$$\Delta x = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (12)$$

分别将其分解到像平面坐标系的 x 轴和 y 轴上,则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_r &= k_1 \bar{x} r^2 + k_2 \bar{x} r^4 + k_3 \bar{x} r^6 + \dots \\ \Delta y_r &= k_1 \bar{y} r^2 + k_2 \bar{y} r^4 + k_3 \bar{y} r^6 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $\bar{x} = (x - x_0)$, $\bar{y} = (y - y_0)$, $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$, (x_0, y_0) 为像主点坐标; k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数。

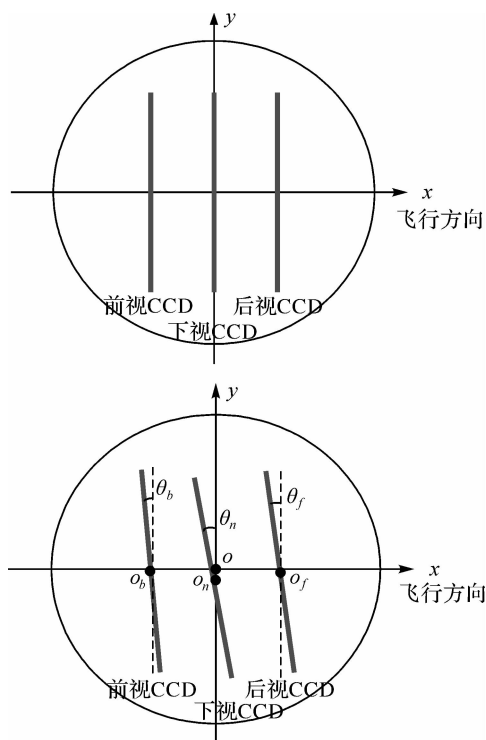


图 3 三线阵 CCD 在焦平面内的平移与旋转

Fig. 3 Translation and rotation of three linear CCD in focal plane

偏心畸变主要是由光学系统光心与几何中心不一致造成的,即镜头器件的光学中心不能严格共线。偏心畸变使像点既产生径向偏差又产生切向偏差,表达式如下

$$p(r) = r^2 \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \quad (14)$$

将其分解到像平面坐标系的 x 轴和 y 轴上,则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_d &= p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} \\ \Delta y_d &= 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中, p_1, p_2 为偏心畸变系数,偏心畸变在数量上要比径向畸变小得多。

传感器镜头主点坐标 (x_p, y_p) 的偏移,该偏移量在 x, y 方向上的偏移量用常量 $\Delta x_p, \Delta y_p$ 表示,同时,设传感器焦距的变化量为 Δf ,该变化量在像点上的影响可以模拟为

$$\left. \begin{aligned} dx_f &= -\frac{\Delta f}{f} (x - x_p) \\ dy_f &= -\frac{\Delta f}{f} (y - y_p) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

因此对于某像点 p ,镜头畸变造成的像点误差模型为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + \\ &\quad p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y} \\ \Delta y' &= \Delta y_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + \\ &\quad 2p_1 \bar{x} \bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} r^2 &= (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \\ (x - x_p) \bar{y} &= (y - y_p) \bar{x} \end{aligned} \quad (18)$$

4.2 线阵 CCD 畸变和移位引起像点变化的分析

像元尺寸变化主要影响成像比例尺。如图4所示,建立线阵 CCD 扫描线坐标系, x 轴为飞行方向, y 轴为 CCD 扫描方向(以下同), N_p 为线阵 CCD 像元数。设单像元原尺寸为 (p_x, p_y) , 变化率为 (dx_p, dy_p) , 沿 x 和 y 轴方向总变化为 (dp_x, dp_y) , 由于沿 y 轴方向有 N_p 个像元, x 轴方向仅有 1 个像元, 显然有

$$\left. \begin{aligned} dp_x &= dx_p \\ dp_y &= N_p dy_p \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

因此可以只考虑沿 y 轴方向的变形影响, 忽略 x 轴方向。

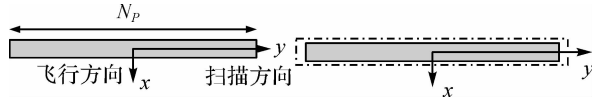


图4 线阵 CCD 像元尺寸变化的影响

Fig. 4 Linear CCD pixel size change effect

CCD 在焦平面内的平移将使得像主点偏离原定位置, 沿 x 和 y 轴方向的移动影响可用常量 dx_c 和 dy_c 表示, 如图5所示。

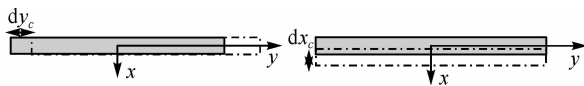


图5 线阵 CCD 沿 y 轴和 x 轴平移

Fig. 5 Translation of linear CCD along x axis and y axis respectively

设线性 CCD 在焦平面内旋转了角度 θ , dx_θ 和 dy_θ 分别为由于 CCD 旋转而造成的在飞行方向和扫描方向的像坐标误差, 如图6所示, 则有

$$\left. \begin{aligned} dx_\theta &= \bar{y} \sin \theta \\ dy_\theta &= \bar{y} - \bar{y} \cos \theta = \bar{y} (1 - \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

一般情况下 dy_θ 很小, 常不予考虑, 只进行 x 轴方向的改正。

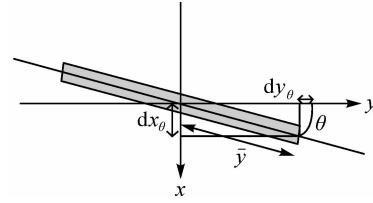


图6 线阵 CCD 在焦平面内的旋转

Fig. 6 Rotation of linear CCD in focal plane

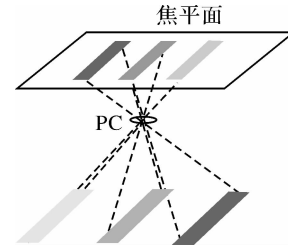


图7 单镜头多线阵 CCD 传感器图

Fig. 7 Figure of single lens with multi-CCD

因此对单线阵 CCD, 在考虑沿 y 轴方向的比例尺变化影响, 线阵 CCD 在焦平面内的平移影响、沿 x 轴方向的旋转影响后像点误差模型为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x' &= (\Delta x_p + dx_c) - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + \\ &\quad (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + \\ &\quad 2p_2 \bar{x} \bar{y} + \bar{y} \sin \theta \\ \Delta y' &= (\Delta y_p + dy_c) - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + \\ &\quad (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x} \bar{y} + \\ &\quad p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + \bar{y} s_y \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中, dx_c 和 dy_c 可合并到主点坐标偏移量中 Δx_p 、 Δy_p 中; θ 为线性 CCD 在焦平面内旋转的角度; s_y 为比例因子。ADS40 采用单镜头多线阵传感器(图7), 各线阵安置在同一焦平面上, 共用一套光学系统, 因此采用同一组光学畸变系数。对线阵 CCD j , ($j=1, 2, 3$), dx_{cj} 和 dy_{cj} 合并到主点坐标偏移量中 Δx_{pj} 、 Δy_{pj} 中, 旋转角度为 θ_j , 比例因子为 s_{yj} , 则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta x'_j &= \Delta x_{pj} - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + \\ &\quad p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y} + \bar{y} \sin \theta_j \\ \Delta y'_j &= \Delta y_{pj} - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + \\ &\quad 2p_1 \bar{x} \bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + \bar{y} s_{yj} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

5 几何标定试验与分析

5.1 标定对象与试验数据

试验采用 2009 年 8 月获取的河南登封遥感检校场 ADS40 航摄数据。选其中 3 个架次的数据用于本文试验,相对航高分别为 600 m、1000 m 和 3000 m,对应的像素分辨率 GSD 分别为 0.06 m、0.10 m 和 0.30 m,分记为数据 A、B 和 C。从数据 A 选取 4 条东西航线和 2 条南北构架航线,影像覆盖区内共选取控制点 67 个;从数据 B 选取 4 条东西航线和 2 条构架航线,选取控制点 43 个;从数据 C 选取 7 条东西方向平行航线以及 4 条南北方向构架航线,实际量测地面标志点 71 个。

5.2 标定方法与步骤

采用自行研制的 ADS40 数据处理软件进行自检校区域网平差标定试验。平差采用定向片模型及式(22)相机误差模型。

步骤 1:对数据 A、B、C 分别利用相机原始检校文件(记为 cam0)和同时获取的 POS 数据进行影像直接定位试验,评定定位精度,分析系统误差状况。

步骤 2:分别选取数据 A 和 B 进行不同控制条件下的常规光束法区域网平差,进行精度评定;在相同情况下进行自检校光束法区域网平差,对

结果进行比对分析。

步骤 3:分别从两组自检校区域网平差中选取最优项,并从中提取自检校参数,根据式(22)换算为像点坐标的附加值 Δx 、 Δy ,并以此更新相机原始检校文件,分别记为 camA 和 camB。

5.3 几何标定验证

验证 1:以 camA 和 camB 分别代替 cam0,其余条件不变,再对 A、B、C 进行影像直接定位试验,与试验步骤 1 所得结果进行比较分析,验证几何标定效果。

验证 2:以 camA 和 camB 分别代替 cam0,其余条件不变,再对 A、B 进行常规光束法区域网平差,与试验步骤 2 所得结果进行比较分析,验证几何标定效果。

5.4 试验结果与分析

表 1 是数据 A、B 进行两种方式区域网平差的结果,对两组数据在相同条件下分别进行常规区域网平差和自检校区域网平差,并试验了不同控制点数量的配置以评估两种平差方法解算精度对地面控制的依赖性;表 2 是采用 cam0、camA 和 camB,分别对 3 组数据进行直接定位的结果;图 8 换算为 GSD 以便于比较;表 3 是标定后采用 camA 和 camB 在同样条件下再对 A 和 B 进行常规区域网平差的结果。

表 1 数据 A、B 区域网平差结果

Tab. 1 Bundle adjustment results of data A and B sets m

数据	常规区域网平差					自检校区域网平差			
	GCP	检查点均方根			GCP	检查点均方根			
		X	Y	Z		X	Y	Z	
A	3	0.108	0.166	0.163	3	0.032	0.043	0.051	
	5	0.067	0.158	0.126	5	0.024	0.039	0.047	
	9	0.064	0.160	0.125	9	0.023	0.034	0.046	
B	3	0.089	0.207	0.221	3	0.039	0.062	0.082	
	5	0.084	0.198	0.211	5	0.037	0.055	0.077	
	9	0.087	0.126	0.205	9	0.036	0.045	0.074	

表 2 数据 A、B、C 直接定位结果

Tab. 2 Direct geopositioning results of data A, B and C sets

检校文件	数据 A			数据 B			数据 C		
	检查点均方根			检查点均方根			检查点均方根		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
cam0	0.235	0.200	0.349	0.304	0.417	0.523	0.814	0.763	1.258
camA	0.164	0.121	0.132	0.146	0.244	0.201	0.249	0.354	0.723
camB	0.155	0.102	0.128	0.137	0.242	0.190	0.256	0.322	0.686

表 3 标定后数据 A、B 常规区域网平差结果

Tab. 3 Normal block adjustment results of calibrated data A and B sets

m

检校文件	数据 A					数据 B				
	GCP	检查点均方根			GCP	检查点均方根			Z	
		X	Y	Z		X	Y	Z		
camA	3	0.037	0.051	0.062	3	0.044	0.069	0.101		
	5	0.028	0.041	0.052	5	0.041	0.062	0.089		
	9	0.023	0.034	0.053	9	0.042	0.053	0.089		
camB	3	0.035	0.047	0.055	3	0.042	0.064	0.091		
	5	0.029	0.038	0.051	5	0.039	0.056	0.087		
	9	0.021	0.034	0.048	9	0.037	0.044	0.089		

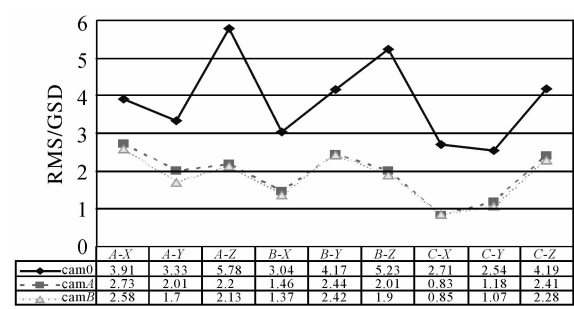


图 8 数据 A、B、C 直接定位结果

Fig. 8 Direct geopositioning results of data A, B and C sets

分析发现:

(1) ADS40 影像直接定位精度不高,平面 X 方向约为 2.71~3.91 个 GSD,Y 方向约为 2.54~4.17 个 GSD,Z 方向较差,在 4.19~5.78 个 GSD 之间。分析其误差应主要源于两方面:一是内方位成像参数变化对像坐标的影响;二是外方位元素观测数据中 GPS 偏心、IMU 偏心角及系统漂移等所引入的系统性误差。

(2) 从表 1 看,影像区域网平差对控制点数量要求不高,5 个以上即可得到稳定的结果,更多的控制点对结果改善效果不明显;当采用自检校区域网平差时能显著提升定位精度,在采用 9 控制点平差趋于稳定,此时数据 A 的 X、Y、Z 方向的精度由 1.0、2.6 和 2.1 个 GSD 分别提高到 0.4、0.6 和 0.8 个 GSD,而数据 B 则由 0.9、1.3 和 2.0 个 GSD 提高到 0.4、0.5 和 0.7 个 GSD,两组试验结果相近,在平面 Y 方向改善效果最为明显;该试验表明常规光束法平差因存在系统误差影响而难以达到理想精度,采用自检校区域网平差能对系统误差的有效补偿,显著提升定位精度,可用于传感器几何标定。

(3) 采用 camA 和 camB 对数据 A、B 再次进行直接定位的结果表明,利用标定参数更新检校文件后,直接定位的精度得到了大幅提高,在改善程度上两者比较接近,camB 略优于 camA,其中精度改善在 Z 方向上最为明显,最大在 3.6 个 GSD 以上,最小也有 1.8 个 GSD,平面 X 方向精度提升幅度约为 1.2~1.8 个 GSD,Y 方向幅度约为 1.3~1.7 个 GSD。

(4) 采用 camA 和 camB 对数据 A、B 再次进行区域网平差的结果表明,检校文件更新后,常规区域网平差的精度得到显著提升,与同等控制条件下采用 cam0 文件进行自检校区域网平差的结果相比,差距也已经非常小。

(5) 标定后影像直接定位的绝对精度相比标定前常规区域网平差精度仍有差距,表明 ADS40 直接定位的精度主要决定于 POS 数据的精度;但在少量地面控制点支持下,进行标定后采用常规区域网平差即可得到理想的定位精度。

以上试验表明,ADS40 相机经几何标定后影像定位精度得到显著改善和提高,本文提出和建立的基于自检校的机载线阵 CCD 传感器几何标定的模型与方法可行有效的。但受相关条件制约,仅对单台 ADS40 相机进行了标定试验,所用数据也比较有限,缺少不同地形区域、不同时间周期的全面数据,有待进一步扩大试验并进行深入研究。

参考文献:

[1] SANDAU R, BRAUNECKER B, DRIESCHER H, et al. Design Principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor[C]// Proceedings of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam: IAPRS, 2000:258-265.

[2] CRAMER M. A European Network on Camera Calibration

- [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70 (12):1328-1334.
- [3] CRAMER M. Calibration and Validation of Digital Airborne Cameras [C] // Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006, Castelldefels:[s. n.], 2006.
- [4] CRAMER M. The EuroSDR Approach on Digital Airborne Camera Calibration and Certification [C] // Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: IAPRS, 2008:1753-1758.
- [5] MOSTAFA M R. Digital Multi-sensor Systems-calibration and Performance Analysis [C] // Proceedings of OEEPE Workshop Integrated Sensor Orientation. Hannover:[s. n.], 2001:17-18.
- [6] PACEY R E, WALKER A S, SCHEIDT M. Calibration of Analogue and Digital Airborne Sensors at LH Systems[C] // Proceedings of the 1999 ASPRS Annual Conference. Portland:[s. n.], 1999: 950-956.
- [7] PETRIE G A, WALKER S. Airborne Digital Imaging Technology: a New Overview [J]. The Photogrammetric Record, 2007, 22(119):203-225.
- [8] HONKAVARRA E, AHOKAS E, HYYPPA J, et al. Geometric Test Field Calibration of Digital Photogrammetric Sensors[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(6):387-399.
- [9] DOERSTEL C, ZEITLER W. Geometric Calibration of the DMC: Method and Results [C] // Proceedings of Pecora 15/ Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference. [S. l.]: IAPRS, 2002:324-333.
- [10] TEMPELMANN U, HINSKEN L, RECKE U. ADS40 Calibration and Verification Process[C] // Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques Conference. Zurich:[s. n.], 2003:48-54.
- [11] KOCAMAN S, CASELLA V, FRANZINI M, et al. The Triangulation Accuracy of ADS40 Imagery over The Pavia Testsite[C] // Proceedings of WG 4 "Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems" Workshop. Newcastle:[s. n.], 2007:12-17.
- [12] CASELLA V, FRANZINI M, KOCAMAN, et al. Triangulation and Self-calibration of the ADS40 Imagery: a Case Study over the Pavia Test Site[C] // Proceedings of the 8th Conference on "Optical 3D Measurement Techniques". Zurich:[s. n.], 2007:223-232.
- [13] LIU Jun, WANG Donghong, ZHANG Yongsheng. Triangulation of ADS40 Three Line Images Using Unit Quaternion [C] // Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: IAPRS, 2008: 573-578.
- [14] CRAMER M. The ADS40 Vaihingen/Enz Geometric Performance Test[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(6):363-374.
- [15] CRAMER M. Digital Camera Calibration[R]. Frankfurt: EuroSDR, 2009.
- [16] KOCAMAN S, ZHANG L, GRUEN A. Self-calibrating Triangulation of Airborne Linear Array CCD Cameras[C] // Proceedings of the EuroCOW 2006 International Calibration and Orientation Workshop. Castelldefels:[s. n.], 2006:25-27.
- [17] TU Xinru, XU Miaozhong, LIU Li. The Geometric Calibration of Airborne Three-line-scanner ADS40 [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(1):78-83(涂辛茹, 许妙忠, 刘丽. 机载三线阵传感器 ADS40 的几何检校[J]. 测绘学报, 2011, 40(1):78-83.)
- [18] YUAN Xiuxiao. The Principle and Application of GPS-supported Aerial Triangulation[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press. 2001:35-40.(袁修孝. GPS辅助空中三角测量原理及应用[M]. 北京:测绘出版社, 2001: 35-40.)
- [19] FRIESS P. Aerotriangulation with GPS-Methods, Experiences, Exception [C] // Proceedings of the Photogrammetric Week 91. Stuttgart:[s. n.], 1999.
- [20] LIU Jun, A Study on the Positioning Theory of Airborne Line CCD Imagery Supported by GPS/IMU[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007: 41-42. (刘军. GPS/IMU辅助机载线阵 CCD 影像定位技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2007:41-42.)

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2011-05-31

修回日期: 2011-08-03

第一作者简介: 王涛(1975—),男,博士生,副教授,研究方向为航空航天摄影定位理论与方法、遥感图像信息处理。

First author: WANG Tao (1975—), male, PhD candidate, associate professor, majors in aerospace photography positioning and remote sensing image processing.

E-mail: wangtaoynl@163.com