

前向像移补偿下航空测绘相机畸变的纠正方法

远国勤¹ 丁亚林¹ 惠守文¹ 张景国¹ 郑丽娜^{1,2} 于春风^{1,2} 刘立国¹ 陈伟¹ 张雪菲¹

(¹ 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了提高航空测绘相机的制图精度,研究了前向像移补偿过程中测绘相机畸变的纠正方法。根据光学像差理论对畸变的影响因素进行了分析,得到了前向像移补偿过程中影响畸变的关键参数。考察了主点、主距等参数变化对畸变的影响规律,在此基础上提出前向像移补偿下畸变的计算模型。依据提出的模型对前向像移补偿下的航空测绘相机进行了数学仿真及外场飞行实验。结果表明,提出的算法稳定、有效,可以有效地纠正前向像移补偿时航空测绘相机的畸变,平面位置中误差较传统纠正方法可提高 1.38 倍。

关键词 成像系统;航空测绘相机;前向像移补偿;畸变纠正;精度分析

中图分类号 TP73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1111001

A Method for Distortion Correction of Airborne Mapping Camera with Forward Image Displacement Compensation

Yuan Guoqin¹ Ding Yalin¹ Hui Shouwen¹ Zhang Jingguo¹ Zheng Lina^{1,2}

Yu Chunfeng^{1,2} Liu Liguo¹ Chen Wei¹ Zhang Xuefei¹

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the mapping accuracy, a new algorithm is proposed to calibrate optical system distortion when forward image displacement is compensated by driving CCD. The key factors which greatly influence the optics distortion during forward image displacement compensation are researched. Then, by analyzing the effect of principal point and the principal distance on the optical distortion, a mathematical model is established. The model is tested through numerical simulation and field flight experiment. Experimental results show that the mapping accuracy is improved by 1.38 times as compared with the traditional method. The results confirm the feasibility and the validity of the proposed method.

Key words imaging systems; airborne mapping camera; forward image displacement compensation; distortion correction; accuracy analysis

OCIS codes 120.0280; 080.1753; 100.2000

1 引 言

航空测绘中,物点在 CCD 探测器像面中实际所成的像与理想像点之间存在着不同程度的非线性光学畸变^[1,2],畸变成为光学测量系统的主要缺陷,是

影响测绘精度的主要因素之一,必须进行校正^[3,4]。精确地标定出畸变系数以实现畸变的纠正是实现高精度测绘的首要条件^[5,6]。

常用的几何畸变校正方法有实验法和基于图像

收稿日期: 2012-05-16; **收到修改稿日期**: 2012-06-19

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724001)和国家高分重大专项(民用部分)航空系统项目(30-H32A01-9005-12/12)资助课题。

作者简介: 远国勤(1982—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: yuanguoqin@139.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机稳定成像技术方面的研究。

E-mail: 2581876@sina.com

的数字校正方法两种^[7],这两种校正方法均是在测绘相机和目标点之间没有相对运动的情况下进行的。航空测绘相机在载机飞行中对地观测成像,拍照过程中存在前向像移,造成图像模糊^[8]。为了提高成像分辨率,目前主流的航空测绘相机,如 Z/I Imaging 公司的 DMC 系列及 VexCel 公司 Ultracam 系列等,均采用了前向像移补偿。前向像移补偿导致测绘相机的畸变值与无相对运动状态下的静态畸变值相比发生了变化,如果仍然按照静态畸变值对其进行纠正,势必影响目标点的理论成像位置,使计算基准有较大的误差,影响测量精度,因此需要对前向像移补偿下的畸变值进行标定。

本文针对机械式前向像移补偿机构工作时畸变的动态变化规律进行了分析,研究了前向像移补偿过程中动态畸变值与静态畸变值、主点及主距的数学关系,并提出了一种新的畸变校正方法,该方法同样适用于采用基于面阵 CCD 积分延时(TDI)方式进行前向像移补偿的航空测绘相机。

2 前向像移补偿过程中畸变量变化分析

2.1 航空测绘相机畸变的影响因素

根据光学像差理论,在仅考虑径向畸变且光学系统主距已定的成像系统中,航空测绘相机与被照景物间无相对运动时,任一像点的静态畸变值 $\Delta P_x, \Delta P_y$ 为

$$\begin{cases} \Delta P_x = \phi(x_0, y_0) = K_1 \bar{x}r^2 + K_2 \bar{x}r^4 \\ \Delta P_y = \varphi(x_0, y_0) = K_1 \bar{y}r^2 + K_2 \bar{y}r^4 \end{cases}, \quad (1)$$

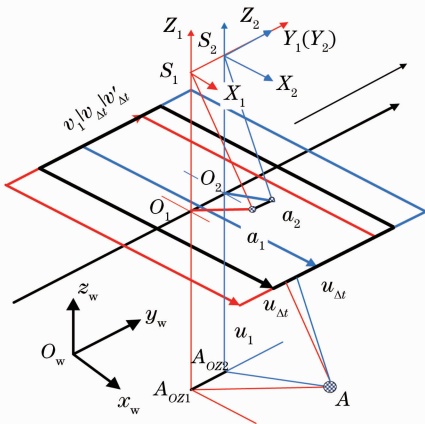


图 2 曝光过程中主点变化示意图

Fig. 2 Changes of principal point in the exposure process

在曝光开始 t_0 时刻,以 CCD 左上角为坐标原点建立辅助坐标系 $u_1 - v_1, O_w - x_w y_w z_w$ 为物空间坐标系,主点 O_{t_0} 、物点 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 的像点 a_1 在 t_0

式中 $\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0, r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$ 。 $(x, y), (x_0, y_0)$ 分别为航空测绘相机中像点、主点的位置坐标。

在光学系统主点已定的成像系统中,航空测绘相机与被照景物间无相对运动时,主距与任一入射角 α 对应像点的畸变值关系如图 1 所示。像点与像面主点 O 的距离为 r ,光学系统主距为 f ,图 1 中入射角 α 静态畸变量 Δr 可以表示为

$$\Delta r = r - f \tan \alpha. \quad (2)$$

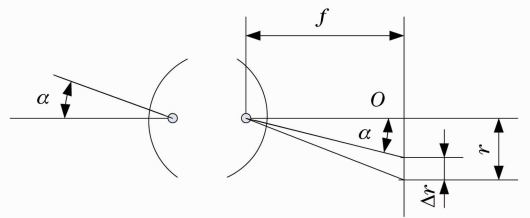


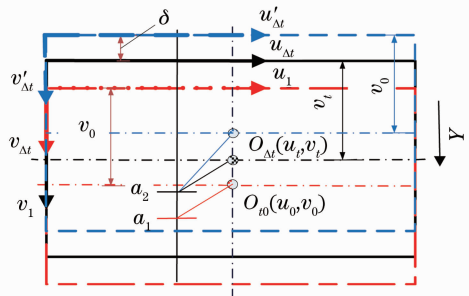
图 1 主距与畸变关系

Fig. 1 Relationship between principal distance and distortion

根据(1)、(2)式,当光学系统主点、主距具有动态变化时,测绘相机的实际畸变值在静态畸变值的基础上发生了变化,需要对动态畸变值进行标定。

2.2 前向像移补偿过程中航空测绘相机主点变化及其影响

为了提高成像分辨率,在曝光过程中,航空测绘相机需沿载机飞行方向驱动 CCD 探测器相对于光学系统匀速运动以补偿前向像移。前向像移补偿将会导致主点位置的变化,如图 2 所示。



时刻辅助坐标系中位置坐标分别为 $(u_0, v_0), (u_x, v_x)$,摄影中心 S_1 坐标记为 (X_{S_1}, Y_{S_1}, H) ;曝光 $t_0 + \Delta t$ 时刻,由于载机前向飞行,摄影中心变化为

$S_2(X_{S_1}, Y_{S_1} - V\Delta t, Z_{S_1})$, V 为载机飞行速度大小, 此时像移补偿机构驱动 CCD 探测器移动了 δ , 以移动后的 CCD 左上角为原点建立辅助坐标系 $u_{\Delta t} - v_{\Delta t}$, 由于补偿了前向像移, 物点 A 的像点 a_2 在 $t_0 + \Delta t$ 时刻辅助坐标系中坐标仍为 (u_x, v_x) 。

CCD 探测器相对于光学系统的移动, 造成了光轴在像面上垂足的变化, 根据主点的定义, 曝光 $t_0 + \Delta t$ 时刻主点位置发生变化, 记坐标系 $u_{\Delta t} - v_{\Delta t}$ 中主点 $O_{\Delta t}$ 坐标为 (u_t, v_t) 。根据径向畸变的性质^[9,10], 曝

光 t_0 及 $t_0 + \Delta t$ 时刻, 应满足

$$\overline{A_{\alpha z1}A} // \overline{a_1O_{t0}}, \overline{A_{\alpha z2}A} // \overline{a_2O_{\Delta t}}, \quad (3)$$

式中 $A_{\alpha z1}, A_{\alpha z2}$ 为 t_0 及 $t_0 + \Delta t$ 时刻测绘相机光轴上与物点 A 的 Z 坐标相同的点, 即

$$\begin{cases} \overline{A_{\alpha z1}A} \times \overline{a_1O_{t0}} = 0 \\ \overline{A_{\alpha z2}A} \times \overline{a_2O_{\Delta t}} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

根据各点坐标, 可列出方程组如下:

$$\begin{cases} (v_x - v_0)(X_A - X_{S_1}) - (u_x - u_0)(Y_A - Y_{S_1}) = 0 \\ (v_x - v_t)(X_A - X_{S_1}) - (u_x - u_t)(Y_A - Y_{S_1} + V\Delta t) = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

解之可得

$$v_t - v_0 = f \frac{V}{H} \Delta t, \quad (6)$$

$$u_t = u_0. \quad (7)$$

(6) 式表明, 在前向像移补偿过程中, 主点具有动态的变化量, 曝光总时间为 t 时, 主点的总变化量为

$$\delta = \int_0^t (v_t - v_0) dt = \int_0^t f \frac{V}{H} dt = f \frac{V}{H} t. \quad (8)$$

航空测绘相机主点的变化导致像点 a 的畸变由静态畸变值 $\Delta P_x, \Delta P_y$ 变化为实际畸变值 $\Delta P'_x, \Delta P'_y$ 。

根据前向像移补偿性质, $\Delta P'_x, \Delta P'_y$ 应由两部分构成:

1) 曝光起始 t_0 时刻前(此时快门未打开), 像移补偿机构驱动 CCD 探测器由静止加速到补偿前向像移所需速度过程中造成的畸变变化量 $\Delta P'_{x1}, \Delta P'_{y1}$; 2) 曝光起始 t_0 时刻至曝光结束过程中(快门打开直至关闭), CCD 探测器移动造成的畸变量 $\Delta P'_{x2}, \Delta P'_{y2}$ 。曝光起始 t_0 时刻时 CCD 探测器相对于光学系统运动量记为 $\Delta\delta$, 则该时刻主点坐标为 $(x_0, y_0 + \Delta\delta)$, 则根据(1) 式可得

$$\begin{cases} \Delta P'_{x1} = \phi(x_0, y_0 + \Delta\delta) = K_1(x - x_0)\{(x - x_0)^2 + [y - (y_0 + \Delta\delta)]^2\} + K_2(x - x_0)\{(x - x_0)^2 + [y - (y_0 + \Delta\delta)]^2\}^2 \\ \Delta P'_{y1} = \varphi(x_0, y_0 + \Delta\delta) = K_1[y - (y_0 + \Delta\delta)]\{(x - x_0)^2 + [y - (y_0 + \Delta\delta)]^2\} + K_2[y - (y_0 + \Delta\delta)]\{(x - x_0)^2 + [y - (y_0 + \Delta\delta)]^2\}^2 \end{cases}. \quad (9)$$

曝光起始 t_0 时刻至曝光结束过程中 CCD 探测器在像移补偿方向为匀速运动, 各点曝光量相同, 由于该过程中主点位置一直处于变化状态, 因此利用第一类曲线积分^[11]求解, 即

$$\Delta P'_{x2} = \frac{\int_L ds \int_{y_0 + \Delta\delta}^{y_0 + \Delta\delta + \delta} \phi(x_0, y_0) \sqrt{\phi'^2(x_0, y_0) + \varphi'^2(x_0, y_0)} dy_0}{\int_L ds \int_{y_0 + \Delta\delta}^{y_0 + \Delta\delta + \delta} \sqrt{\phi'^2(x_0, y_0) + \varphi'^2(x_0, y_0)} dy_0}, \quad (10)$$

$$\Delta P'_{y2} = \frac{\int_L ds \int_{y_0 + \Delta\delta}^{y_0 + \Delta\delta + \delta} \varphi(x_0, y_0) \sqrt{\phi'^2(x_0, y_0) + \varphi'^2(x_0, y_0)} dy_0}{\int_L ds \int_{y_0 + \Delta\delta}^{y_0 + \Delta\delta + \delta} \sqrt{\phi'^2(x_0, y_0) + \varphi'^2(x_0, y_0)} dy_0}. \quad (11)$$

则由主点位置变化导致的像面中任一点畸变变化量为

$$\Delta P'_x = \Delta P'_{x1} + \Delta P'_{x2}, \quad (12)$$

$$\Delta P'_y = \Delta P'_{y1} + \Delta P'_{y2}. \quad (13)$$

2.3 前向像移补偿下航空测绘相机的主距变化及其影响

理想情况下, CCD 探测器应在理论像面中运动以补偿载机飞行造成的前向像移。尽管在装调过程中 CCD 探测器的安装基准经过精密研磨,但是由于误差的随机性, CCD 探测器在补偿前向像移的运动过程中将会偏离理论像面,从而导致非共面性误差。一般认为 CCD 探测器偏离理想像面的距离小于半焦深时不会影响成像分辨率^[12],但根据定义, CCD 探测器移动的非共面性误差将会引起测绘相机主距的变化,由(2)式可知,将对畸变产生影响。

根据(2)式,前向像移补偿过程中,当 CCD 探测器运动过程中偏离原始安装像面而导致主距具有变化量 Δf 时,将导致畸变量发生变化,记因主距改变导致的入射角 α 处的畸变量变化为 $\Delta r'$,则

$$\Delta r' = r - (f + \Delta f)\tan \alpha = \Delta r - \Delta f \tan \alpha. \quad (14)$$

根据(1)式,主距为 f 的光学系统静态畸变差为

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5. \quad (15)$$

将(14)式代入(15)式可得

$$\Delta r' = (k_1 r^3 + k_2 r^5) \left(1 + \frac{\Delta f}{f}\right) - \frac{\Delta f}{f} r. \quad (16)$$

则非共面性误差造成的畸变变化量 Δr_f 为

$$\Delta r_f = \Delta r' - \Delta r = k'_0 r + k'_1 r^3 + k'_2 r^5 - \Delta r, \quad (17)$$

式中 $k'_0 = -\frac{\Delta f}{f}$, $k'_1 = k_1(1 - k'_0)$, $k'_2 = k_2(1 - k'_0)$ 。

3 前向像移补偿过程中动态畸变的数学模型

根据上述分析,前向像移补偿下像点 a 的动态畸变共有两部分组成:主点变化导致的动态畸变和非共面性误差导致的动态畸变。其中主距变化导致的动态畸变由(17)式给出;主点变化引起的动态畸变由两部分构成:1)像移补偿机构驱动 CCD 探测器由静止加速至像移速度、曝光开始 t_0 时刻之前,主点变化导致的动态畸变,由(9)式给出;2)曝光过程中,补偿前向像移导致的主点动态变化引起的动态畸变、由(10)、(11)式给出。动态畸变修正需要针对上述两部分进行。

(10)、(11)式给出了在曝光过程中,主点变化导致的动态畸变的严格公式,为方便数学建模,需要对其进行简化计算。记曝光 $t_0 + \Delta t$ 时刻主点变化导致的动态畸变分别为 $\Delta(x + \Delta t)$, $\Delta(y + \Delta t)$, 将其在曝光起始 t_0 时刻展开。

曝光过程中像点 a 位置坐标固定,即 x, y 为常量,则可得

$$\frac{d\Delta x}{dt} \cdot \Delta t = \frac{d\Delta x}{dy_0} \times \frac{dy_0}{dt} \Big|_{t=t_0} \cdot \Delta t = \left(2K_1 \bar{x}r \frac{\partial r}{\partial y_0} + 4K_2 \bar{x}r^3 \frac{\partial r}{\partial y_0}\right) f \frac{v}{H} \Delta t, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta y}{dt} \cdot \Delta t = \frac{d\Delta y}{dy_0} \times \frac{dy_0}{dt} \Big|_{t=t_0} \cdot \Delta t = & \left(2K_1 \bar{y}r \frac{\partial r}{\partial y_0} + 4K_2 \bar{y}r^3 \frac{\partial r}{\partial y_0}\right) f \frac{v}{H} \Delta t + \\ & \left(k_1 r^2 \frac{\partial \bar{y}}{\partial y_0} + k_2 r^4 \frac{\partial \bar{y}}{\partial y_0}\right) f \frac{v}{H} \Delta t. \end{aligned} \quad (19)$$

由于曝光时间较短,忽略(18)、(19)式中相应高次项,可得主点变化对造成的动态畸变模型为

$$\Delta x_1 = 2K_1 f \frac{v}{H} \Delta t \bar{x} \bar{y}, \quad (20)$$

$$\Delta y_1 = 2K_1 f \frac{v}{H} \Delta t \bar{y} \bar{y} + K_1 r^2 f \frac{v}{H} \Delta t. \quad (21)$$

由此可以给出前向像移补偿机构工作时,所获取像片上像点 $a(x, y)$ 的动态畸变模型如下:

$$\begin{cases} \Delta P_x = K_{m0} \bar{x} + K_{m1} \bar{x}r^2 + K_{m2} \bar{x}r^4 + K_{d1} f \frac{v}{H} \Delta t \bar{x} \bar{y} \\ \Delta P_y = K_{m0} \bar{y} + K_{m1} \bar{y}r^2 + K_{m2} \bar{y}r^4 + K_{d1} f \frac{v}{H} \Delta t \bar{y} \bar{y} + P_{m1} r^2 f \frac{v}{H} \Delta t \end{cases}, \quad (22)$$

式中 $K_{m0} = k'_0$, $K_{m1} = K_1 + k'_1$, $K_{m2} = K_2 + k'_2$, $K_{d1} = 2K_1$, $P_{m1} = K_1$ 。

(22)式表明,具有前向像移补偿功能的航空彩色大面阵测绘相机的成像过程中,像点的动态畸变值在静态畸变值的基础上发生了变化,根据(22)式可以建立径向畸变模型 ΔP 和偏心畸变模型 Δe ,即

$$\begin{cases} \Delta P = K_{m0} \bar{r} + K_{m1} r^3 + K_{m2} r^5 + 2\delta K_{d1} \bar{y}r \\ \Delta e = P_{m1} \delta r^2 \end{cases} \quad (23)$$

(23)式表明,即使在初始位置时仅具有径向畸变的光学系统中,前向像移补偿后所获取像片的像点也包含径向畸变及偏心畸变两个部分,且共有5个畸变系数。控制点数量大于3时,可根据最小二乘算法确定参数 $K_{m0}, K_{m1}, K_{m2}, K_{d1}, P_{m1}$ 。

4 畸变模型系数仿真解算及实验验证

4.1 仿真实验计算

根据理论分析及数值仿真相结合的方法解算前向像移补偿过程中畸变变化量的数学模型系数,解算过程如下:

- 1) 在像平面中选取种子点;
- 2) 在速高比范围 $0.05 \leq \eta \leq 0.17$ 中等间隔选取10个速高比值作为实验点;
- 3) 根据彩色大面阵航空测绘相机快门的性质,每个速高比值均设定曝光时间 $1/100, 1/175, 1/200, 1/300, 1/500, 1/700$ s,计算速高比实验点处主点位置的变化量;

- 4) 根据(1)式计算种子点在初始位置处的畸变;
 - 5) 根据(12)、(13)式计算对应于像移补偿过程中主点位置变化导致的种子点的畸变变化量;
 - 6) 根据(17)式的数学模型计算非共面性误差导致的畸变变化量;
 - 7) 加入由于载机飞行姿态变化等导致的高斯噪声;
 - 8) 根据最小二乘算法求解畸变模型系数。
- 步骤8)利用最小二乘算法求解畸变模型系数的方法如下。

前向像移补偿后,平面中种子点 $S_i(x_{s_i}, y_{s_i})$ 在 x, y 方向的实际畸变量记为 τ_{xS_i}, τ_{yS_i} ,该种子点距曝光起始 t_0 时刻的主点 (x_0, y_0) 的长度记为 r_i ,即 $r_i = \sqrt{(x_{s_i} - x_0)^2 + (y_{s_i} - y_0)^2}$,记 $\bar{x}_i = x_{s_i} - x_0, \bar{y}_i = y_{s_i} - y_0$ 。根据畸变模型,式计算得出的 x, y 方向畸变值分别记为 $\hat{\tau}_{xS_i}, \hat{\tau}_{yS_i}$ 。畸变纠正残差记为 $\Delta x_i, \Delta y_i$,即

$$\Delta x_i = \tau_{xS_i} - \hat{\tau}_{xS_i}, \quad \Delta y_i = \tau_{yS_i} - \hat{\tau}_{yS_i} \quad (24)$$

当种子点数量为 n 时,记向量 $\mathbf{V}_n, \mathbf{K}_n, \mathbf{Y}_n$ 及矩阵 \mathbf{A}_n 如下:

$$\mathbf{V}_n = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_1 r_1^2 & \bar{x}_1 r_1^4 & f \frac{v}{H} \bar{x}_1 \bar{y}_1 \Delta t & 0 \\ \bar{y}_1 & \bar{x}_1 r_1^2 & \bar{x}_1 r_1^4 & f \frac{v}{H} \bar{x}_1 \bar{y}_1 \Delta t & f \frac{v}{H} r_1^2 \Delta t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{x}_n & \bar{x}_n r_n^2 & \bar{x}_n r_n^4 & f \frac{v}{H} \bar{x}_n \bar{y}_n \Delta t & 0 \\ \bar{y}_n & \bar{x}_n r_n^2 & \bar{x}_n r_n^4 & f \frac{v}{H} \bar{x}_n \bar{y}_n \Delta t & f \frac{v}{H} r_n^2 \Delta t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_n = \begin{bmatrix} K_{m0} \\ K_{m1} \\ K_{m2} \\ K_{d1} \\ P_{m1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} \tau_{xS_1} \\ \tau_{yS_1} \\ \vdots \\ \tau_{xS_n} \\ \tau_{yS_n} \end{bmatrix} \quad (25)$$

则

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{Y}_n - \mathbf{A}_n \mathbf{K}_n \quad (26)$$

根据最小二乘算法,可求得畸变模型系数向量为

$$\mathbf{K}_n = (\mathbf{A}_n^T \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{A}_n^T \mathbf{Y}_n \quad (27)$$

畸变纠正精度为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} v_i^2}{n-5}} \quad (28)$$

根据上述解算过程,前向像移补偿过程中动态畸变模型系数仿真计算结果如图3所示。

由图3可以看出,当像移量较小($\delta \leq 0.015$)时,由于系统噪声占据较大比重,与 δ 相关的两个标定系数 K_{d1}, P_{m1} 具有一定的波动性,随着前向像移

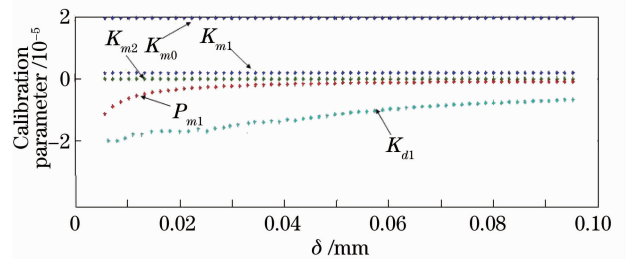


图3 系数随像移量变化示意图

Fig.3 Coefficient versus image motion

量的增大, K_{d1}, P_{m1} 趋于稳定。根据(26)式,畸变标定精度可达到 $1.2 \mu\text{m}$,由(1)式的静态畸变模型对该实验环境中像点进行畸变纠正时,纠正中误差为 $2.3 \mu\text{m}$,表明提出的算法更符合前向像移补偿的实

际情况,其造成的动态畸变可以被很好地纠正。

4.2 飞行实验验证

采用基于位置和方位系统(POS)的单张像片后方交会方法进行前向像移补偿机构工作下的畸变纠正实验,获取的航测像片如图4所示,单张像片中共有10个控制点,基本覆盖了整张像片。



图4 控制点分布图

Fig. 4 Ground control points distribution

以控制点的均方根误差(RMS)评定标定精度,RMS可定义为

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2]} \quad (29)$$

式中 x_i, y_i 为根据共线方程计算得到的地面控制点在像面的理论像点位置坐标, \hat{x}_i, \hat{y}_i 为根据(22)式进行畸变纠正后的实际像点位置坐标。将数值仿真得出的前向像移补偿过程中畸变变化量的数学模型系数作为初值,根据自检校区域网光束法空中三角测量的共线方程数学模型^[13]进行迭代运算,RMS与迭代次数的关系如图5所示,经过20次迭代运算,RMS值趋于稳定。此时控制点平面位置中误差为0.18 m,采用(1)式的静态模型进行畸变纠正时,平面位置中误差为0.29 m,相比提高了37.9%,证明该纠正模型更符合前向像移补偿时测绘相机畸变的

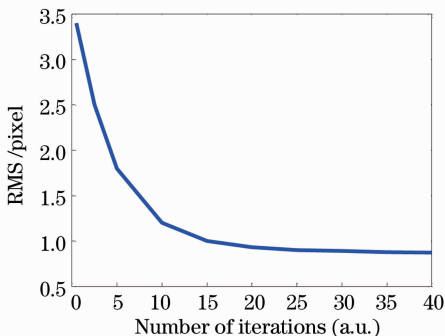


图5 RMS误差收敛结果

Fig. 5 Convergence result of RMS error

实际情况。

5 结 论

建立了前向像移补偿过程中畸变变化的数学模型,分析了主点、主距等内方位元素参数变化对相机畸变的影响,并从数学仿真、外场飞行两个方面对提出的畸变模型进行了实验验证。实验结果表明,该模型算法稳定、有效,可以较好地纠正前向像移补偿时航空测绘相机的畸变,较传统的纠正方法,平面测绘精度提高了37.9%,证明了该纠正模型更符合前向像移补偿下测绘相机畸变实际情况。

参 考 文 献

- 1 Qiao Yanfeng, Gao Fengduan, Wang Zhiqian *et al.*. Distortion correction for the photoelectricity measuring system based on the cubic fitting equation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(6): 28~31
乔彦峰, 高峰端, 王志乾等. 基于三次拟合方程畸变校正的光电测量系统[J]. *光电工程*, 2008, **35**(6): 28~31
- 2 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen *et al.*. Grouped approach algorithm for mapping camera calibration based on method of exact measuring angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112005
远国勤, 丁亚林, 惠守文等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0112005
- 3 Fu Hong, Xie Mujun, Wang Zhiqian *et al.*. Application of distortion compensation in photo electricity measurement system [J]. *J. Jilin University (Science Edition)*, 2009, **47**(6): 1287~1289
付虹, 谢慕君, 王志乾等. 畸变补偿在光电测量系统中的应用[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2009, **47**(6): 1287~1289
- 4 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~469
霍炬, 杨卫, 杨明. 基于消隐点几何特性的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~469
- 5 Xu Yuguo, Liu Tuanjie, You Hongjian *et al.*. On-orbit calibration of interior orientation for CBERS02B-HR camera [J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(4): 460~464
徐雨果, 刘团结, 尤红建等. CBERS-02B星HR相机内方位元素的在轨标定方法[J]. *光学技术*, 2011, **37**(4): 460~464
- 6 Ling Wei, Wang Zhiqian, Gao Fengduan. Real time digital correction for distortion in photoelectronical measuring system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 277~279
凌伟, 王志乾, 高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 277~279
- 7 Ye Dong, Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, **10**(5): 883~890
叶东, 徐巧玉, 车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. *光学精密工程*, 2006, **10**(5): 883~890
- 8 Hui Shouwen, Yuan Guoqin, Liu Ligu. Design and Accuracy analysis of area scan color CCD camera's image motion compensation device [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(3): 5~9
惠守文, 远国勤, 刘立国. 一种彩色大面阵航空遥感相机前向像移补偿机构设计及精度分析[J]. *光电工程*, 2012, **39**(3): 5~9
- 9 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high

- accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 10 R. K. Lenz, R. Y. Tsai. Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology [C]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **10**(5): 713~720
- 11 同济大学教研室. 高等数学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996
- 12 Hui Shouwen, Yuan Guoqin, Ding Yalin *et al.*. Accuracy analysis and optimization design of constant-diameter conjugate focusing cam [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(5): 133~138
- 惠守文, 远国勤, 丁亚林 等. 等径共轭调焦凸轮机构的精度分析及优化设计 [J]. *光电工程*, 2010, **37**(5): 133~138
- 13 Ma Xiaofeng. Positioning Technology of Space Photogrammetry [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009
- 马晓峰. 航天摄影测量定位技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009

栏目编辑: 何卓铭