

# 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及 误差纠正

远国勤<sup>1</sup> 丁亚林<sup>1</sup> 惠守文<sup>1</sup> 田海英<sup>1</sup> 张景国<sup>1</sup> 李延伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为了提高彩色大面阵航空测绘相机的成像分辨率和测绘精度,对其前向像移补偿的可行性进行了分析,并设计了前向像移补偿机构。根据航空成像的中心投影模型,研究了前向像移补偿下航空测绘相机内、外方位元素的变化对成像过程的影响,证明了前向像移补偿的可行性;设计了一套基于等径共轭凸轮机构的前向像移补偿机构,并分析了各种误差因素对测绘精度的影响;提出了基于仿射变换的误差纠正方法。实验结果表明,提出的前向像移补偿方法正确,机构引入误差的纠正精度可以达到0.001 mm。

**关键词** 探测器;航空测绘相机;前向像移补偿;内方位元素标定;精度分析

**中图分类号** TP73      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/AOS201333.0128001

## Analysis of Forward Image Displacement Compensation and Error Correction for Area Scan Color CCD Airborne Mapping Camera

Yuan Guoqin<sup>1</sup> Ding Yalin<sup>1</sup> Hui Shouwen<sup>1</sup> Tian Haiying<sup>1</sup>

Zhang Jingguo<sup>1</sup> Li Yanwei<sup>1, 2</sup>

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

**Abstract** A forward image displacement compensation device is designed and its feasibility for area scan color CCD airborne mapping camera is researched to improve the ground pixel resolution and the mapping accuracy. The effect of intrinsic and extrinsic parameters on image point during forward image displacement compensation is emphatically analyzed based on imaging relation of central projection, and the feasibility of the forward image displacement compensation for airborne mapping camera is verified. The compensation device, which is based on constant-diameter conjugate cam is designed and factors' affecting the accuracy of aerial photogrammetry are studied. The rectified method is proposed by using affine transformation. Experimental results show that the rectified accuracy is 0.001 mm, and the proposed method of forward image displacement compensation is correct.

**Key words** detectors; airborne mapping camera; forward image displacement compensation; calibration of inner orientation elements; accuracy analysis

**OCIS codes** 120.0280; 120.4640; 190.4360; 280.1415

## 1 引 言

航空测绘是准确、快速地获取地理信息的重要技术手段,在当今数字信息时代具有重大的战略意

义和巨大的应用价值<sup>[1]</sup>。相对于星载航天测绘相机,航空测绘相机的优势之一在于可以绘制大比例尺的测绘图像,而成像分辨率对成图比例尺具有重

**收稿日期**: 2012-04-28; **收到修改稿日期**: 2012-07-04

**基金项目**: 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,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

要影响<sup>[2]</sup>,大的成图比例尺需要较高的成像分辨率,因此航空测绘相机应具有高的成像分辨率;相对于航空侦察相机,航空测绘相机的优势在于可以实现对地面目标的准确测量,因此航空测绘相机需要对影响成像过程的几何参数进行精确标定。

国外发达国家从 20 世纪 20 年代开始研制航空测绘相机,随着 CCD 探测器技术的发展,国外生产商推出了多种性能优异的 CCD 传输型测绘相机,其中基于面阵 CCD 的测绘相机因为每幅像片的外方位元素相同,具有对载机依赖度低,光束法平差几何强度高等优点<sup>[3]</sup>,获得了广泛应用。根据彩色图像的获取方式,彩色面阵 CCD 相机可分为两种类型<sup>[4,5]</sup>:1)多个单色面阵 CCD 组成的相机,工作原理为通过多个单色面阵 CCD 接收不同谱段的图像融合形成真彩色图像,如 Z/I Imaging 公司的 DMC 系列及 VexCel 公司的 Ultracam 系列,该类型相机可以利用时间延迟积分(TDI)进行前向像移补偿以提高分辨率,但光学系统结构复杂,装调配准困难,体积较大,价格昂贵;2)单个彩色面阵 CCD 相机,工作原理为通过 Bayer 滤波和彩色恢复算法形成伪彩色图像,具有系统结构简单、可靠性高和体积较小的优点,但其无法采用 TDI 补偿前向像移,为了提高成像分辨率,该类型的彩色面阵航空测绘相机需设计专用的前向像移补偿机构。

本文对航空测绘相机前向像移补偿进行了可行性分析,研究了彩色面阵 CCD 航空测绘相机的前向像移补偿机构及其误差对像点位置的影响,并提出了基于仿射变换的像点位置误差的纠正方法。

## 2 航空测绘相机前向像移补偿的可行性分析

不同于静态摄影,航空测绘相机在载机前向飞行中对地成像,曝光过程中像点相对于地面物点存在前向像移,导致图像分辨率、地面定位精度及高程精度的下降<sup>[6]</sup>。因此,需要进行前向像移补偿。

航空测绘的最终目的是根据测绘相机像片上像点的位置坐标计算相应地面点的空间位置,所以定义合适的坐标系来定量地表达像点和地面物点是进行航空测绘的前提<sup>[7]</sup>。

### 2.1 坐标系的定义

在定义坐标系之前,首先给出主点、主距的定义,适当的定义方式可以提高系统的测量精度<sup>[8,9]</sup>。在航空测绘领域,一般将光学系统的投影中心在像

平面的垂足点定义为主点,将该垂线的长度定义为主距<sup>[10,11]</sup>。

#### 2.1.1 像平面坐标系

像平面坐标系用来描述像点在像平面的位置:以主点为坐标原点,水平、竖直方向为  $x$ 、 $y$  轴,基本单位为毫米。

#### 2.1.2 数字图像坐标系

数字图像坐标系与像平面坐标系重合, $x$ 、 $y$  轴的基本单位为像元。

#### 2.1.3 辅助数字图像坐标系

为方便描述前向像移补偿这一动态过程,建立辅助数字图像坐标系:以 CCD 探测器左上角处像元边缘为坐标原点, $u$ 、 $v$  轴方向分别平行于像平面坐标系的  $x$ 、 $y$  轴,基本单位为像元。

#### 2.1.4 相机坐标系

相机坐标系以摄影中心  $S$  为坐标原点, $X$  轴和  $Y$  轴平行于像平面坐标系的  $x$  轴、 $y$  轴, $Z$  轴与测绘相机的主光轴重合。在相机坐标系中,每个像点的  $Z$  坐标均为  $-f$ ,如图 1 所示。

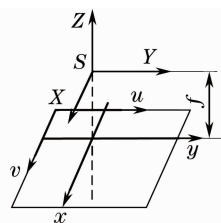


图 1 相机坐标系

Fig. 1 Camera coordinate system

相机坐标系随着测绘相机的主光轴变化,即使同一航迹中获取的多张像片,其相机坐标系也是各自独立的<sup>[4]</sup>,甚至是同一张像片,由于测绘相机在载机的前向飞行中曝光成像,相机坐标系也是在不断变化的。

上述 4 种坐标系是相互联系的,如图 2 所示,主点  $O$  在辅助数字图像坐标系中坐标为  $(u_0, v_0)$ ,像平面上存在一点  $a$ ,在辅助数字图像坐标系中坐标为  $(u_a, v_a)$ ,在数字图像坐标系、像平面坐标系和相机坐标系中坐标分别为  $(u_{xa}, v_{ya})$ 、 $(x_a, y_a)$  和  $(x_a, y_a, -f)$ ,具有

$$\begin{aligned} u_{xa} &= u_a - u_0, & x_a &= u_{xa} dx \\ v_{ya} &= v_a - v_0, & y_a &= v_{ya} dy \end{aligned}$$

用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

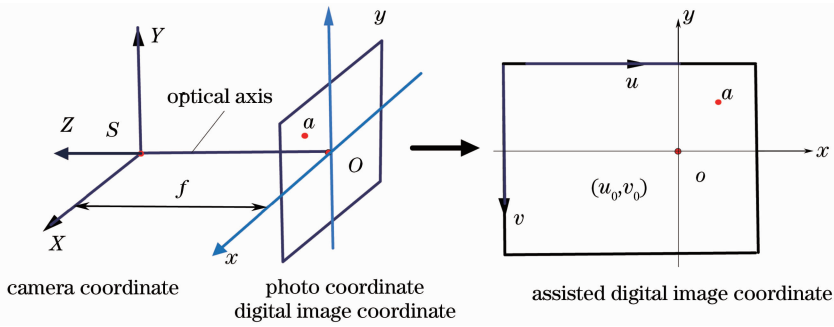


图 2 坐标系关系示意图

Fig. 2 Relation of the coordinate systems

式中  $dx, dy$  为彩色面阵 CCD 探测器在  $x, y$  方向单位像元大小, 单位为毫米每像元, (1) 式给出了各坐标系的转换关系。

### 2.1.5 地面测量坐标系

地面测量坐标系即为国家测图采用的高斯-克吕格 3°带或 6°带投影的平面直角坐标系和高程系, 航空测绘所求得的地面点空间坐标最终需转换为此坐标形式。

### 2.1.6 地面摄影测量坐标系

地面某一控制点所处的坐标系, 其  $Z_w$  轴与地面测量坐标系的  $Z$  轴平行, 定义其  $Y_w$  轴与航线一致,  $X_w$  根据右手坐标系确定。

## 2.2 前向像移补偿下航空成像的中心投影模型

假设航空测绘相机在  $t_0$  时刻快门打开, CCD 开始曝光, 以该时刻测绘相机光轴上与地面中物点  $A$  的  $Z$  坐标相同的点  $A_{oz1}$  为原点, 建立地面测量坐标系, 如图 3 所示。此时航空测绘相机摄影中心  $S_1$ 、地

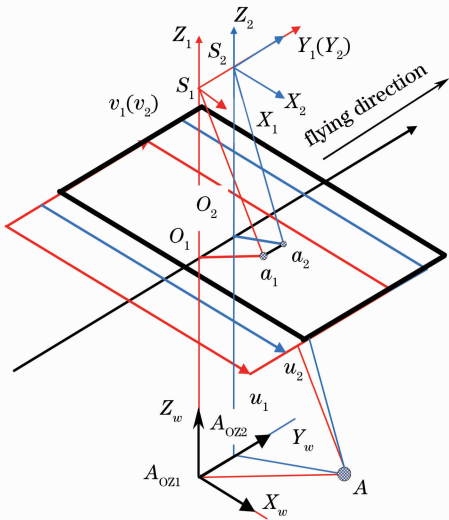


图 3 前向像移补偿下中心投影示意图

Fig. 3 Schematic diagram of central projection with forward image displacement compensation

面物点  $A$  在地面测量坐标系中坐标分别记为  $(X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1})$ 、 $(X_A, Y_A, Z_A)$ , 航空测绘相机主点  $O_1$ 、物点  $A$  的对应像点  $a_1$  在辅助数字平面坐标系中坐标分别记为  $(u_0, v_0)$ 、 $(u_x, v_x)$ 。

曝光过程中, 载机前向飞行造成的像移速度记为  $v_f$ , 则

$$v_f = \frac{V}{H}f, \quad (2)$$

式中  $V$  为载机飞行速度,  $H$  为载机飞行高度,  $H = Z_{S_1} - Z_A$ 。

曝光起始  $t_0$  时刻, 根据中心投影的构象方程<sup>[12]</sup>, 可得

$$\begin{cases} \frac{X_A - X_{S_1}}{H} = -\frac{u_x - u_0}{f} dx \\ \frac{Y_A - Y_{S_1}}{H} = -\frac{v_x - v_0}{f} dy \end{cases} \quad (3)$$

曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, 在完全补偿前向像移的情况下, 像移补偿机构驱动 CCD 探测器沿飞行方向相对于光轴移动距离为  $v_f \Delta t$ , 根据主点的定义,  $t_0 + \Delta t$  时刻测绘相机的主点发生变化, 变化后的坐标记为  $(u_{\Delta t}, v_{\Delta t})$ , 载机前向飞行同时造成摄影中心发生变化,  $t_0 + \Delta t$  时刻摄影中心记为  $S_2$ , 坐标为  $(X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2})$ 。航空测绘相机在完全补偿前向像移的理想成像过程中, 地面固定景物点始终成像在 CCD 探测器的固定位置处。曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, 物点  $A$  对应像点  $a_2$  坐标仍为  $(u_x, v_x)$ , 如图 3 所示。在  $t_0 + \Delta t$  时刻, 根据共线方程可得

$$\frac{X_A - X_{S_2}}{Z_A - Z_{S_2}} = -\frac{u_x - u_{\Delta t}}{f} dx, \quad (4)$$

$$\frac{Y_A - Y_{S_2}}{Z_A - Z_{S_2}} = -\frac{v_x - v_{\Delta t}}{f} dy. \quad (5)$$

曝光  $t_0$  时刻、 $t_0 + \Delta t$  时刻的摄影中心及主点位置满足如下关系:

$$\begin{aligned} v_{\Delta t} &= v_0 + V_f \Delta t \\ Y_{s_2} &= Y_{s_1} + V \Delta t, \\ Z_{s_1} &= Z_{s_2} \end{aligned} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式可得

$$f \frac{V \Delta t}{H} = V_f \Delta t, \quad (7)$$

记  $F_{ou} = f \frac{V \Delta t}{H}$ ,  $I_{in} = V_f \Delta t$ , 则  $F_{ou}$  为曝光过程中载机前向飞行引起的航空测绘相机外方位元素变化所导致的像移,  $I_{in}$  为曝光过程中前向像移补偿机构驱动 CCD 探测器的运动距离。(7)式表明,理想的光学系统中,在完全补偿前向像移的条件下,曝光过程中的任意时刻,载机前向飞行引起的外方位元素变化与前向像移补偿机构驱动 CCD 探测器运动引起的内方位元素变化对成像过程的影响相互抵消,由此可以得出如下结论:在具有前向像移补偿功能的航空测绘相机的理想成像过程中,完全补偿前向像移时,地面景物点始终成像在 CCD 探测器的固定位置,通过同步采集曝光起始时刻航空测绘相机的内、外方位元素,进而进行空间交会计算的方式,可以把动态摄影转化为等效的静态摄影,从而实现航空测绘相机前向像移的补偿。

### 3 航空测绘相机前向像移补偿机构

对于垂直成像的彩色大面阵航空测绘相机而言,前向像移是其主要的像移影响因素<sup>[13,14]</sup>。根据彩色大面阵航空测绘相机的结构特点,采用了等径共轭凸轮机构驱动 CCD 探测器的机械式像移补偿方式,该方式具有传动链短、误差传递环节小以及像面各点前向像移补偿速度一致的优点<sup>[15]</sup>。

前向像移补偿机构主要有电机、齿轮传动机构、一周离合器、凸轮轴、等径共轭凸轮机构、支撑结构、精密直线导轨以及轴角传感器等组成,如图 4 所示。

大面阵彩色 CCD 探测器作为从动件,通过精密直线导轨安装在等径共轭凸轮机构末端;等径共轭凸轮机构通过凸轮轴与一周离合器输出轴联接,一周离合器通过齿轮联接到电机上,轴角传感器布置在凸轮轴末端,采集 CCD 探测器的位置信息。

工作时,一周离合器首先吸合,电机通过齿轮机构驱动等径共轭凸轮机构中的凸轮轴旋转,配合精密直线导轨将电机的单向圆周运动转化为 CCD 探测器的匀速直线运动,实现对前向像移的补偿,轴角传感器作为像移补偿机构的位置反馈元件,采集曝光起始时刻 CCD 探测器相对于初始安装位置的位

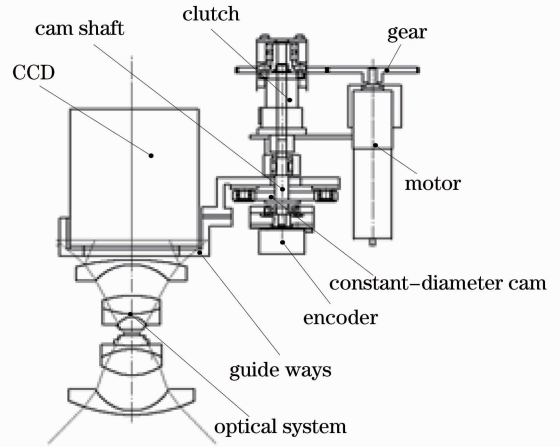


图 4 前向像移补偿机构简图

Fig. 4 Structural diagram of forward image displacement compensation device

移量。像移补偿机构工作一周后,一周离合器断开, CCD 探测器回到初始安装位置,保证每次拍照时测绘相机均具有相同的内方位元素初值。

根据(7)式,利用采集得到的 CCD 探测器的位移量,可以计算出曝光初始时刻航空测绘相机的内方位元素值。航空测绘相机与 POS 系统集成安装时,根据曝光初始时刻 POS 系统获取的外方位元素值,可以根据空间前方交会求解地面物点位置坐标。

### 4 前向像移补偿机构对像点位置误差的影响及纠正

根据上述分析,对于理想的光学系统,在完全补偿前向像移时,可以不经任何几何定标计算,直接根据曝光起始时刻的内、外方位元素值进行空间前方交会计算。但由于各种误差因素的影响,前向像移补偿机构驱动 CCD 探测器的运动速度不可能与载机前向飞行造成的前向像移速度完全一致,导致地面物点的成像点偏离理论位置,带来像点位置误差,像点位置误差改变目标的理论成像位置,使计算基准有较大的误差,对测量精度有很大的影响,需要进行纠正。

#### 4.1 像点位置误差影响因素分析

前向像移补偿机构是以导轨限制机构移动自由度的等径共轭凸轮机构,机构中各部件的机械加工、装调误差以及导轨的垂直性误差均会导致像点位置误差。

##### 4.1.1 导轨垂直性误差对像点位置误差的影响

理想情况下,前向像移补偿机构驱动 CCD 探测器沿前向飞行方向移动以补偿前向像移,但是由于加工装配误差,导轨实际运动方向与载机飞行方向

不严格垂直而成  $90^\circ + \epsilon$ , 这种情况下, 前向像移补偿机构将带来像点位置误差。

假设在曝光初始  $t_0$  时刻, 测绘相机在无穷小时间内完成曝光, 获取瞬时像片 M1。M1 中物点 A 成像在像面  $a(x, y)$  处,  $o$  点为该时刻的主点; 曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, 理想补偿前向像移时瞬时像片记为 M2, 导轨与像移补偿方向夹角为  $\epsilon$  瞬时像片记为 M2'。分别以像片 M1、M2、M2' 的左上角为坐标原点, 建立坐标系  $u_0 - v_0, u_{\Delta t} - v_{\Delta t}$  和  $u'_{\Delta t} - v'_{\Delta t}$ 。补偿前向像移过程中, CCD 探测器相对于光轴的运动量记为  $\delta$ , 如图 5 所示。

$a_{t_0+\Delta t}$  为完全补偿前向像移时物点 A 在 M2 的像点, 坐标系  $u_t - v_t$  中,  $a_{t_0+\Delta t}$  坐标为  $(x, y)$ ; 坐标系  $u'_t - v'_t$  中, 坐标值为  $(x, y)$  的像点记为  $a'_{t_0+\Delta t}$ , 根据中心投

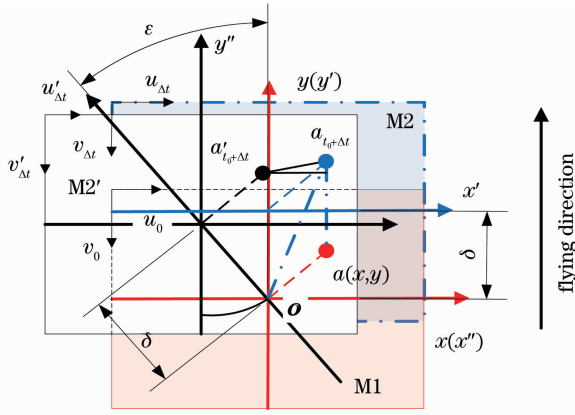


图 5 导轨垂直性误差对像点位置误差的影响  
Fig. 5 Influence of verticality error of guide on image position error

影成像模型, 物点 A 在导轨具有垂直性误差时仍然成像在  $a_{t_0+\Delta t}$  点, 则  $|a'_{t_0+\Delta t} a_{t_0+\Delta t}|$  即为导轨垂直性误差造成的像点位置误差。

根据坐标平移变换, 可求得

$$|a'_{t_0+\Delta t} a_{t_0+\Delta t}| = |\alpha a_{t_0+\Delta t}| - |\alpha' a'_{t_0+\Delta t}|.$$

记导轨垂直性误差造成的像点位置误差量为  $(v_{x_1}, v_{y_1})$ , 则

$$\begin{cases} v_{x_1} = \delta \sin \epsilon \\ v_{y_1} = \delta - \delta \cos \epsilon \end{cases} \quad (8)$$

#### 4.1.2 机械加工误差对像点位置误差的影响

根据前向像移的特点, 在曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, 像面上任一点  $a(x, y)$  的理论位移为

$$\delta = \frac{V}{H} f \Delta t = \frac{h}{\theta_0} \theta = \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots), \quad (9)$$

式中  $\delta$  为曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, CCD 探测器在像移补偿机构驱动下相对于光轴的位移量,  $\theta$  为凸轮转角,  $\frac{h}{\theta_0}$  为凸轮机构从动件的类速度,  $x_i$  为前向像移补偿机构中各零件名义尺寸值。

由于机械加工、制造、装调等误差的影响, 机构中零件名义尺寸  $x_i$  具有误差量  $\Delta x_i$ , 造成前向像移补偿机构具有位移误差  $\Delta \delta_i$ , 即

$$\delta + \Delta \delta_i = \frac{h}{\theta_0} \theta + \Delta \delta_i = \varphi(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_i + \Delta x_i)$$

等径共轭凸轮机构作为像移补偿机构的核心部件, 其加工误差、配合间隙将会对像点位置误差产生影响, 如图 6 所示。

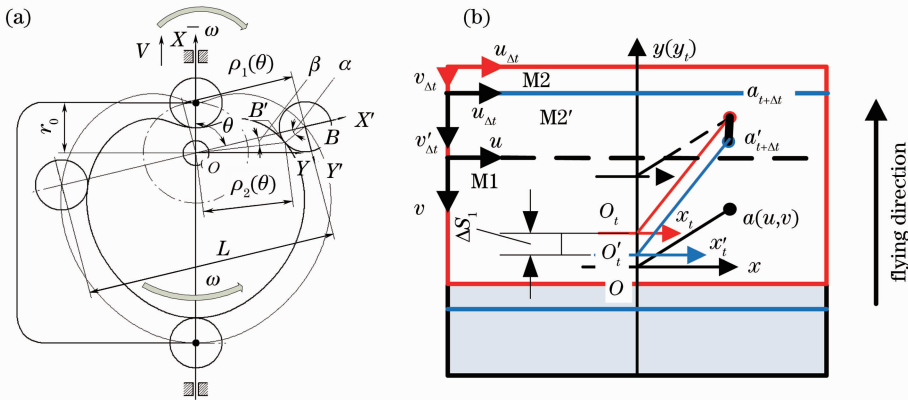


图 6 (a) 等径共轭凸轮与双联滚子间隙误差对位移误差的影响; (b) 位移误差导致的像点位置误差

Fig. 6 (a) Influence of fit clearance between constant-diameter conjugate cam and duplex roller on displacement error; (b) influence of displacement error on image position error

图 6(a)中  $r_0$  为等径共轭凸轮的基圆半径,  $R$  为双联滚子半径,  $L$  为双联滚子中心的理论跨距,  $B_1$ 、 $B_2$  为凸轮工作角度  $\theta$  时等径共轭凸轮理论廓线和实际廓线中的对应点,  $\rho_1(\theta)$ 、 $\rho_2(\theta)$  为  $\theta$  时理论轮廓、实际轮廓中对应向径,  $\alpha$  为  $\theta$  时凸轮压力角。在矢量环  $OBB_1$  中, 根据欧拉公式可得<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} &\rho_1(\theta) \exp[i(\theta + \beta)] + R \exp[i(\theta - \alpha)] = \\ &\rho_2(\theta) \exp(i\theta), \end{aligned} \quad (10)$$

凸轮工作角度  $\theta$  时滚子径向跳动误差记为  $\Delta R_{1i}$ , 其导致的机构位移误差记为  $\Delta L_1(\theta)$ , 根据(10)式可得

$$\begin{aligned} \Delta L_1(\theta) &= \frac{\partial \rho_2(\theta)}{\partial R} dR \approx \\ &\left( \cos \alpha - \frac{R \sin^2 \alpha}{\sqrt{\rho_2^2(\theta) - R^2 \sin^2 \alpha}} \right) \Delta R_{1i}, \end{aligned} \quad (11)$$

凸轮工作角度  $\theta$  时凸轮基体加工误差记为  $\Delta R_{2i}$ , 导致的机构位移误差记为  $\Delta L_2(\theta)$ , 可得

$$\Delta L_2(\theta) = \frac{\partial \rho_2(\theta)}{\partial \rho_1(\theta)} d\rho_1(\theta) \approx \left( \frac{\rho_2(\theta)}{\sqrt{\rho_2^2(\theta) - R^2 \sin^2 \alpha}} \right) \Delta R_{2i}, \quad (12)$$

滚子径向跳动误差  $\Delta R_{1i}$  及凸轮加工误差  $\Delta R_{2i}$  导致了凸轮工作角度  $\theta$  时的配合间隙, 其对机构位移误差的综合影响记为  $\Delta L(\theta)$ , 依据矢量合成原理:

$$\Delta L(\theta) = \Delta L_1(\theta) + \Delta L_2(\theta), \quad (13)$$

图 6(b)给出了机构的位移误差导致的像点位置误差  $|a'_{t_0+\Delta t} a_{t_0+\Delta t}|$ , 可得

$|a'_{t_0+\Delta t} a_{t_0+\Delta t}| = \alpha a_{t_0+\Delta t} - |\alpha'_{t_0+\Delta t}| = \Delta L(\theta)$ , 记机构位移误差造成的像点位置误差量为  $(v_{x2}, v_{y2})$ , 则可得

$$\begin{aligned} v_{x2} &= 0 \\ v_{y2} &= \Delta \delta_1 \end{aligned} \quad (14)$$

#### 4.1.3 控制系统误差对像点位置误差的影响

根据(9)式, 前向像移补偿速度与电机转速  $\omega$  关系为

$$\frac{d\delta}{dt} = f \frac{V}{H} = \frac{h}{\theta_0} \frac{d\delta}{dt} = \frac{h}{\theta_0} \omega. \quad (15)$$

(15)式表明, 电机需要驱动凸轮轴以恒定的速度  $\omega = f \frac{V\theta_0}{Hh}$  旋转, 对控制系统有较严格的要求。

前向像移补偿控制系统如图 7 所示, 为一个典型的数字速度控制系统。(15)式计算得出的像移补偿电机转速作为系统的给定量, 测速系统作为速度测量反馈元件与之形成闭环控制系统。由于控制系统中存在凸轮机构压力角的变化造成的负载不平衡, 电机不可避免的存在力矩波动, 影响电机稳定性, 凸轮轴的实际转速记  $\omega_i$ , 根据凸轮机构从动件的等速运动规律, 可得出控制系统精度对像点位置误差的影响  $\Delta \delta_2$ :

$$\Delta \delta_2 = \frac{h}{\theta_0} (\omega - \omega_i) t. \quad (16)$$

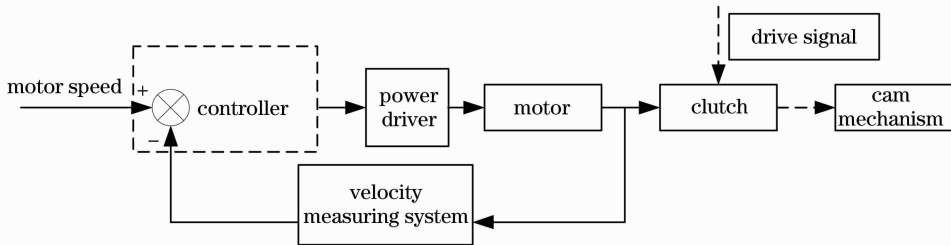


图 7 像移补偿控制原理框图

Fig. 7 Block diagram of control principle of image displacement compensation

图 8 给出了一个工作周期内电机的速度波动, 图中  $t_0$ 、 $t_0 + t$  分别对应曝光起始及曝光结束时刻。可根据(16)式计算得出控制系统导致的对像点位置误差。

#### 4.2 前向像移补偿过程中像点位置误差纠正模型

前向像移补偿机构提高了成像分辨率, 同时导致了像点位置误差, 影响测绘精度, 为此需要对测绘相机的前向像移补偿过程进行分析, 纠正像点位置误差<sup>[17]</sup>。

在曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻, 当且仅当像移补偿机构推动 CCD 探测器在  $u$ 、 $v$  两个方向均满足  $\Delta v_i = V_f \Delta t$ ,

$\Delta u_i = 0$  时, 才可以完全补偿前向像移, 即曝光初始  $t_0$  时刻与曝光  $t_0 + \Delta t$  时刻的辅助数字图像坐标系应满足如下变化关系: 坐标轴方向一致, 且仅原点坐标在  $y$  方向相差  $V_f \Delta t$ 。当有误差因素时, 导致  $t_0$  与  $t_0 + \Delta t$  时刻辅助数字图像坐标系出现转换误差, 从而导致像点位置误差的产生。根据曝光结束后所获取像片相对于曝光起始  $t_0$  时刻瞬时像片在辅助数字图像坐标系上的转换参数, 根据坐标变换原理可以对像点位置误差进行纠正。

影响像点位置误差的主要因素包括导轨垂直性

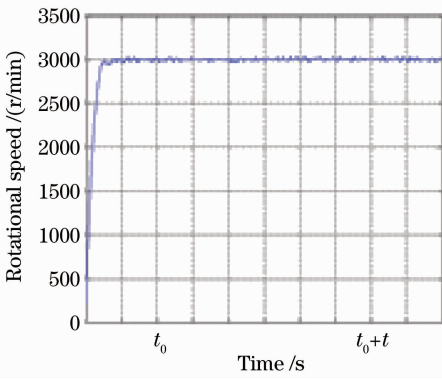


图 8 电机转速波动误差

Fig. 8 Fluctuation error of motor rotational speed

误差、机械加工误差等,根据(8)、(14)、(16)式,机械加工误差、导轨垂直性和控制系统误差对像点位置误差的综合影响( $\Delta_x, \Delta_y$ )为

$$\begin{cases} \Delta_x = (\delta - \Delta\delta_2 - \Delta\delta_1) \sin \epsilon \\ \Delta_y = \delta - (\delta - \Delta\delta_2 - \Delta\delta_1) \cos \epsilon \end{cases}, \quad (17)$$

像点位置误差纠正本质上是坐标系的变换,即将具有误差因素时所获取的像点转换至完全像移补偿时相机坐标系中<sup>[18]</sup>,因此采用仿射变换对像点位置误差进行二维变换纠正<sup>[19,20]</sup>。仿射变换可以纠正前向像移补偿机构导致的像点均匀性和非均匀性位置误差<sup>[21~23]</sup>。

像点位置误差纠正变换关系如下:记 $(\bar{x}, \bar{y})$ 为像移补偿过程中的理论像点坐标, $(x, y)$ 为获取像片的像点观测值坐标, $(v_x, v_y)$ 为像点位置纠正后的残差,根据仿射变换式,可得该点的残差方程为

$$\begin{cases} v_x = \bar{x} - (x + a_0 + a_1 x + a_2 y) \\ v_y = \bar{y} - (y + b_0 + b_1 y + b_2 x) \end{cases}, \quad (18)$$

式中共有 6 个未知的位置系数,至少需要 3 个观测点才可以求解。6 个位置系数原则上代表了二维变换中的 2 个平移量,1 个旋转量,1 个均匀性变形以及一个非均匀性变形,可以完全表达前向像移补偿过程中的误差项<sup>[19]</sup>。

根据仿射变换,可以给出其误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{x}$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 \\ & & \dots & \dots & & \\ 1 & 0 & x_i & 0 & y_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_i & 0 & y_i \\ & & \dots & \dots & & \\ 1 & 0 & x_n & & & y_n \\ 0 & 1 & & x_n & & y_n \end{bmatrix}_{2n \times 6},$$

$$\mathbf{V} = [v_{x_1}, v_{y_1}, v_{x_2}, v_{y_2}, \dots, v_{x_i}, v_{y_i}, \dots, v_{x_n}, v_{y_n}]^T$$

$$\mathbf{X} = [a_0, b_0, a_1, b_1, a_2, b_2]$$

$$\mathbf{L} = [\bar{x}_1 - x_1, \bar{y}_1 - y_1, \dots, \bar{x}_i - x_i, \bar{y}_i - y_i, \dots, \bar{x}_n - x_n, \bar{y}_n - y_n]_{2n \times 1},$$

$n$  为观测点数量,根据最小二乘原理,可得

$$\frac{\partial(\mathbf{V}^T \mathbf{V})}{\partial \mathbf{X}} = 2\mathbf{A}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{X} = 0,$$

可求得正规方程组解的矩阵表达式为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}, \quad (19)$$

像点位置的纠正精度

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-6}}. \quad (20)$$

当像面中含有框标时,可以根据框标校验点,利用最小二乘算法确定仿射变换的待估参数。大面阵彩色航空测绘数字相机在设计中未加入框标,无法采用框标校验点。为解决这个问题,采用外置平行光管的方法提供校验点。实验装置如图 9 所示,主要包括平行光管、精密转台、像点板和相机支架等。

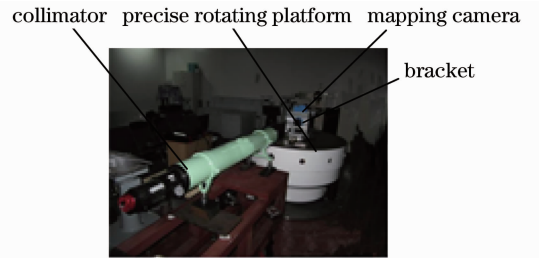


图 9 像点位置纠正实验装置

Fig. 9 Experimental setup of image point position correction

实验所用的星点板中共有 5 个星点孔,对角四个星点成矩形分布,中间一个星点位于其对角线交点处。实验过程如下:首先将测绘相机安装在相机支架上,相机支架具有俯仰、方位两个方向自由度,然后旋转精密转台使测绘相机在整个视场范围内对调平后的平行光管进行成像实验,根据实验像片调整相机支架,使在整个视场角范围内,通过平行光管的 5 个星点始终成像于测绘相机 CCD 探测器对应的 3 行像元上,即用平行光管将相机扫平,最后,调整精密转台零点,使中间的星点像位于静态内方位元素值的主点上,获取图像如图 10 所示。

在 CCD 探测器的工作区间内等间隔选取 10 个位置作为成像实验点,根据轴角传感器采集到的成像实验点处 CCD 探测器位置,计算星点像在辅助像数字图像坐标系中的理论坐标值,利用像元细分技

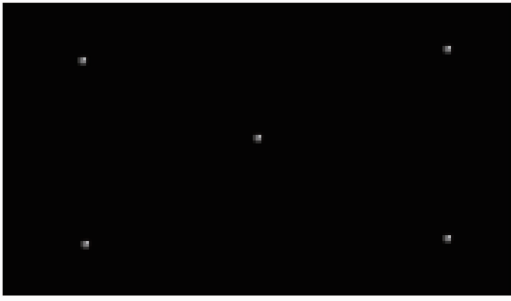


图 10 外置框标像图(局部)

Fig. 10 Fiducial mark image (local)

术分别获取像片中各星点像实际坐标值,获取矩阵  $A_{100 \times 6}$  和  $L_{100 \times 1}$ ,代入(19)式进行参数求解,利用(20)式进行纠正后的精度分析,纠正精度可以达到 0.001 mm。

## 5 实验验证

为进行内方位元素标定实验,彩色大面阵航空测绘相机与 POS 系统及激光测距仪在载机集成安装,如图 11 所示,航空测绘相机对地成像时,可由 POS 系统根据直接传感器定向获取 CCD 探测器初始曝光  $t_0$  时刻像片的高精度外方位元素,激光测距仪获取地面的数字高程模型(DEM);图 12 为控制



图 11 标定试验现场

Fig. 11 Calibration test scene



图 12 控制点分布图

Fig. 12 Distribution of ground control points

点分布图,单张像片中共有 10 个控制点,基本覆盖了整张像片。

载机飞行速高比为 0.08,航迹高度为 458 m,航空测绘相机曝光时间为 1/300 s,轴角传感器采集到的曝光初始时刻 CCD 探测器运动距离为 0.5422 mm,内方位元素初值如表 1 所示, $x_0$ 、 $y_0$  为主点在辅助图像坐标系中位置坐标  $f$  为主距。

表 1 初始位置处内方位元素参数

Table 1 Initial values of inner orientation elements

Element	$x_0$	$y_0$	$f / \text{mm}$
Value	43.678	24.338	56.027

对像点位置进行仿射纠正后,采用基于 POS 系统的单张像片后方交会计算像移补偿机构工作时的内方位元素。内方位元素计算结果如表 2 所示。

表 2 内方位元素改变量

Table 2 Absolute increments of inner orientation elements value

Element	$x_0$	$y_0$	$f / \text{mm}$
Absolute increment	0.003	0.529	0.005

从表 2 可以看出,求解的内方位元素值与曝光初始  $t_0$  时刻测绘相机的内方位元素值相符,证明了文中提出的根据曝光初始时刻的内、外方位元素进行交会计算,从而将动态摄影转化为静态摄影方法的正确性。

## 6 结 论

基于航空测绘的中心投影方程,论证了航空测绘相机机械式前向像移补偿的可行性,提出了一种基于等径共轭凸轮的彩色大面阵航空测绘相机的前向像移补偿机构。对前向像移补偿所涉及的各种影响测绘精度的误差因素进行了研究,并提出了基于仿射变换的误差纠正方法。实验结果表明提出的前向像移补偿下内方位元素定标方法、像点位置误差纠正方法准确可靠,验证了航空测绘相机前向像移补偿的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Yixiang. Research on technology of the aerial photography for the large scale digital aerial photogrammetric surveying system [J]. *J. Suzhou University (Engineering Science Edition)*, 2007, **27**(3): 56~58  
钱毅湘. 大比例尺数字化航测成图系统的相关技术探讨[J]. *苏州大学学报(工科版)*, 2007, **27**(3): 56~58
- 2 Liu Shunxi, You Shucheng, Zhang Dingxiang. An analysis of the requirement for spatial resolution of chinese earth observation satellite after CBERS-1 in land resource management [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2003, **14**(4): 6~8



- 刘顺喜, 尤淑撑, 张定祥. 土地资源管理对我国后续资源卫星数据空间分辨率的需求分析[J]. 国土资源遥感, 2003, **14**(4): 6~8
- 3 Wang Renxiang. Discussion on photogrammetry performance of different aerial photogrammetry sensors [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, **26**(2): 95~100  
王任享. 论不同航天摄影测量传感器的摄影测量性能[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, **26**(2): 95~100
- 4 Gordon Petrie. Airborne digital imaging technology: a new overview [J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, **22**(119): 205~207
- 5 Du Peng. Research on Technologies of the Large Format Color CCD Camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011  
杜鹏. 大面阵彩色 CCD 相机技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011
- 6 Ye Jinshan, Zhu Baozhang, Jiao Weidong. Control of image displacement for large-scale aero photography [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2001, (4): 9~10  
叶金山, 朱宝章, 焦维东. 大比例尺航空摄影影像位移量的控制[J]. 测绘通报, 2001, (4): 9~10
- 7 Wang Peijun, Xu Yaming. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010  
王佩军, 徐亚明. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010
- 8 Reg G. Willson, Steven A. Shafer. What is the center of the image? [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(11): 2946~2955
- 9 Wang Zhizhuo. The Principle of Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. 240~253  
王之卓. 摄影测量原理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. 240~253
- 10 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
- 11 Li Deren, Wang Shugen, Zhou Yueqin. An Introduction to Photogrammetry and Remote Sensing [M]. Beijing: Mapping Press, 2008. 11~112  
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. 11~112
- 12 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
- 13 Zhang Jingguo, Ding Yalin, Tian Haiying *et al.*. A compensation method of the forward image motion for a color plane array CCD mapping camera [J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(3): 460~463  
张景国, 丁亚林, 田海英等. 一种彩色面阵 CCD 测绘相机前向像移的补偿方法[J]. 应用光学, 2011, **32**(3): 460~463
- 14 Du Yunfei, Liu Bo, Hu Bingliang *et al.*. A compensation technology for image motion of full-frame CCD aerial camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2334~2336  
杜云飞, 刘波, 胡炳樑等. 一种全帧型 CCD 航空相机像移补偿方法[J]. 光子学报, 2007, **36**(12): 2334~2336
- 15 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): 12~18  
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): 12~18
- 16 Chen Shipai, Wang Tiejun. Some problems in inner orientation of photogrammetry [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2004, **27**(2): 21~23  
陈世培, 王铁军. 关于数字摄影测量内定向的几个问题 [J]. 测绘与空间地理信息, 2004, **27**(2): 21~23
- 17 Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen *et al.*. Accuracy analysis and optimization design of constant-diameter cam [C]. Proceedings of the IEEE Electric Information and Control Engineering, 2011, **1**(7): 5675~5677
- 18 Zhang Jianqing. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004  
张剑清. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004
- 19 Feng Wenhao. Close Range Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010  
冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010
- 20 Zhang Guo, Jiang Wanshou, Li Deren. A self-adaptive algorithm of automatic interior orientation for fiducial marks superimposition in images of objects images [J]. *Acta Geodaet Icaet Cartographica Sinica*, 2003, **32**(1): 67~69  
张过, 江万寿, 李德仁. 框标与影像叠置时的自适应内定向算法[J]. 测绘学报, 2003, **32**(1): 67~69
- 21 Duan Lianfei, Wang Guocheng, Huang Keming. The key technologies and realization of the full digital positioning instrument for unmanned aircraft vehicle photograph [J]. *J. Detection & Control*, 2008, **30**(s1): 72~74  
段连飞, 王国成, 黄克明. 无人机航空像片全数字定位仪的关键技术与实现[J]. 探测与控制学报, 2008, **30**(s1): 72~74
- 22 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512007  
王会峰, 王炳健. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0512007
- 23 He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023001  
贺鹏举, 梁斌, 张涛等. 大视场星敏传感器标定技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1023001