

文章编号:1007-2780(2015)03-0519-06

基于压电陶瓷直驱的前向像移补偿系统

魏君成*, 杨永明

(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:为补偿面阵测绘相机航摄成像过程中的前向像移,设计了采用压电陶瓷驱动器直接驱动焦平面组件的前向像移补偿系统,给出了前向像移补偿系统工作时序。压电陶瓷驱动器工作于位置闭环模式,通过斜坡递增设置压电陶瓷驱动器位置给定,使压电陶瓷驱动器驱动焦平面组件以期速度移动,补偿前向像移速度。实验结果表明,前向像移速度为 2.5 mm/s 时,前向像移补偿系统最大像移补偿残差为 0.38 μm ;前向像移速度为 3.5 mm/s 时,最大像移补偿残差为 0.48 μm ,远小于 1/3 像元尺寸。相机最长曝光时间为 20 ms 时,前向像移补偿频率可达 25 Hz,满足高频航测成像前向像移补偿需要。

关键词:前向像移补偿;压电陶瓷;航测成像

中图分类号:T386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153003.0519

Forward motion compensation system based on piezoelectric direct drive

WEI Jun-cheng*, YANG Yong-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Forward motion compensation (FMC) system for airborne area mapping camera is designed, and the working schedule is presented. The FMC system uses piezoceramic actuator to drive the focal plane module directly. The piezoceramic actuator works at position close loop mode whose given position is set incrementally. This makes focal plane module move at desired speed so that forward motion speed can be compensated. Experiments imply that the maximum FMC residual error of the FMC system is 0.38 μm when the forward motion velocity is 2.5 mm/s and the maximum residual FMC error is 0.48 μm when the forward motion velocity is 3.5 mm/s. The residual errors are far less than one third of the pitch dimension. The FMC frequency is 25 Hz which satisfies the demand of high frequency aerial FMC while the maximum exposure time is 20 ms.

Key words: forward motion compensation; piezoceramic; aerial imaging

收稿日期:2014-07-16;修订日期:2014-08-22.

基金项目:国家高分重大专项(民用部分)航空系统项目(No. 30-H32A01-9005-12/12)

* 通信联系人, E-mail: weijc@ciomp.ac.cn

1 引言

航空相机在航拍成像过程中,由于载机飞行、振动及相机摆扫成像等因素,使得曝光过程中地面景物与成像介质间产生相对运动,导致图像模糊、像质下降,即产生了像移^[1]。像移按产生原因可大致分为 4 类:载机前向飞行造成的前向像移;载机姿态变化带来的随机像移;载机震动及气流波动引起的震动像移;相机镜头摆扫产生的摆扫像移。本文主要研究航空面阵测绘相机前向像移补偿方法。

面阵测绘相机在航摄成像时载机的前向飞行将产生前向像移速度,在景物照度高的条件下可以采用减少曝光时间的方法减少前向像移影响;在景物照度低的条件下为获取高质量航测图像需较长曝光时间,此时必须采取前向像移补偿措施。时间延迟积分(TDI)^[2]技术适用于以单色面阵 CCD 为成像介质的测绘相机的前向像移补偿。目前面阵测绘相机多采用单片 CCD 或 CMOS 面阵探测器,通过 Bayer 滤波方式获取彩色图像。这类彩色测绘相机无法采用 TDI 技术,只能通过移动焦平面组件方式补偿前向像移。文献[3]和文献[4]采用等径共轭凸轮机构驱动焦平面组件补偿前向像移,该方法补偿精度较低,难以满足大比例尺测绘制图要求。压电陶瓷以位移分辨率高、驱动力强、响应速度快等特点得到广泛应用^[5-6]。本文设计了一种采用压电陶瓷直接驱动焦平面组件的快速、高精度前向像移补偿系统。首先给出了像移补偿机构及工作方式,然后设计了像移补偿系统工作时序,最后通过实物实验对所设计的前向像移补偿系统进行性能验证。

2 航测成像前向像移

面阵测绘相机在航摄成像过程中,垂直地面安装,面阵 CCD 平行于地面。来自地面景物的光线经大气和光学镜头成像在面阵 CCD 上,实现对地面上一个区域成像^[7](图 1)。随着飞机前向飞行,相机对地面上另一区域成像,通过设置拍照

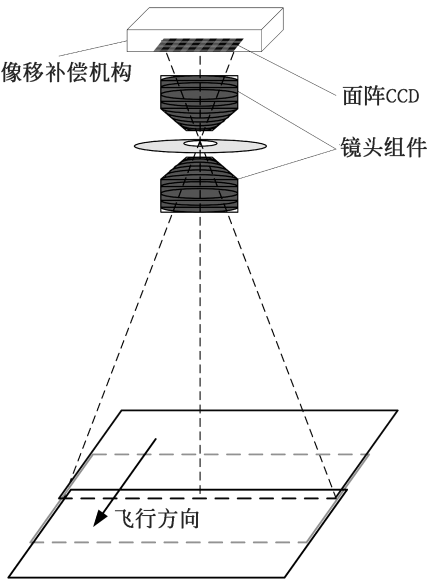


图 1 航测成像过程

Fig. 1 Imaging process of aerial photogrammetry

周期,可以控制相邻两次成像的重叠率。

在相机成像过程中,像移将引起图像质量的下降。设地面景物点 A 对应于像面上的像点为 A', 成像过程中像点 A' 的像移线速度 V_F 可用式(1)计算。

$$V_F = \frac{V}{H/\cos(\theta)} \times \frac{f}{\cos(\theta)} = \frac{V \times f}{H}, \quad (1)$$

式中: V 表示载机飞行速度, H 表示地面景物与载机的相对高度, f 表示相机镜头焦距, θ 表示直线 AA' 与镜头主光轴间的夹角。由式(1)可知,像面上任意一点的像移线速度 V_F 均相同,推动像面以 V_F 移动可实现对测绘相机航摄前向像移的完全补偿。

3 前向像移补偿策略

3.1 像移补偿机构

像移补偿机构采用压电陶瓷作为执行机构(如图 2 所示)。焦平面组件置于精密导轨上,精密导轨沿航向排列,焦平面组件可以沿航向进行直线运动。压电陶瓷通过柔性连接头与焦平面组件固连,柔性连接头可以消除侧向力对压电陶瓷的影响。压电陶瓷伸展方向与焦平面组件运动方向一致,当压电陶瓷驱动电压变化时,将产生推拉

直线运动,驱动焦平面组件补偿前向像移。

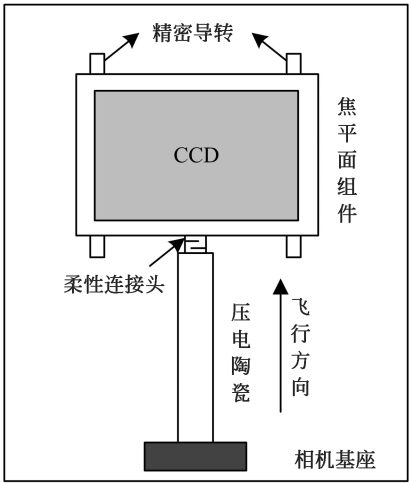


图 2 像移补偿机构

Fig. 2 Image motion compensation mechanism

3.2 位置控制

压电陶瓷具有迟滞非线性这一特性,同样的输入电压因为加压历史的不同对应不同的输出位移,同样的输出位移对应不同的输入输出曲线。压电陶瓷的这一特性影响了开环位置控制精度,难以满足像移补偿精度的要求。因此采用闭环控制以提高位置控制精度。位置控制回路框图如图所示,位置校正算法采用经典的 PID 算法^[8],控制系统中引入了陷波器以消除系统低频谐振对系统闭环带宽的影响,提高系统的影响速度及位置控制精度。采用应变(SGS)传感器作为位置反馈原件,应变传感器位置分辨率优于 2 nm。

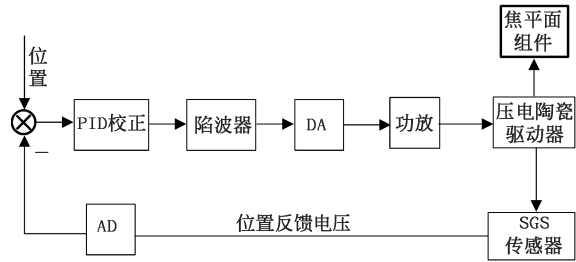


图 3 位置控制框图

Fig. 3 Schema of position control

3.3 像移速度补偿

压电陶瓷驱动器工作于位置闭环方式,为实现焦平面组件以特定速度移动,采用斜坡递增方式设置压电陶瓷驱动器目标位置,如图 4 所示。设相机在拍照过程中前向像移速度为 $v \mu\text{m}/\text{ms}$,

相机像元尺寸为 $p \mu\text{m}$,为获取清晰的图像,曝光过程中像移量不应超过像元尺寸的 $1/3$,因此位置给定更新时间间隔 Δt 需小于 $p/(3v) \text{ ms}$ 。

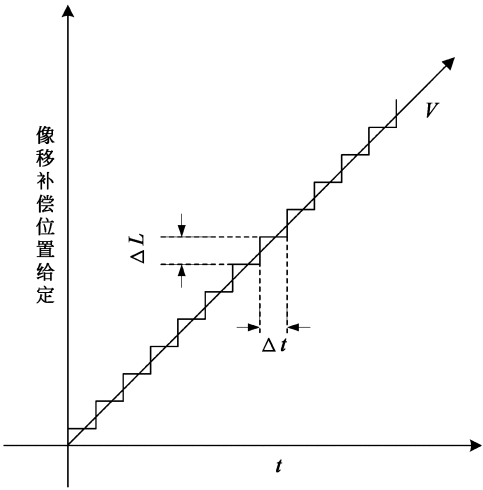


图 4 前向像移补偿给定位置设置

Fig. 4 Given position setting of FMC

3.4 像移补偿时序控制

航测成像过程中前向像移补偿系统需对像移补偿时序进行控制,保证相机拍照过程中焦平面组件处于像移速度补偿状态,拍照完成后焦平面组件需返回至拍照初始位置。像移补偿系统时序控制如图 5 所示。像移补偿系统收到拍照指令后开始检测摄影脉冲信号,摄影脉冲信号为高电平时,像移补偿系统处于位置模式,驱动焦平面组件到达拍照初始位置;摄影脉冲信号为低电平时像移补偿系统工作于速度模式,驱动焦平面组件补

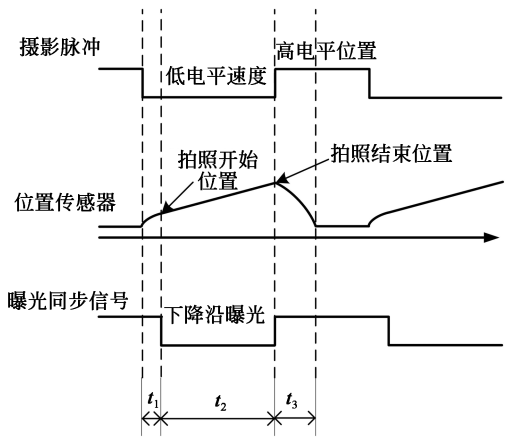


图 5 像移补偿系统工作时序

Fig. 5 Schedule of FMC system

偿前向像移补偿速度。摄影脉冲信号由高电平变为低电平后,焦平面组件由初始位置启动, t_1 时段处于稳速过程,焦平面组件到达主点位置时曝光同步信号置为低电平,CCD 收到曝光同步信号下降沿后执行清电荷操作并开始曝光; t_2 时段像移补偿系统驱动焦平面组件补偿前向像移; t_3 时段像移补偿系统由速度方式转为位置方式,驱动焦平面组件返回到拍照初始位置。如此循环,直至拍照结束。

4 实验分析

为进一步分析前向像移补偿策略的性能,进行了实物实验。实验采用德国 PI 公司生产的 P-843.60 型压电陶瓷驱动器推动焦平面组件进行前向像移补偿。P-843.60 型压电陶瓷驱动器性能参数如表 1 所示。功率放大器选用德国 PI 公司生产的 E-505 型压电陶瓷功率放大器。采用高速 DSP 芯片控制压电陶瓷像移补偿过程,位置给定更新时间间隔 Δt 为 1 ms。像移补偿实验装置如图 6 所示,压电陶瓷驱动器通过柔性连接头直接驱动焦平面组件移动,焦平面组件重量约为 1 kg。通过整定 PID 及陷波器参数,像移补偿机构位置环阶跃响应时间小于 10 ms,闭环带宽优于 150 Hz,具有良好的快速性。像称补偿实验场景如图 7 所示。

表 1 P-843.60 型压电陶瓷驱动器性能参数
Tab.1 Performance perimeters of P-843.60 piezoceramic

参 数	数 据
行程	90 μm
最大推力	800 N
最大拉力	300 N
无负载谐振频率	6k Hz
工作温度	-20~+80 $^{\circ}\text{C}$
位置传感器	应变传感器

由式(1)可知,速高比及焦距决定前向像移补偿速度,航摄成像过程中曝光时间通常较短,可认为曝光过程中速高比不变,镜头焦距为确定量,因此曝光过程中前向像移补偿速度不变。实验过程中选择 2.5 mm/s 及 3.5 mm/s 具有代表性的前

向像移补偿速度,像移补偿时间为 20 ms。

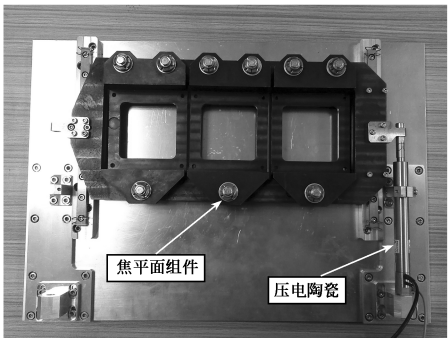


图 6 焦平面组件实验装置
Fig.6 Experimental setting of focal plane module

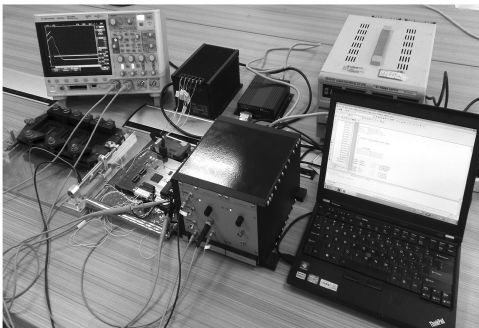


图 7 前向像移补偿实验场景
Fig.7 Experiment scene of FMC

4.1 2.5 mm/s 像移补偿速度

压电陶瓷前向像移补偿系统补偿 2.5 mm/s 像移补偿速率时,焦平面组件位置在压电陶瓷驱动下的变化情况如图 8 所示。焦平面组件首先以 2.5 mm/s 做匀速运动以补偿前向像移,然

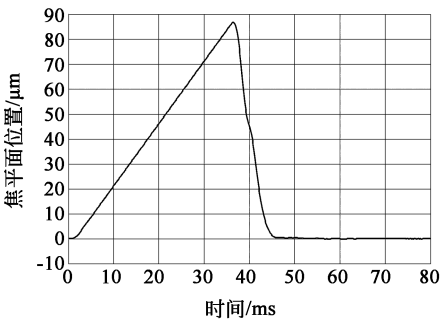


图 8 2.5 mm/s 像移速率焦平面组件位置随时间变化情况
Fig.8 Position of focal plane module vs. time at 2.5 mm/s image motion velocity

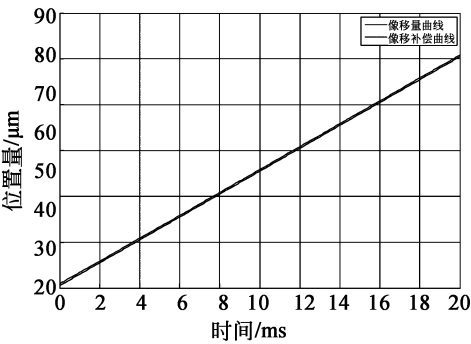


图 9 2.5mm/s 像移速率焦平面组件位置与像移量对比

Fig. 9 Position of focal plane module vs. image motion displacement at 2.5mm/s image motion velocity

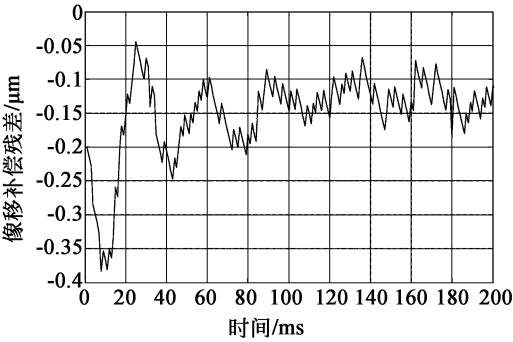


图 10 2.5mm/s 像移速度像移补偿残差随时间变化情况

Fig. 10 FMC residual error vs. time at 2.5mm/s image motion velocity

后再返回至拍照起始位置为下次像移补偿做准备。图 9 表明了在 2.5mm/s 像移补偿速率作用下像移量与焦平面组件位置随时间变化情况,可见焦平面组件的位移量与前向像移量一致,前向像移得到良好补偿。图 10 给出了在 2.5 mm/s 像移补偿速率作用下前向像移补偿残差随时间变化情况,最大像移补偿残差为 0.38 μm 。

4.2 3.5 mm/s 像移补偿速度

图 11 给出了在 3.5 mm/s 像移补偿速率时,焦平面组件位置随时间变化情况,焦平面组件完成像移补偿后返回到拍照起始位置。图 12 表明了 3.5 mm/s 像移补偿速率作用下像移量与焦平面组件位移量随时间变化情况,前向像移得到良好补偿。图 13 给出了在 3.5 mm/s 像移补偿速率作用下前向像移补偿残差随时间变化情况,

最大像移补偿残差为 0.48 μm 。

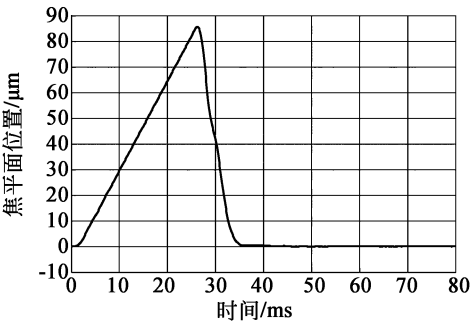


图 11 3.5 mm/s 像移速率焦平面组件位置随时间变化情况

Fig. 11 Position of focal plane module vs. time at 3.5 mm/s image motion velocity

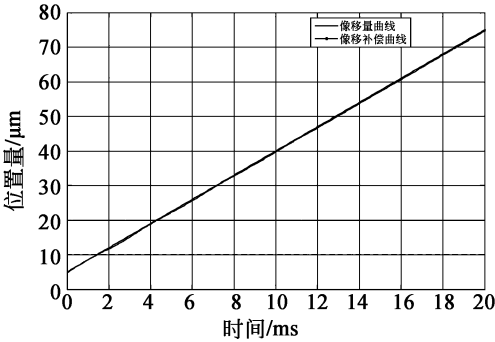


图 12 3.5 mm/s 像移速率焦平面组件位置与像移量对比

Fig. 12 Position of focal plane module vs. image motion displacement at 3.5 mm/s image motion velocity

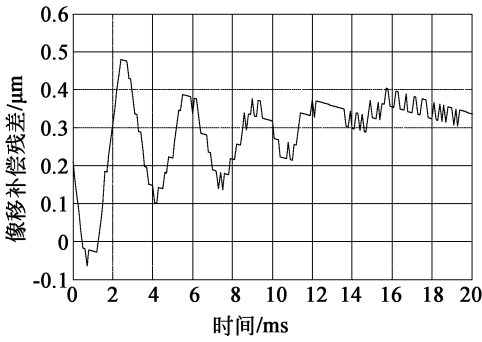


图 13 3.5 mm/s 像移速度像移补偿残差随时间变化情况

Fig. 13 FMC residual error vs. time at 3.5 mm/s image motion velocity

5 结 论

针对航空测绘相机航测成像过程中的前向像移补偿问题,设计了一种以压电陶瓷驱动器为执行机构的前向像移补偿策略。实验结果表明,前向像移补偿策略能够控制焦平面组件以预设控制时序完成像移补偿。前向像移速度为 2.5 mm/s 时最大像移补偿残差为 0.38 μm ,前

向像移速度为 3.5 mm/s 时最大像移补偿残差为 0.48 μm 。目前航测相机像元尺寸小于 5 μm ,前向像移补偿策略满足最大像移补偿残差小于 1/3 像元尺寸要求。

通过实验数据可知焦平面组件回位时间小于 15 ms,像移补偿稳速时间小于 5ms。相机最长曝光时间为 20 ms 时,前向像移补偿频率可达 25 Hz,满足航测成像高频率前向像移补偿要求。

参 考 文 献:

- [1] 刘明,匡海鹏. 像移补偿技术综述[J]. 光电与控制, 2004, 11(4):46-49.
Liu M, Kuang H P. Survey on the image motion compensation technology [J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(4):46-49. (in Chinese)
- [2] 王德江,匡海鹏,蔡希昌,等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2465-2472.
Wang D J, Kuang H P, Cai X C, *et al.* Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12):2465-2472. (in Chinese)
- [3] 李延伟,远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11):2439-2443.
Li Y W, Yuan G Q. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11):2439-2443. (in Chinese)
- [4] 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正[J]. 光学学报, 2013, 33(1):0128001-1~0128001-9.
Yuan G Q, Ding Y L, Hui S W, *et al.* Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):0128001-1~0128001-9. (in Chinese)
- [5] 范伟,余晓芬,奚琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):368-371.
Fan W, Yu X F, Xi L. Research on driving system and controlling means of PZT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3):368-371. (in Chinese)
- [6] 廖胜凯,刘银年,陈小文,等. 采用压电陶瓷驱动器的高频像移补偿系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3):539-543.
Liao S K, Liu Y N, Chen X W, *et al.* High frequency motion compensation system based on PZT actuator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3):539-543. (in Chinese)
- [7] 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.
Zhang J G, Ding Y L, Tian H Y, *et al.* A compensation method of the forward image motion for a color plane array CCD mapping camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3):460-463. (in Chinese)
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社, 2012.
Liu J K. *Advanced PID control MATLAB simulation* [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)

作者简介:魏君成(1981—),男,吉林长春人,学士,助理研究员,主要从事航天光学遥感相关研究。E-mail:weijc@ciomp.ac.cn

杨永明(1980—),男,吉林四平人,博士,副研究员,主要从事航天光学遥感相关研究。