

面阵航空相机的图像稳定技术研究

姜 博,葛明锋,刘 敏,王义坤,王雨曦,周潘伟,亓洪兴

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室,上海 200083)

摘 要: 航空相机是对地勘查测量获取信息的重要设备,通常采用前向飞行结合翼展方向摆扫的方式来扩大航空相机视场。着眼于扩大视场带来的运动像移问题,进一步严格推导了飞行和翼展两个方向的像移补偿公式,提出了实用性较强的像移补偿方案。基于 MATLAB/Simulink 环境对像移补偿系统数学建模进行仿真验证,仿真结果证明了该补偿方案的可实现性。在硬件实验中采用 FPGA 芯片作为核心芯片,实现了设计方案中像移补偿的功能。实验和仿真结果曲线实现了较好的吻合,像移补偿效果图进一步证明了像移补偿是提高航空成像质量和分辨率必不可少的环节。

关键词: 像移补偿; 摆扫; 面阵航空相机; 视场; 分辨率

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3467-07

Research on image stabilization technology of area-array aerial camera

Jiang Bo, Ge Mingfeng, Liu Min, Wang Yikun, Wang Yuxi, Zhou Panwei, Qi Hongxing

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Aerial camera is an important device on obtaining information by the method of air-to-ground investigation and measurement. The way of forward flight together with pendulum scanning in the direction of wingspan is commonly used for broadening the field of view of aerial camera. The problem of image motion compensation was focused on, which was produced by broadening the field of view. The image motion compensation formulas of the flight and wingspan direction were further derived, and the high practicability compensation scheme was proposed. Based on the MATLAB/Simulink environment, the mathematical model of image motion compensation was simulated and verified. Simulation results show that the compensation scheme is achievable. In the hardware experiment, the circuit which was mainly made of the FPGA chip was used to achieve the function of image motion compensation. The experimental and simulation result curves are in good agreement. The effect images further certificate that the image motion compensation is an indispensable link in improving the imaging quality and resolution.

Key words: image motion compensation; pendulum scanning; area-array aerial camera;
field of view; resolution ratio

收稿日期:2014-02-10; 修订日期:2014-03-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB723900)

作者简介:姜博(1984-),男,博士生,主要从事红外成像、红外图像处理、光机电一体化系统等方面的研究。Email:jiangboit@163.com

导师简介:薛永祺(1937-),男,中国科学院院士,主要从事红外技术和光电遥感器方面的研究。Email:xueyongqi_cas@126.com

0 引言

航空照相机是安装在飞行器上从空中摄取地面图像的光学精密仪器,可以实现资源探索、灾害监测和地图绘制等。受相机探测器发展水平及光学技术等限制,航空成像系统的瞬时视场都不大,当前乃至将来相当长时间内,前向飞行结合翼展方向扫描仍是获取大视场、高分辨率对地图像的主要技术途径。

飞机前向飞行结合翼展方向扫描在扩大视场的同时也衍生出其他问题,航空相机在对地面目标成像期间始终存在飞行和翼展方向的运动量,曝光时间内相机与目标存在相对运动,目标在焦平面上所成的像不是静止的,而是运动变化的,即运动像移。造成所成图像模糊并存在拖尾现象,使得图像对比度和分辨率均下降。总体来说,运动像移主要分为飞机飞行方向和与其垂直的翼展摆扫方向^[1-2]。

国内外对像移补偿的研究,大部分是停留在理论层面^[2-3],实际应用中大多采用线阵成像器件,由于线阵器件曝光时间很短,在曝光时间内相机与目标之间的相对运动量很小,可以忽略此运动像移。这样缩短了曝光时间造成图像的信噪比降低,对图像的分辨率影响很大。综上所述,文中提出了基于面阵成像的方式,按照严格推导的两个方向的像移公式,进行飞机飞行方向和与其垂直的翼展摆扫方向的实时运动像移补偿,以此来获取大视场高分辨率的航空对地图像。

1 航空相机成像原理

常见的航空相机成像方式主要划分为推扫式和画幅式两种,推扫式的工作方式大多采用线阵成像器件,而画幅式的工作方式主要使用面阵成像器件。如图 1(a)所示,推扫式相机在工作时,行与行之间的图像信息是从空间不同点获得的,然后再由一行行信息合成一幅图像,这样从一行到下一行因横滚、俯仰和偏航角的差异等因素将导致图像垂直方向失真。而画幅式照相是从空间一点就可拍摄一整幅图像,各幅图像再拼接成一幅大视场图像,这样可以保证很高的几何保真度,如图 1(b)所示^[2]。

相比较于推扫式成像方式,画幅式显著增加了

曝光时间,这样能够有效地提高图像的信噪比。但与此同时,由于曝光时间的增长,曝光时间内相机与目标存在相对的运动量增加了很多,曝光期间目标在焦平面上所成的像运动变化比较明显,不能再如推扫式那样忽略此像移量,必须进行相应的像移补偿,总体来说,运动像移主要分为飞机飞行方向和与其垂直的翼展摆扫方向。

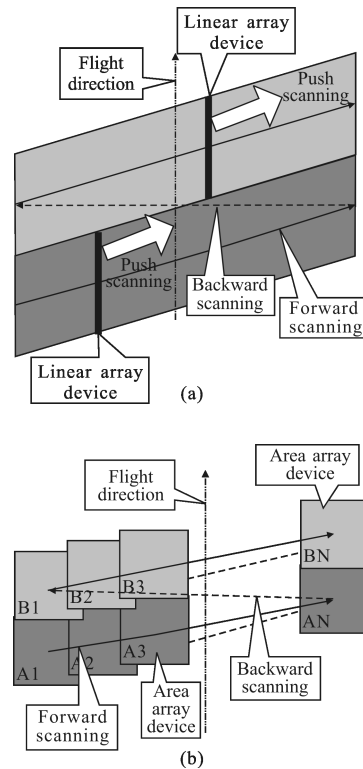


图 1 航空相机成像原理图

Fig.1 Imaging principium of aerial camera

像移补偿机构依据如下原理进行实时像移补偿,采用补偿振镜组成的光学系统,使光线按照特定的规律改变方向,在曝光时间内使感光介质始终对地面同一目标成像。在实验中通过摆动镜头前面的补偿镜,使光线按照指定方向和速度移动,使产生的补偿速度与像移速度始终相同,补偿方向与摆扫方向相反,从而达到实时补偿像移的目的^[2]。

2 计算模型

2.1 摆扫方向补偿公式

摆扫方向的像移补偿原理如图 2 所示,虚框内为整个成像系统,起始时景物 M 从 E 位置按光路 1,经过 A 位置的补偿镜后沿光路 3 成像于焦平面的

M' 点。系统在工作时,由于翼展方向的摆扫运动,虚框内的设备要沿图示的逆时针方向运动。为直观起见,这里假定虚框内的成像系统静止,外界景物 M 相当于从 E 位置旋转到 F 位置,旋转了 θ 角,这里 E 、 F 位置为任意两个位置。

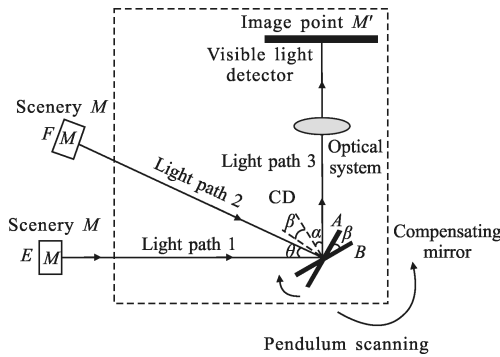


图 2 摆扫方向补偿示意图

Fig.2 Compensation diagram in direction of pendulum scanning

这时补偿镜按摆扫相反方向运动,顺时针从 A 位置移动到 B 位置,假定移动了 β 角。这个角度使得光路 2 经过 B 位置的补偿镜后也按光路 3 将景物 M 成像于焦平面上同一点 M' 。从而在摆扫运动的过程中,使景物 M 始终成像在焦平面上的同一点。

由光路的可逆性原理,这里将光路 3 看作入射光线,光路 1、2 看做出射光线。由于补偿镜移动了 β 角,所以补偿镜的两个位置 A 、 B 的法线 C 、 D 也移动了 β 角。由于两个位置的入射光线都为光路 3,法线又相差 β 角。由于入射角等于反射角,所以两个位置的反射角也相差 β 角。

这样光路 1 与光路 2 的夹角 θ 相当于两个位置的入射角加反射角,再做差值。即:

$$\theta=2\beta \tag{1}$$

设景物 M 从位置 E 旋转到 F 的时间为 t , 因为是匀速旋转,所以:

$$\omega_c=\frac{\omega_p}{2} \tag{2}$$

式中: ω_c 为补偿角速度; ω_p 为摆扫角速度,rad/s。

2.2 飞行方向补偿公式

飞行方向的像移补偿原理如图 3 所示,虚框内为整个成像系统,起始时景物 A 沿光路 1 经过 B 位置的补偿镜后按光路 3 到达 D 位置的焦平面上 A' 点,如果飞机按图示方向飞行,经过曝光时间 t 后焦平面到达位置 E ,补偿镜到达位置 C 。

这时如果补偿镜旋转一个合适的角度,使得地面景物 A 按光路 2 到达 C 位置的补偿镜后,使得出射光线仍沿光路 3 出射,这时将到达 E 位置的焦平面上的同一点像点 A' 。也就是说在 t 时间内,成像系统始终对地面景物 A 成像,而且成像到焦平面上的同一像点,这样就能消除曝光时间 t 内景物和成像系统之间的相对运动,也就是说像在焦平面上没有相对移动。

在图 3 中,为了保证没有像旋的存在,起始时一般对垂直向下的景物成像,所以 B 位置的补偿镜和水平方向成 45° ,所以这个位置的入射角

$$\theta=\varphi=45^\circ \tag{3}$$

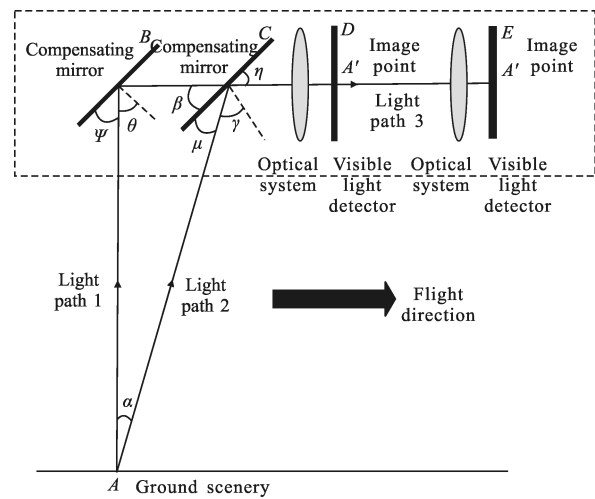


图 3 飞行方向补偿示意图

Fig.3 Compensation diagram in direction of flight

又由于入射角等于反射角,所以有:

$$\alpha+\beta+\mu=90^\circ \tag{4}$$

由对角定理知:

$$\beta=\eta \tag{5}$$

由 C 位置的补偿镜中入射角等于反射角可知:

$$\mu=\eta \tag{6}$$

所以

$$\beta=\mu=\frac{90^\circ-\alpha}{2}=45^\circ-\frac{\alpha}{2} \tag{7}$$

因为曝光时间相对很短,为毫秒量级,而飞行高度很高,为万米量级的,所以 α 角很小,因此:

$$\alpha \approx \tan\alpha=\frac{vt}{H} \tag{8}$$

式中: v 为飞机速度,这里为匀速; t 为曝光时间,也就是以上两个位置的时间差; H 为飞行高度。补偿镜

在时间 t 内旋转的角度等于:

$$\varphi - \mu = 45^\circ - \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{\alpha}{2} = \frac{vt}{2H} \quad (9)$$

所以补偿的角度速度为:

$$\omega = \frac{\varphi - \mu}{2} = \frac{v}{2H} \quad (10)$$

这里 ω 单位为 rad/s。

3 实验与分析

3.1 仿真模型

航空相机像移补偿系统是典型的位置控制系

统, 由于飞机飞行方向和翼展扫描方向补偿模型类似, 这里以飞行方向补偿模型为例进行分析。该控制系统采用典型的电流环、速度环、位置环 3 环 PID 校正算法, 这里忽略了摩擦、空气阻力等。Simulink 仿真模型如图 4 所示^[4-6], 其中 R_a 为电机的相电阻; L 为电机相电感; K_m 为力矩系数; K_e 为反电动势系数; J 为负载转动惯量折算到电机轴上的值; CurPID、VelPID、PosPID 分别为电流环、速度环、位置环校正环节; IGBT 为逆变器, 可以等效为比例环节和延时环节的串联。

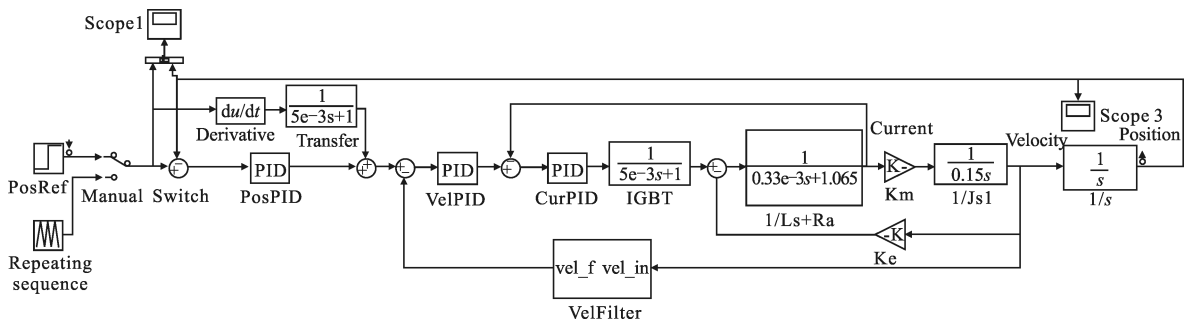


图 4 Simulink 仿真模型

Fig.4 Simulating model in Simulink

K_m 和 K_e 的计算方法如公式(11)、(12)所示:

$$K_m = \frac{T_{ld}}{I_{ld}} \quad (11)$$

$$K_e = \frac{U_0}{n_0} \quad (12)$$

式中: n_0 为空载时的最大转速, 其对应最大电压为 U_0 ; T_{ld} 为连续堵转转矩, 对应连续堵转电流为 I_{ld} 。如果采用弧度单位制, 则可近似认为 $K_m \approx K_e$, 文中所用直流电机的实际参数如表 1 所示。

表 1 实际系统参数值

Tab.1 Parameter values of actual system

Phase resistance (Ra/Ω)	Phase inductance (L/mL)	Torque constant ($K_m/N \cdot m \cdot A^{-1}$)	Back EMF coefficient ($K_e/V \cdot s \cdot rad^{-1}$)	Rotational inertia ($J/kg \cdot m^2$)
1.065	0.33	2.586	2.586	0.15

在图 4 中, PosRef 为给定位置信号, 它和测得的实际位置值进行比较, 将差值送入位置环 PID 调节器, 输出的信号再和采样得来的实际速度信号(经过了坐标变换)比较, 差值送入速度环 PID 调节器, 输

出的信号再和采样得来的实际电流信号(经过了坐标变换)比较, 差值送入电流环 PID 调节器, 输出值送入 IGBT 模块生成占空比可变的 6 路上下互补的 PWM 波形, 控制 IGBT 输出模拟正弦波进而控制电机, 使得电机实际位置跟随给定位置的变化而变化^[7]。

图 5(a)、(b)分别为仿真模型的单位阶跃响应曲线和幅频相频特性曲线, 从图 5(a)中可以看出, 系统上升时间为 0.096 1 s, 调节时间为 0.799 s, 系统能够快速响应外界的给定信号, 并且能够快速达到稳定状态。从图 5(b)中能够看出, 系统带宽为 19.6 rad/s, 相位裕量为 108, 这说明系统闭环稳定。

仿真结果曲线如图 6 所示, 曲线 1 为给定的位移信号, 曲线 2 为系统实际反馈位移曲线。仿真前一半时间同步信号有效, 这个同步信号使得补偿系统开始工作。在这段时间内补偿系统按照给定的信号进行匀速摆扫, 来同步消除飞机飞行方向和翼展摆扫方向的运动像移。在仿真的后一半时间同步信号无效, 补偿振镜处于静止位置, 不进行运动像移补偿。有了同步信号的存在, 就可以更加灵活地控制补

偿系统进行工作。

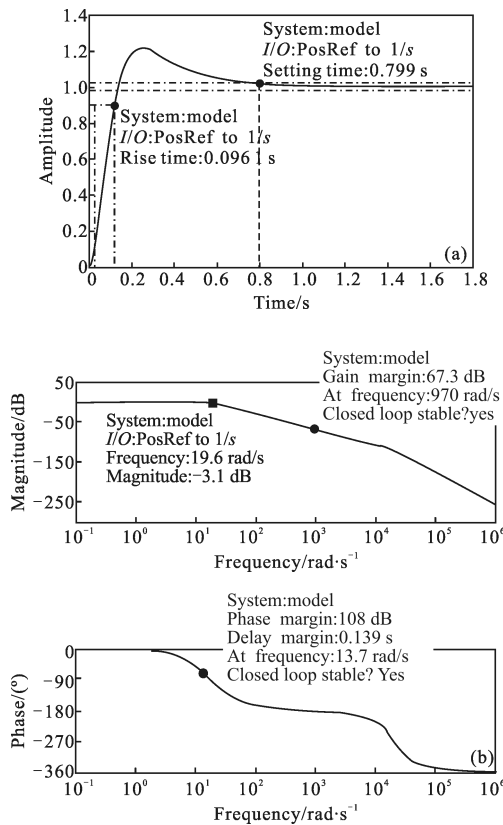


图 5 阶跃响应曲线及伯德图

Fig.5 Curves of step response and Bode diagram

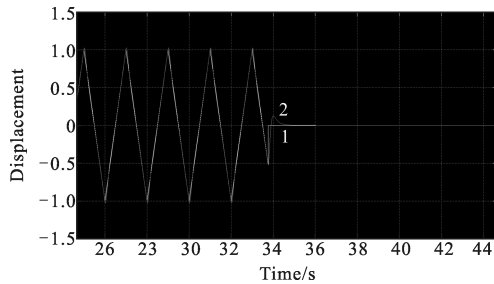


图 6 像移补偿仿真结果曲线

Fig.6 Result curves of image motion compensate simulation

3.2 实验验证

像移补偿的实际硬件电路如图 7 所示, 将补偿的位置波形存储在 EEPROM 中, FPGA 接到计算机发来的开始命令后, 就开始读取 EEPROM 中的位置数据, 使得振镜走到指定的位置^[3]。改变读取位置信号的周期就可控制补偿的速度, 飞行和翼展两方向的补偿角速度分别按公式(2)、(10)计算得到。由于 EEPROM 中的位置信号是数字信号, 需将其 DA 转换成模拟信号后才能送入驱动电路, 驱动电路再使振镜

电机开始旋转。同时 FPGA 通过 AD 对振镜的实时位置信号进行采样, 得到补偿镜的实时位置信号, 在 FPGA 中进行位置环、速度环、电流环的 PID 调节, 实现高精度的位置、速度、电流三层闭环控制^[8-10]。

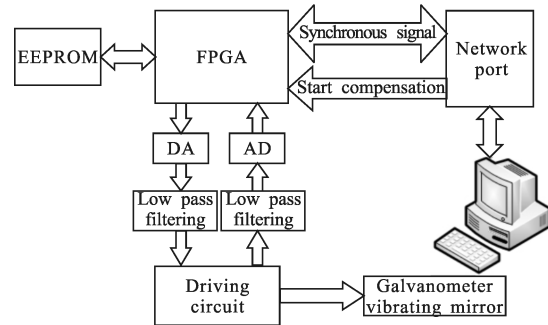


图 7 系统硬件实现方案

Fig.7 Implementation scheme of system hardware

3.3 摆扫方向实验

飞机翼展方向的摆扫角度为 80°, 为了在地面进行模拟飞行实验验证, 将原来对地 80°摆扫的光路改为对水平方向 80°摆扫, 所采集的图像为实验室周边楼群。实验装置如图 8 所示, 其中的补偿振镜选用检流计振镜。检流计振镜是一种特殊类型的电机, 当给定子绕组一个固定大小励磁后, 转子磁场转到与定子磁场一致的位置上而停止。因其工作过程类似于指针电流表, 给其一定的电流指针就转到相应的刻度而静止, 所以得名检流计振镜。

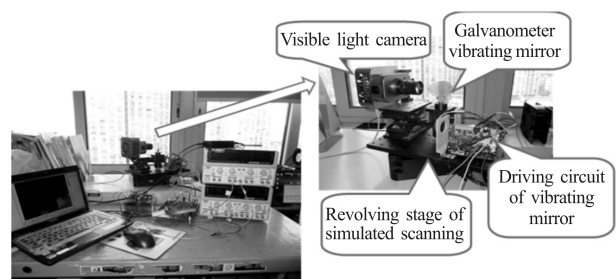


图 8 摆扫方向实验装置图

Fig.8 Experimental device image in direction of pendulum scanning

实验中采用的检流计振镜参数为 2 (°)/V (0.034 9 rad/V), 即给补偿振镜的驱动电路输入 1 V 电压, 补偿镜转动 2°。这里翼展方向的摆扫角速度为 0.524 rad/s, 通过公式(2)计算得到补偿角速度应为 0.262 rad/s。根据检流计参数而设计的给定补偿波形, 在示波器中如图 9 的曲线 1 所示, 曲线 1 峰峰值设计为 3.75 V, 频率为 1 Hz。这样补偿振镜的补偿角

速度保留三位小数,等于 0.262 rad/s。实际反馈波形如图 9 中的曲线 3 所示,给定补偿位置与实际反馈位置(曲线 1 与曲线 3)的误差曲线为图 9 中曲线 2。从曲线 2 中得到位置误差平均值为 21.39 mV,即平均角度误差为 2.566 8',同理计算得到均方误差为 12.828',最大位置误差为 48'。

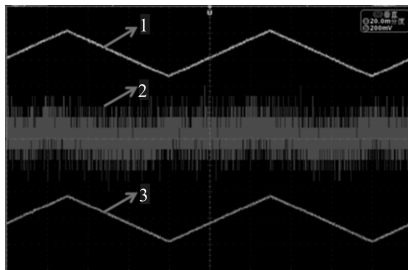


图 9 摆扫方向误差分析曲线
Fig.9 Curves of error analysis in the direction of pendulum scanning

图 10 为像移补偿前后的效果图,设飞机飞行的运动速度为 v ,航空相机的焦距为 f ,其距地面的真高度为 H ,等效到焦平面上的像移速度为 V_p ,曝光时间为 t_e ,几何像移量的数值为 Δs ,则有:

$$V_p = \omega f \tag{13}$$

$$\Delta s = V_p \cdot t_e \tag{14}$$

这里航空相机焦距为 32 mm,曝光时间为 100 ms,按公式(13)、(14)得图 10(a)、(c)的焦平面像移速度

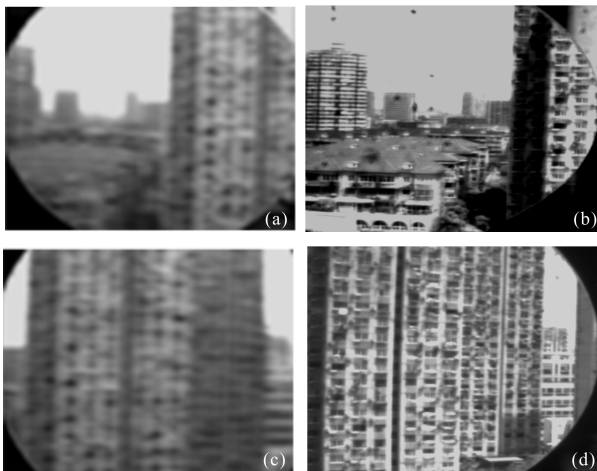


图 10 摆扫方向补偿效果图
Fig.10 Effect images of compensation in the direction of pendulum scanning

$V_p = 16.768$ mm/s,曝光时间内的像移量为 1.678 mm。补偿前的图 10(a)、(c)已经很模糊了,只能大概分辨

出是楼宇,补偿后的图 10(b)、(d)图像得到了较好的修正,楼宇的图像已经比较清晰了,所以说像移补偿对于获取高分辨率图像是不可或缺的。

3.4 飞行方向实验

与翼展摆扫方向像移补偿类似,飞机飞行方向的模拟实验装置如图 11 所示。为了在地面进行模拟飞行实验验证,将原来对地采集图像的光路改为对水平方向采集,所采集的图像为实验室两块宣传文字板。

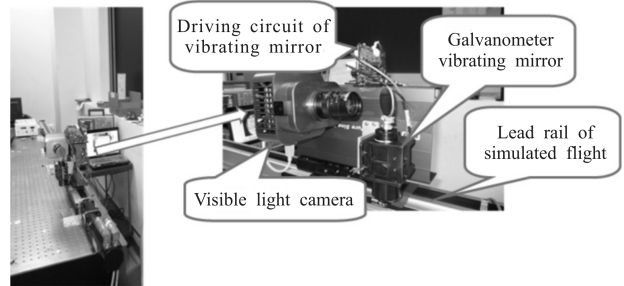


图 11 飞行方向实验装置图
Fig.11 Experimental device image in direction of flight

这里速高比为 0.446,这是一个无量纲的单位,如果选取弧度制单位,经过公式(10)计算得到补偿角速度是 0.223 rad/s。根据检流计参数而设计的给定补偿波形,在示波器中如图 12 的曲线 1 所示,曲线 1 的峰值设计为 3.192 V,频率为 1 Hz。这样可以保证补偿振镜的角速度保留三位小数后等于 0.223 rad/s。实际补偿反馈波形如图 12 中曲线 3 所示,给定振镜位置与实际反馈位置(曲线 1 与曲线 3)的误差曲线为图 12 中曲线 2。从曲线 2 中得到给定和反馈位置误差的平均值为 17.02 mV,即平均角度误差为 2.0424',同理计算得到均方误差为 12.744',最大位置误差也为 48'。

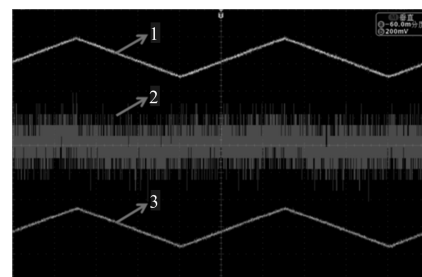


图 12 飞行方向误差分析曲线
Fig.12 Curves of error analysis in the direction of pendulum scanning in the direction of flight

图像补偿前后效果图如图 13 所示,设飞机飞行速度为 v ,航空相机的焦距为 f ,其距地面的真高度

为 H , 地面像移等效到焦平面上的像移速度为 V_p , 曝光时间为 t_e , 像移量的数值为 Δs , 则有^[3]:

$$V_p = \frac{V}{H} f \quad (15)$$

$$\Delta s = V_p \cdot t_e \quad (16)$$

这里航空相机焦距为 32 mm, 曝光时间为 100 ms, 由公式(15)、(16)可得图 13(a)、(c)的焦平面像移速度 $V_p=14.272$ mm/s, 曝光时间内的像移量为 1.427 2 mm。像移补偿前的图 13(a)、(c)已基本看不清字体了, 经过同步像移补偿后的图 13(b)、(d)文字部分十分清晰, 所以飞行方向的运动像移补偿对于获取高分辨率图像是不可或缺的。



图 13 飞行方向补偿效果图

Fig.13 Effect images of compensation in direction of flight

同时应该指出面阵航空相机如果某个像元是坏点, 采用前向飞行或翼展摆扫来扩大视场, 这个坏点的影响将会被放大。原来的一个像元的坏点将会变成一个线阵系列的坏点, 这样就会对整个成像造成较大的影响。如果采用实时像移补偿的方案, 将会最大限度地将该线阵系列的坏点重新压缩成一个点, 有效地减少了探测器坏点对大视场成像的影响。

4 结 论

为解决飞机在高空飞行时, 成像系统与地面目标景物的相对运动产生的图像模糊问题, 文中提出了较实用的飞行方向和翼展方向分别进行像移补偿的设计方案。实验和仿真结果达到了最大程度的吻合, 经过运动像移补偿后的图像模糊现象基本得到了消除, 通过实验结果可以看出: 该实验方案具有可

实现性, 且补偿效果令人满意。文中介绍的面阵航空相机像移补偿方案, 实用性很强, 应用前景十分广阔。

参考文献:

- [1] Tong Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(9): 628–632. (in Chinese)
童子磊. CCD 相机的像移补偿技术 [J]. 激光与红外, 2005, 35(9): 628–632.
- [2] Zhou Li, Yang Shihong, Gao Xiaodong. Scanning control system of a simple structure step framing aerial camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(10): 128–131. (in Chinese)
周黎, 杨世洪, 高晓东. 一种简易结构步进幅式航空相机摆扫控制系统[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 128–131.
- [3] Mao Minjun. The research of scanning control and image motion compensation technology in wide-field step-staring imaging[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 31–48. (in Chinese)
毛闵军. 宽视场凝视成像的扫描控制与像移补偿技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010: 31–48.
- [4] Ying-Shieh Kung, Nguyen Vu Quynh, Nguyen Trung Hieu, et al. Simulink/Modelsim co-simulation and FPGA realization of speed control IC for PMSM drive [C]// International Conference on Power Electronics and Engineering Application, 2011: 718–722.
- [5] Kung Y S, Chen C S, Wong K I, et al. Development of a FPGA-based control IC for PMSM drive with adaptive fuzzy control [C]// Proceedings of the IEEE Industrial Electronics 31st Annual Conference, 2005: 1544–1549.
- [6] Chee–Mun Ong. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using Matlab/Simulink[M]. US: Prentice Hall, 1997.
- [7] Su Sike, Li Yongjun, Yang Long, et al. The DSP Principle and Design of Control System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
粟思科, 李拥军, 杨龙, 等. DSP 原理及控制系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [8] Dubey G K. Fundamentals of Electrical Drives [M]. Alpha Science, 2001.
- [9] Takahashi I, Noguchi T. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor [J]. *IEEE Trans on Industrial Applications*, 1986, 22(5): 821–827.
- [10] Utkin V I. Sliding mode control design principles and application to electric drives [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 23–36.