

高分辨率大视场红外图像获取的改进与优化方法

姜博, 肖功海, 王义坤, 王雨曦, 王亚南, 曾攀

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

摘要:提出了一种获取高分辨率大视场红外目标图像的改进优化方法. 相比较于传统方法中存在的大视场和高分辨率之间的矛盾, 设计了整机摆扫及同步像移补偿的实验方案. 详细分析了精确的速度控制和像移补偿对于整个系统成功实现所起的作用, 并对这两部分进行了优化设计. 实验和仿真结果具有较好的一致性, 从而验证该设计方法在工程上的可实现性. 实验结果显示, 扫描控制的速度误差为0.19%, 经同步像移补偿后所得到的红外图像具有大视场以及高分辨率.

关键词: 红外图像; 整机摆扫; 同步像移补偿

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Ameliorated and optimized method of acquiring wide-view infrared images with high resolution

JIANG Bo, XIAO Gong-Hai, WANG Yi-Kun, WANG Yu-Xi, WANG Ya-Nan, ZENG Pan

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

Abstract: An optimized method was proposed to get high resolution and wide-view images of infrared target. To overcome the shortcoming in the traditional ways that had the contradiction between wide-view and high resolution, this experiment scheme was designed that adopted pendulum scanning of whole system along with synchronal image motion compensation. It was shown that the precise speed control and image motion compensation performed decisive roles for the successful achievement of the whole system. What's more, optimized design had been made for these two parts. The experiment and simulation results are in good agreement. Accordingly, the engineering feasibility of the proposed design method has been validated. The experiment results show that the velocity error of the system is 0.19%. After synchronal image motion compensation, the obtained infrared images have both wide-view and high resolution.

Key words: infrared image, pendulum scanning of whole mechanism, synchronal image motion compensation

PACS: 42.30.-d

引言

受红外探测器发展水平、制冷器及光学等技术的限制, 相比较于可见光探测器, 红外成像系统的瞬时视场都很小, 空间分辨率都不高, 因而在红外波段很难获取大视场、高分辨率的图像. 有研究表明^[1], 国内外典型的高分辨率、大幅宽红外相机大多采用光机扫描的形式, 如美国陆地卫星(Landsat)上的多光谱扫描仪(MSS)和专题制图仪(TM)、气象卫星上的甚高分辨率辐射计(AHVR)等等.

扩大视场可以采用光机扫描机构, 这样在扩大视场的同时也带来了问题, 红外相机在对地面目标成像过程中, 由于曝光时间内相机与目标存在相对的运动, 曝光期间目标在焦平面上所成的像并非静止的, 而是运动变化的. 这个相对运动使得对目标的成像变得模糊, 从而对图像分辨率影响很大. 而国内外对实时像移补偿的研究, 大部分是停留在理论层面,^[2-3] 实际应用中大多采用后期处理的方法. 即使采用实时补偿, 也很少和扫描过程精密同步起来, 按照扫描速度来严格计算补偿速度, 这样不管从实时

收稿日期: 2013-04-15, 修回日期: 2013-05-06

基金项目: 国家973重点基础研究发展计划项目(2009CB723900)

Foundation items: Supported by National 973 Basic Research Program (2009CB723900)

作者简介(Biography): 姜博(1984-), 男, 山东昌邑人, 博士, 主要研究领域为红外成像、红外图像处理、光机电一体化系统等. E-mail: jiangboit@163.com.

Received date: 2013-04-15, revised date: 2013-05-06

性以及补偿效果来看都不是最佳的工程设计方案。

针对目前研究现状,提出了整机摆扫加同步像移补偿的改进优化方法,来获取高分辨率大视场红外目标图像.在光机扫描方面,为了有效控制整个相机系统的尺寸、重量、简化光学系统的设计和最大限度的减少无效时间,采用整机扫描的方案.将整个红外相机及其配套的其他设备一起摆扫,从而获取对地的大视场红外图像;在像移补偿方面,采用在系统扫描控制的同时,在光路中加入补偿镜,精确计算在曝光时间内目标图像在相机感光面上所产生的像位移量,使光线按照相应的光学参量改变方向,从而实时地消除或最大限度地减少运动像移。

1 改进优化方法原理

如图 1 所示,在光机扫描获取大视场红外图像

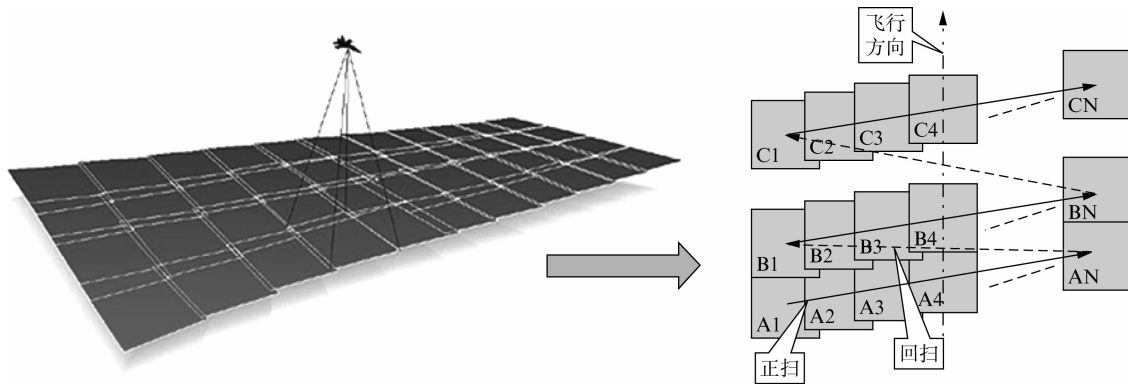


图 1 航空相机的摆扫
Fig. 1 Pendulum scanning of aerial camera

像移补偿机构依据如下原理进行实时像移补偿,采用特定的光学系统,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。^[3]

虽然说补偿机构可以按照摆扫的速度实时进行补偿,但是补偿镜跟踪摆扫速度必然存在一定的滞后性.如果摆扫速度一直在剧烈变化,补偿速度也跟着急剧地变化,由于相机曝光时间很短,这样摄取的图像必然存在一定的像移。

如果摆扫速度是给定的匀速,在采集一行图像时该行所有图像都将存在一个指定的像移量,即像移是一个常量,补偿镜可按这个常量进行匀速旋转,就可最大限度地减少由于补偿部分固有的滞后性带

来的延迟响应,就可以消除像移带来的影响,所以说在摄像区速度的稳定性以及定位精度是整个实验方案成功的关键。

时,为了保证后期将各个行列的所有图像拼接成一幅大视场的图像,^[2]在采集 A1 到 AN 这一行图像之间必须保证一定的重叠率.同理,A 行和 B 行之间也必须保证重叠率,也就是要求正扫回扫来回一次的时间必须有严格的上限,才能使扫描 A 行图像的短时间内,高速飞行的飞机向前飞行的距离有限,使 A 行和 B 行之间保证一定的重叠率.如果扫描某行的周期过长,这里以 B、C 行为例,在扫描完 B 行后回到起始点 C1 时,C1 和 B1 已经没有重叠部分了。

通常情况下光机扫描采用匀速 360° 旋转,只是在对地的小范围内拍摄图像.整个扫描圆周期的其他大部分时间为无效的时间.由以上分析可知,这个很长的无效时间对系统的影响很大,所以本系统采用摆扫的方案,在对地的一定范围内来回摆扫,以最大限度减少无效时间。

来的延迟响应,就可以消除像移带来的影响,所以说在摄像区速度的稳定性以及定位精度是整个实验方案成功的关键。

2 实验与分析

2.1 仿真模型

在摆扫控制方面要保证成像的质量,既需要在摄像区的速度波动尽可能小,又需要图像之间有准确的重叠率.因此在具体实现上采取混合控制的方法,即在匀速区为了保证速度精度,采用“速度-电流”控制;为了能够精确地回到起始点,采用“位置-电流”控制.本系统的仿真模型正是基于这种混合控制的思想方法。^[4-5]

设红外成像系统相对于地面的运动速度为 V ,系统焦距为 f ,成像系统距地面的距离为 H ,如果曝光时间为 t_e ,等效到红外焦平面上的像移速度为 V_p ,

和像移量为 Δs 分别为:

$$V_p = V/H \times f \quad , \quad (1)$$

$$\Delta s = V_p \cdot t_e \quad . \quad (2)$$

可见像移量与飞行器高度、成像仪与地面的相对运动速度和系统的焦距有关. 像移补偿模块就按式(1)和式(2)进行实时的补偿, 补偿摆扫机构所带来的像移^[2].

由于摆扫和补偿机构的仿真模型形式相同, 只是相应模块的参数不同, 如电机的极对数、PID 参数等. 因此这里以摆扫模型为例进行仿真模型介绍. 仿真是建立在很多模块的基础上, 如转矩和速度计算模块、控制电路、三相逆变器、PI 调节器、永磁同步电机和同步像移补偿模块. 三相定子坐标系和两相定子坐标系之间的变换是运用 Clark 变换, 两相定

子坐标系和同步旋转坐标系之间是运用 Park 变换, 反之为 Park 逆变换^[6-7].

Simulink 系统仿真模型如图 2 所示, 这里以速度分析为主, 位移分析只需对速度积分即可, G 为给定的摆扫速度输入端, 它和测得的实际速度值进行比较, 将差值送入 PI 调节器 1, 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 PI 调节器 2, 输出值送入 SVPWM 模块生成占空比可变的 6 路上下互补的 PWM 波形, 控制逆变器输出模拟正弦波进而控制电机, 使得电机实际转速跟随给定转速而变化. 和“速度-电流”控制相类似, 在“位置-电流”控制中, H 为给定位置信号, 它和实际的位置进行比较, 差值再来控制内部电流环, 使得实际位置紧跟给定位置而变化^[8-9].

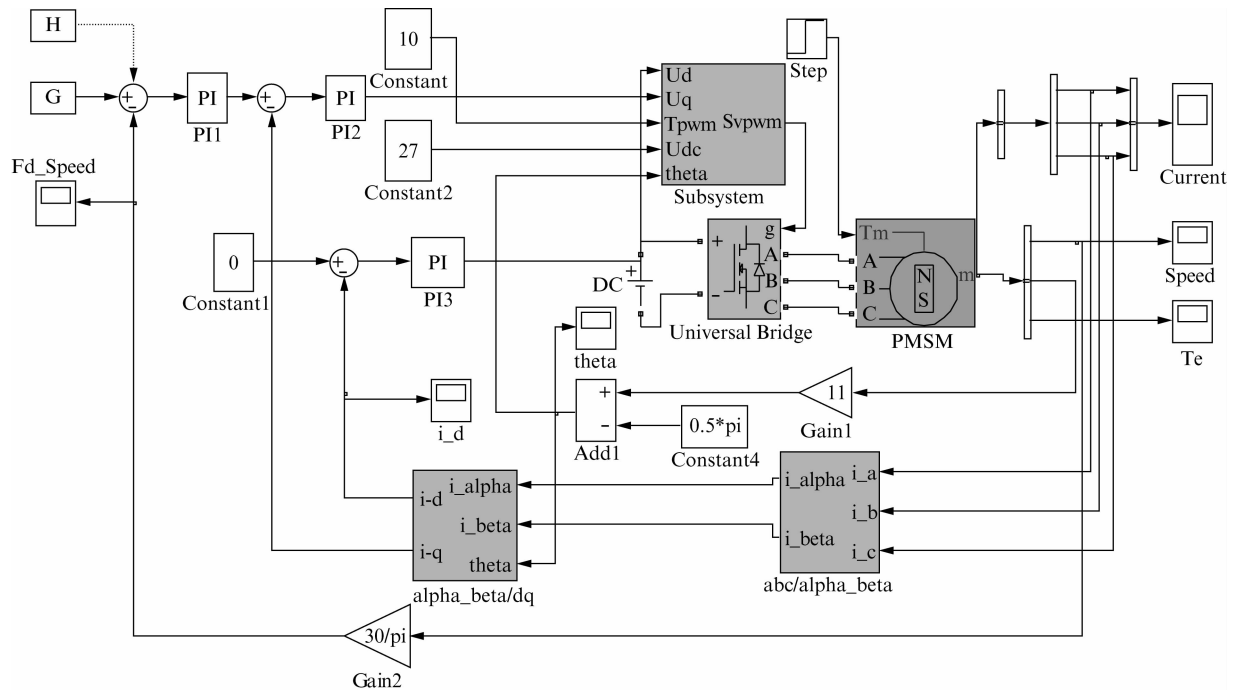


图 2 Simulink 系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model in Simulink System

2.2 实验方案

扫描控制是基于电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术^[10-11], 角度反馈采用的是 24 位分辨率、1 秒精度的角度传感器. 通过实验来调整速度控制和位置控制中的各套 PID 参数. 在实际控制中, 匀速区为了保证速度精度, 采用“速度-电流”两环控制, 当电机走过匀速区时, 为了能够精确地回到起始点, 采用“位置-电流”的两环控制.

扫描控制及像移补偿硬件实现方案如图 3 所示, 整体系统分为功率驱动模块、DSP 控制模块、

永磁同步电机和上位机. 在 DSP 模块中, DSP 通过测量电机定子三相电流信号以及电机实时位置信号, 采用电压空间矢量脉宽调制(FOC)技术, 来驱动功率驱动模块, 产生 6 路脉宽调制(PWM)波, 控制电机按指定的速度或位置命令旋转. 另外, 该模块也完成与上位机通信的功能. 在功率驱动模块中, 集成逆变桥 PMS21255 接收 DSP 控制模块发来的 6 路 PWM 波, 内部 6 个 MOS 器件按给定的时间开断, 从而产生模拟的正弦波, 驱动永磁同步电机旋转^[11].

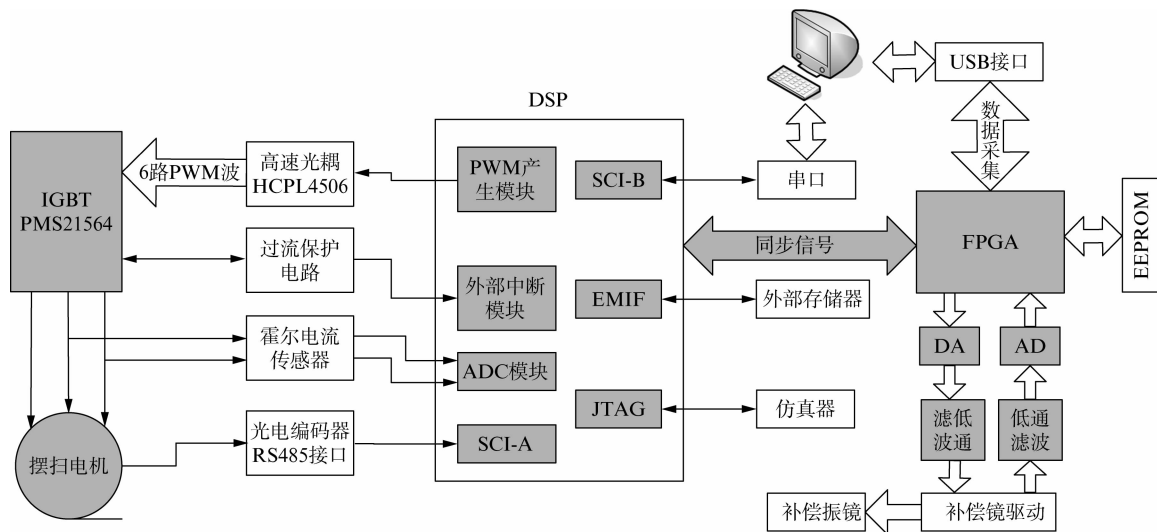


图3 系统硬件实施方案
Fig.3 Implementation scheme of system hardware

在像移补偿控制电路,将固定波形存储在EEPROM中,FPGA接到PC主控制器发来的开始命令后,就开始读取EEPROM中的波形数据,并将其DA转换后送入补偿镜驱动板.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中进行闭环调整^[2].

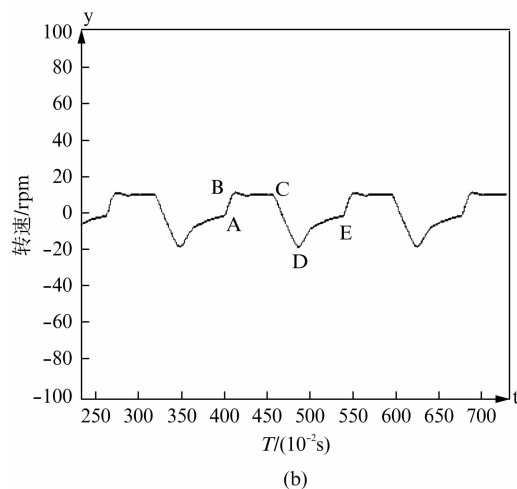
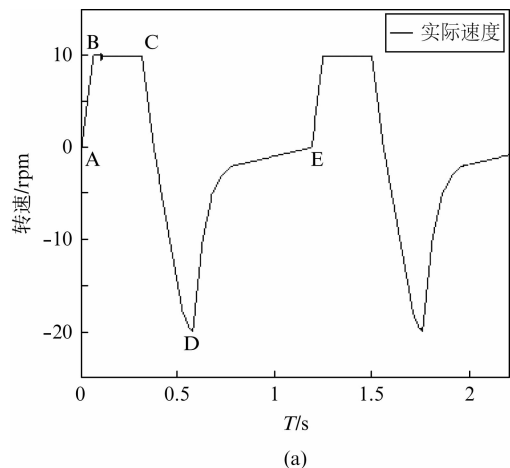
2.3 摆扫控制结果

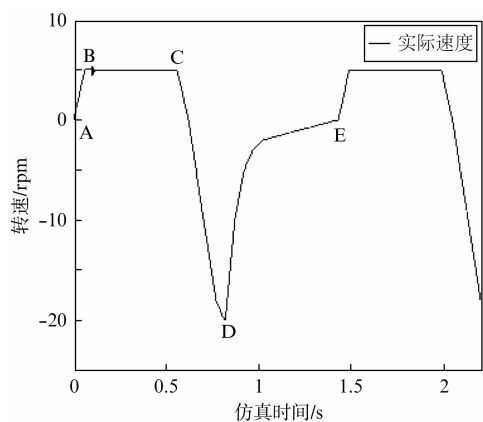
图4(a)、(c)为给定摆扫速度为10 rpm(转/分)和5 rpm时的仿真波形.以图4(a)为例,图中横坐标为仿真时间,纵坐标为反馈转速.这里给定速度为10 rpm,从图中可以看出,在匀速区BC实际速度紧跟随给定速度在变化.最大的误差出现在电机从零开始启动到给定速度过程中.因此在匀速区的中间段,即速度精度最高的区域,用来采集图像信号.这样就能保证在一行扫描中,各幅图像具有基本相同的像移量.

图4(b)、(d)为给定摆扫实验结果曲线,以图4(b)为例,A点为摆扫起始点,在A点运用“速度-电流”环系统,给电机指定速度10 rpm.如纵坐标所示,电机在B点达到给定的速度,B到C段为匀速阶段.到达C点后给系统反向的速度-20 rpm,CD段为反向加速段.到达D点后,为了能准确回到起始点E(A)点,运用“位置-电流”环系统,给系统起始点(A点)的位置信号,摆扫机构按照该指令迅速回到A点.从横坐标可以看出,AE段所用时间400到535,为1.35 s,即往返一个周期所用的时间.

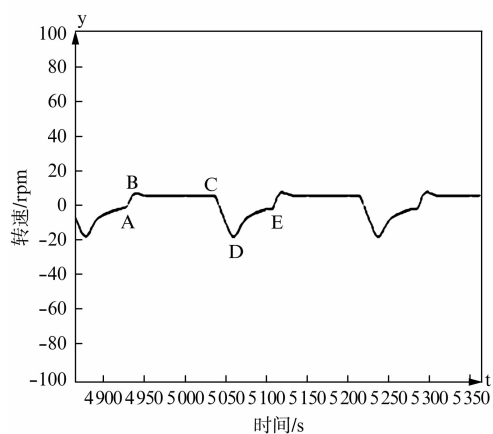
为了精确地计算实际速度控制精度,取匀速区的20个速度点(单位为rpm),如表1所示.可以看

出这些点围绕给定值10 rpm上下波动.这20个点的算术平均值为9.9809,标准差为0.1,和给定值转速10的误差为0.19%.这个精度就是系统设计方案得以成功实现的重要前提.





(c)



(d)

图4 摆扫控制仿真和实验对比图: (a) 10 rpm 仿真, (b) 10 rpm 实验, (c) 5 rpm 仿真, (d) 5 rpm 实验

Fig.4 Contrast images of the experiment and simulation results in pendulum scanning control: (a) simulation in 10 rpm, (b) experiment in 10 rpm, (c) simulation in 5 rpm, and (d) experiment in 5 rpm

表1 转速为 10 rpm 时随机速度值

Table 1 Value of random velocity at a speed of 10 rpm

数据 1~4	数据 5~8	数据 9~12	数据 13~16	数据 17~20
9.946 632 385	10.105 609 89	10.032 081 60	9.928 989 410	10.014 057 16
9.853 935 242	10.097 599 03	10.058 879 85	9.917 736 053	10.039 520 26
9.796 333 313	10.084 152 22	10.004 425 05	9.911 727 905	10.061 359 41
9.767 246 246	10.058 879 85	9.949 874 878	9.911 251 068	10.078 525 54

在图4中,将各个实际速度反馈波形和 Simulink 仿真波形进行比较,可以发现在 ABCDE 段仿真和实验波形基本一致,并且 A 点与 E 点在纵坐标上的位置相互重叠.实际系统和仿真模型都验证了系统既具有很高的速度精度又具有准确的定位精度.

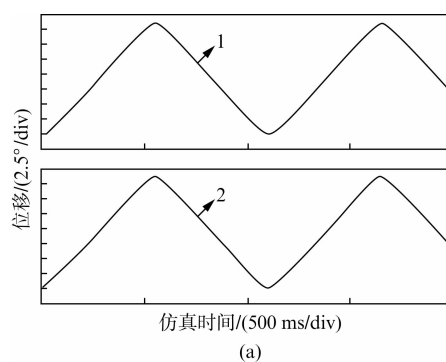
2.4 像移补偿结果

按式(1)和式(2)计算的量进行精确的像移补偿,仿真结果如图5(a)所示^[2].为了方便验证同步像移补偿的性能,这里假定正扫和回扫的速度相同,且

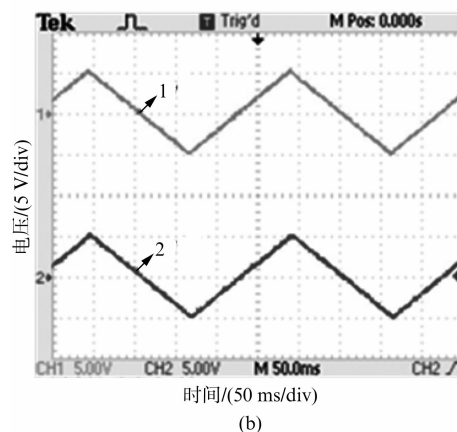
摆扫部分的反馈曲线为理想曲线.曲线1为摆扫反馈位移理想曲线,曲线2为补偿反馈位移实际波形.从仿真结果可以看出,像移补偿路径和摆扫理想路径基本吻合,从而使得探测器与观测对象之间没有相对位移,避免由相对速度而导致的图像模糊^[2].

图5(b)为实验中示波器测得的位移曲线,曲线1为摆扫机构的位移理想曲线,曲线2为补偿机构的补偿反馈位移实际波形.从实验结果可以看出,实际硬件系统的像移补偿路径和摆扫理想路径也是吻合的,同时与图5(a)的仿真曲线也是一致的.这是本实验方法具有工程上可实现性的最重要的因素.

同时也可以看出,在转向处实际硬件系统不如仿真曲线的过渡平滑,这样虽不会影响成像质量,但会带来转向时电机三相电流变大,但都是在电机峰值电流以下,并且此大电流存在的时间较短,对电机并没有什么损坏.



(a)



(b)

图5 像移补偿仿真和实验对比图: (a) 仿真曲线, (b) 实验曲线

Fig.5 Contrast of experiment and simulation results in image motion compensation: (a) simulation curves, and (b) experiment curves

本文介绍的光机扫描机构垂直于航向上的摆扫角度为 80° ,有效采集图像范围为这 80° 中速度波动最小的 70° 范围,为了在地面进行模拟飞行实验

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.由于飞行方向和摆扫方向像移补偿机构相同,只是算得的补偿速度不同,所以只验证某一行图像的像移补偿以及图像拼接即可.图 6 为像移补偿前后的效果图,其中相机帧频为 1 帧/秒.从图中可以看出,像移补偿对于获取高分辨率图像是不可或缺的.

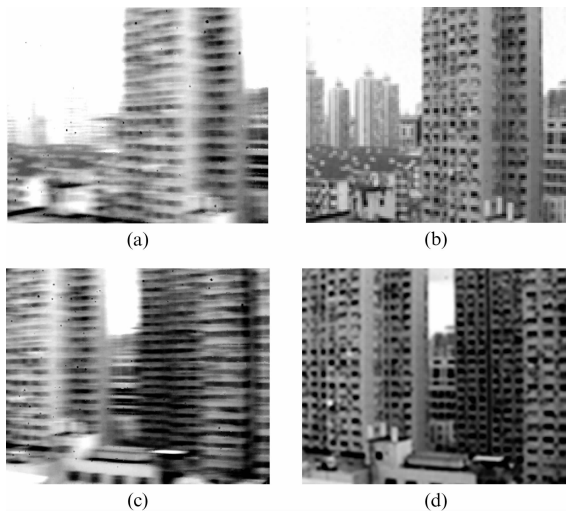


图 6 红外图像像移补偿效果图: (a) 4 rpm 时补偿前, (b) 4 rpm 时补偿后, (c) 5 rpm 时补偿前, (d) 5 rpm 时补偿后
Fig.6 Infrared images with motion compensation: (a) before compensation in 4 rpm, (b) after compensation in 4 rpm, (c) before compensation in 5 rpm, and (d) after compensation in 5 rpm

在扫摆方向上的重叠率为 15% 的情况下,经过同步像移补偿以及后期图像拼接后的效果图如图 7 所示.从图 6 和图 7 中可以看出,像移的影响已最大限度地得到了消除,从而验证了本文提出的改进优化方法的有效性和可实现性.



图 7 高分辨率大视场红外图像效果图
Fig.7 Wide-view infrared image

3 结论

速度控制精度和实时精确的像移补偿是获取高分辨率大视场红外图像的最重要技术手段,本文进行了原理性验证,验证了所提出的整机摆扫及同步像移补偿的设计方案,实验和仿真的结果达到了最大程度的吻合.通过实验结果可以看出系统在速度

跟踪上具有较好的精度,经过同步的像移补偿后图像的拖尾现象基本得到了消除.所提出的改进优化方法,在高分辨率大视场红外图像获取中应用前景广阔.同时,在实验中也发现,要将该方法应用于实际的大数据量红外图像获取中,还要在实时、高速图像拼接这个技术难点上做进一步的研究.

致谢

感谢我的导师薛永祺院士和杨一德研究员在本文的相关工作中给予的帮助和支持.

References

- [1] Lv Xian-na. Research of Scanning Control Technology in High Resolution and Wide Swath Infrared Camera [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (吕娴娜. 高分辨率宽幅红外相机扫描控制技术研究. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所), 2012: 1-11.
- [2] Minjun Mao. 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 (毛闵军. 宽视场凝视成像的扫描控制与像移补偿技术研究. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所), 2010: 30-38.
- [3] ZHOU Li, YANG Shi-hong, GAO Xiao-dong. Scanning Control System of a Simple Structure Step Framing Aerial Camera [J]. Opto-Electronic Engineering (周黎, 杨世洪, 高晓东. 一种简易结构步进画幅式航空相机摆扫控制系统. 光电工程), 2010, 37(10).
- [4] Ying-Shieh Kung, Nguyen Vu Quynh, 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.
- [5] Dubey G K. Fundamentals of electrical drives [M]. Alpha Science International, 2001.
- [6] Changjiang Zhan, Vigna Kumaran Ramachan daramurthy, et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-Space-Vector PWM Control [J]. IEEE Transactions on Industry Trans on Industry Applications, 2001, 37(6): 1885-1863.
- [7] Habetler T G, Profumo F, Pastorelli M. Direct Torque Control of Induction Motor Machines Using Space Vector Modulation [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1992, 28(5): 1045-1053.
- [8] Mizutani R, Takeshita T, Matsui N. Current Model-Based Sensorless Drives of Salient-Pole PMSM at Low Speed and Standstill [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1998, 34(4): 841-846.
- [9] Fang C H, Lin S K, Huang C M, et al. Sliding-mode torque control of a permanent magnet synchronous motor [J]. Proc. IEEE PEDS'01, 2001: 578-582.
- [10] Utkin V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 23-36.
- [11] Zhang Shao-hua. The Research of Vector Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor and the Implementation of Controller [D]. Hunan: Central South University (张少华. 永磁同步电机矢量控制策略研究与控制器实现. 湖南: 中南大学), 2008: 45-46.