

基于实时视轴跟踪的像移补偿技术研究

王义坤¹, 韩贵丞¹, 亓洪兴¹, 马彦鹏¹, 姜博², 刘敏¹, 姚波¹, 舒嵘¹

(1. 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;

2. 西北大学, 陕西 西安 710000)

摘要:为解决画幅式扫描红外成像技术中翼展摆扫引起的严重像移问题,提出了一种基于实时视轴跟踪的像移补偿技术,对于瞬时视场为 $100\ \mu\text{rad}$ 的成像系统,像移补偿精度可达 $\pm 0.005^\circ$ ($\pm 87.3\ \mu\text{rad}$),补偿效果优于 1 个像元。该技术能够实现翼展摆扫像移的高频补偿,研究成果对推动机载红外成像技术向宽视场、高空间分辨率方向进一步发展具有重要意义。

关键词:画幅式扫描红外成像;翼展摆扫像移补偿;实时视轴跟踪

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Investigation of image motion compensation technique based on real-time LOS tracking

WANG Yi-Kun¹, HAN Gui-Cheng¹, QI Hong-Xing¹, MA Yan-Peng¹,
JIANG Bo², LIU Min¹, YAO Bo¹, SHU Rong¹

(1. Key Laboratory of Space Active Optical- Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Northwest University, Xi' An 710000, China)

Abstract: An image motion compensation technique based on real-time Line of Sight (LOS) tracking was proposed to solve the serious problem of image motion in the process of frame scanning infrared imaging originating from wingspan pendulum sweep. The compensation accuracy is up to $\pm 0.005^\circ$ and the compensation effect is no more than 1 pixel for the imaging system with an instantaneous Field of View of $100\ \mu\text{rad}$. This method enables high-frequency compensation of image motion derived from wingspan pendulum sweep, promoting the development of airborne infrared imaging technology with WFOV and high spatial resolution.

Key words: frame scanning infrared imaging, image motion compensation originating from wingspan pendulum sweep, real-time LOS tracking

PACS: 84.40.Xb

引言

红外成像属于被动探测,可以实现全天候工作,广泛应用于环境监测、资源勘探及军事侦察等领域。传统的红外成像技术采用单元或线阵探测器件在翼展方向进行物方扫描实现宽视场成像。这种宽视场成像实现方式的缺点是空间分辨率低,瞬时视场通常被限制在 mrad 量级^[1]。日益成熟的面阵红外探测

器技术解决了以往红外成像空间分辨率低的问题,瞬时视场可以达到 μrad 量级。目前国际市场上能够自由采购的红外探测器的面阵规模可以达到 640×512 像素^[2-5],基于这种小面阵探测器可以实现瞬时视场优于 $100\ \mu\text{rad}$ 的高空间分辨率红外成像。但是受限于面阵规模,上述面阵红外探测器的成像视场很小。宽视场、高空间分辨率的应用需求推动了红外成像技术的发展,采用面阵红外探测器并在翼展方

向进行画幅式扫描实现宽视场、高空间分辨率成像是机载红外成像技术的发展趋势^[6-8]。

画幅式扫描红外成像技术采用翼展方向整机摆扫的方式实现宽视场成像,如图 1 所示,摆扫一行时,相机需要多次曝光成像才能保证翼展方向的宽视场覆盖;飞机高速飞行时,为了使飞行方向相邻扫描行的图像之间保持一定的重叠率,方便后续图像拼接,整机在翼展方向需要以很快的速度进行摆扫。面阵红外探测器,尤其是中波红外探测器,凝视成像需要一定的曝光时间以确保探测器获取足够的光能。翼展摆扫成像过程中,为了获取无像移的高质量图像,必须保证曝光过程中探测器视轴对应的物点不变。然而,翼展方向的快速摆扫不可避免的引起每次曝光成像过程中探测器视轴的运动,造成严重的像移问题,导致图像模糊,影响目标判读。例如,采用像元数为 640×512 ,瞬时视场为 $100 \mu\text{rad}$ 的面阵探测器,在翼展摆扫速度为 $43.2^\circ/\text{s}$ 情况下,3ms 的曝光时间内翼展摆扫引起的像移量为 22.6 个像元。由于翼展方向连续快速摆扫造成每一次曝光成像过程都会产生严重的像移,所以每一次曝光成像都需要进行像移补偿。

针对画幅式扫描红外成像过程中翼展方向像移的补偿问题,文献[9]给出了一种像移补偿方法,通过在光路中加入补偿镜,根据匀速摆扫的速度精确计算出补偿镜的转动速度,进而控制补偿镜反向匀速补偿,从而达到实时像移补偿的目的。此方法成功的前提是保证成像区域内摆扫的匀速性,若匀速性控制得不好,补偿镜仍按照事先计算的速度进行补偿,则必然导致补偿效果欠佳。一般来说,红外成像

系统整机的转动惯量都较大^[6-8],从控制的角度讲,很难保证大惯量整机在翼展方向摆扫时的匀速性(本文中整机转动惯量为 $0.348 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$,翼展摆扫速度为 $43.2^\circ/\text{s}$,匀速控制精度为 5.6%),所以该方法不适用于补偿大惯量整机翼展摆扫带来的像移。

结合目前的研究现状,提出了一种基于实时视轴跟踪的像移补偿技术,在曝光起始时刻记录视轴的初始位置,在曝光成像过程中实时跟踪视轴的角位置变化,并将视轴的角位置增量转换为补偿控制命令输入,控制对地成像的 45° 反射镜反向补偿,保证补偿后视轴对应物点始终稳定在初始视轴对应物点,实现翼展摆扫像移的实时补偿。该补偿技术不再依赖于摆扫的匀速性,不仅能大幅度降低大惯量整机摆扫匀速性的控制要求,而且能够实现摆扫像移的高频补偿。

1 翼展摆扫像移的补偿原理

画幅式扫描红外成像整机翼展摆扫结构如图 2 所示,整机由红外相机、横滚环架、 45° 反射镜构成。整机绕横滚轴转动实现翼展方向宽视场摆扫成像; 45° 反射镜负责对地成像,同时可绕横滚轴转动进行视轴实时跟踪,实现翼展摆扫像移补偿。将 45° 反射镜的零位定义为其与横滚环架所在平面成 45° 夹角的位置。图中 $O_D OD$ 为整机处于水平位置时的探测器视轴,对应物点 D 为机下点,AE 为翼展摆扫时的物方扫描方向。

未进行像移补偿时, 45° 反射镜一直保持在零位且相对于整机不动。如图 3 所示,某一帧曝光起始时刻,探测器视轴的初始位置为 $O_B OB$,对应物点为 B;

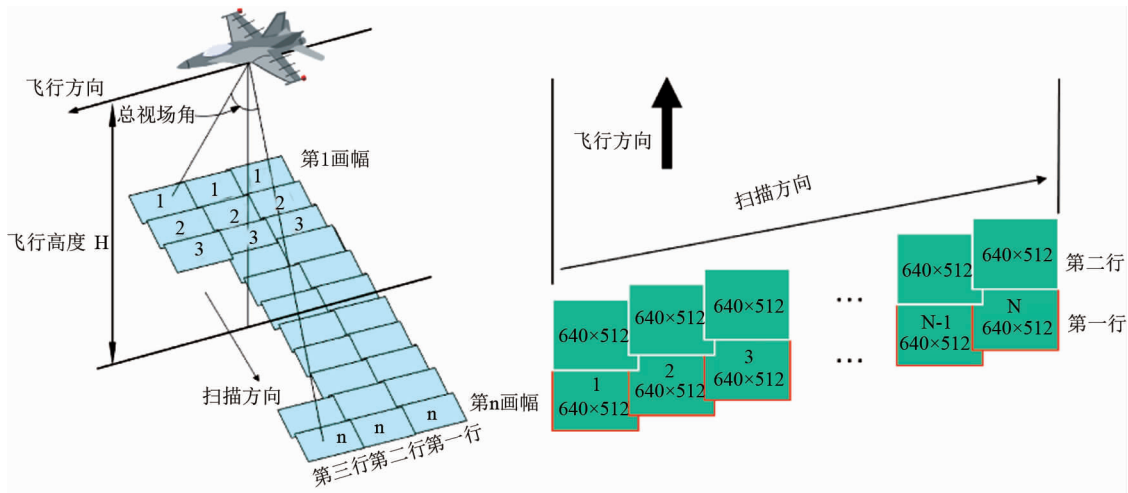


图 1 画幅式扫描红外成像翼展摆扫示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wingspan pendulum sweep for frame scanning infrared imaging

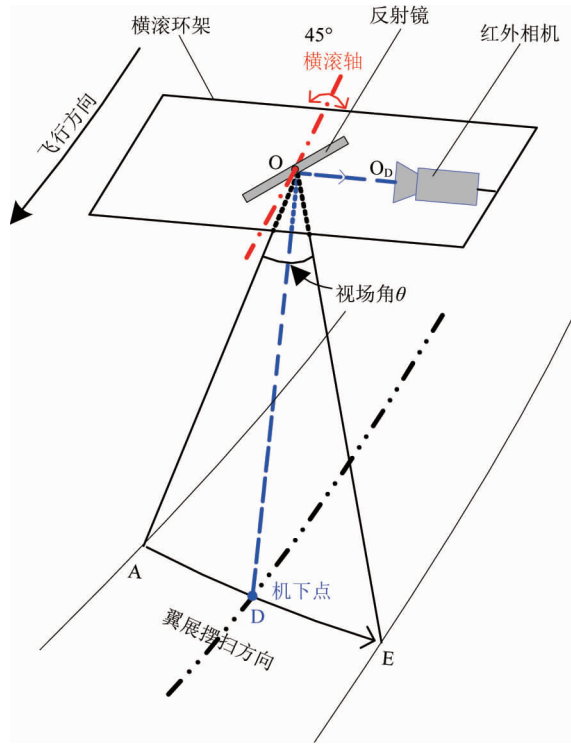


图2 整机翼展摆扫宽视场成像结构示意图
Fig.2 Wide field of view (WFOV) imaging structure of the whole machine with wingspan pendulum sweep

在曝光成像过程中,整机绕横滚轴的转动引起视轴及45°反射镜零位沿翼展摆扫方向产生相同角度的同步同向转动,BC 为物方像移方向; O_cOC 为视轴的实时角位置,对应实时变化的物点 C. 显然,曝光成像过程中,翼展快速摆扫会引起视轴运动,带来像移问题. 像移大小用视轴的角位置增量 $\Delta\varphi$ 表示, $\Delta\varphi$ 为 CO 与 BO 间夹角.

提出了基于实时视轴跟踪的像移补偿技术,对翼展摆扫像移进行实时补偿. 补偿原理如下:曝光初始时刻,45°反射镜处于零位,探测器初始视轴 O_BOB 对应物点为 B. 曝光成像过程中,利用安装在横滚轴上的光电编码器实时跟踪视轴的角位置增量 $\Delta\varphi$. 根据光路的可逆性原理,可以将实时视轴 O_cOC 的 O_cO 段作为45°反射镜的入射光线, OC 段作为反射光线. 控制45°反射镜绕横滚轴反向转动 $\Delta\varphi/2$ 角,由平面镜成像的倍角关系可知,反射光线将随之由 OC 段反向转动 $\Delta\varphi$ 角到 OB 段,使视轴始终稳定在 O_cOB ,保证补偿后视轴对应物点始终稳定在初始视轴对应物点,实现翼展摆扫像移的实时补偿.

2 翼展摆扫像移补偿的实现

2.1 翼展摆扫像移补偿的实现方案

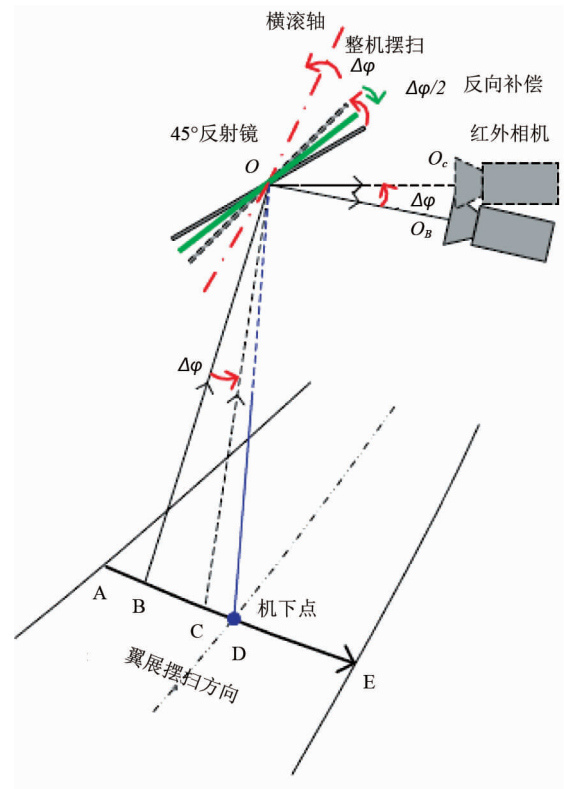


图3 翼展摆扫像移的补偿原理示意图
Fig.3 Compensation principle of image motion derived from wingspan pendulum sweep

图4所示为实验室内利用相同技术指标的可见光相机代替红外相机进行宽视场成像功能验证的试验系统,可见光相机的探测器像元数为 640×512 ,瞬时视场为 $100 \mu\text{rad}$,单帧视场角 $3.67^\circ \times 2.93^\circ$. 该系统利用大反射镜实现室内对外成像,大反射镜通过绕镜面内与整机横滚轴垂直的转轴转动来模拟飞机飞行,镜面轴向对应整机翼展摆扫方向,成像视场的垂直方向对应飞机飞行方向,此宽视场成像系统的部分技术指标见表1. 在翼展方向相邻画幅图像的重叠率为18%的情况下,翼展摆扫一行需要进行8次曝光成像实现 24° 的宽视场覆盖.

表1 画幅式扫描宽视场成像系统技术指标
Table 1 Technical specifications of frame scanning WFOV imaging system

技术指标	参数
探测器像元数	640 × 512
瞬时视场	100 μrad
视场角	3.67° × 2.93°
外触发帧频	30 Hz
总视场角	24°
翼展摆扫速度	43.2°/s
整机转动惯量	0.348 Kg · m ²

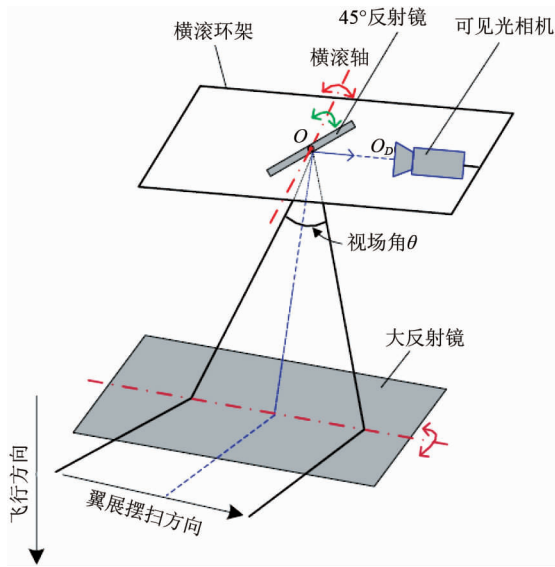


图4 画幅式扫描实验室内外宽视场成像示意图
Fig. 4 WFOV imaging of outdoor scenery obtained by frame scanning in the laboratory

提出的基于实时视轴跟踪的像移补偿技术对位置控制精度要求较高,故采用控制领域经典的位置—速度—电流三环PID控制算法^[10]实现像移补偿的精确位置控制,像移补偿控制框图见图5.采用动态响应快、定位精度高的音圈电机^[11]作为补偿电机带动45°反射镜绕横滚轴反向转动实现翼展摆扫像移补偿.

像移补偿的实现过程如下:

- (1) 上电初始化时,45°反射镜处于零位;
- (2) 在某一帧曝光起始时刻,记录视轴初始位置;
- (3) 曝光成像过程中,利用安装在整机横滚转轴上的光电编码器实时跟踪视轴的角位置增量 $\Delta\varphi$;
- (4) 由于45°反射镜的零位已随整机摆扫产生 $\Delta\varphi$ 角的同步同向转动,所以将 $-\Delta\varphi/2$ 作为补偿电机的位置环PID命令输入,控制45°反射镜反向转动到 $-\Delta\varphi/2$ 角位置,保证补偿后探测器视轴对应物点始终稳定在初始视轴对应物点,实现翼展摆扫像移的实时补偿;

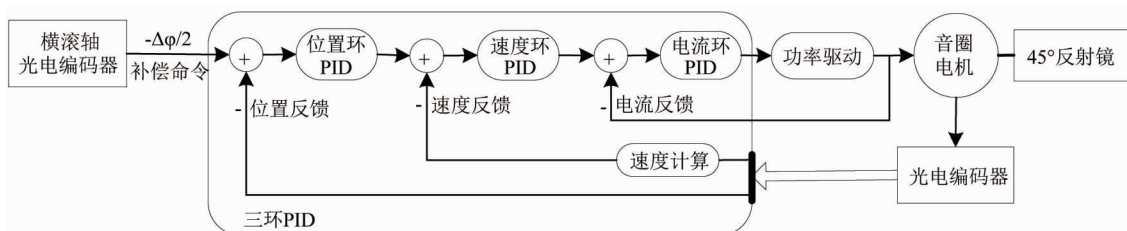


图5 翼展摆扫像移补偿控制框图
Fig. 5 Diagram of the compensation control for image motion originated from wingspan pendulum sweep

(5) 曝光结束后,控制45°反射镜返回初始零位,完成一个补偿周期.

2.2 实验结果及分析

图6为翼展摆扫像移补偿控制曲线,采样频率10 KHz.图6(a)为某一帧的像移补偿控制曲线,A~D构成1个补偿周期,A~C为像移补偿阶段,其中B~C段为外触发成像阶段,C~D为45°反射镜返回初始零位阶段.像移补偿控制时,电机需要一定的时间达到稳定状态,选择在像移补偿控制比较好的B~C段给相机发送成像脉冲触发相机曝光成像,并记录外触发成像阶段的像移补偿控制误差.图中黑色实线表示像移补偿命令曲线,红色短划线为补偿电机的执行反馈曲线,二者在B~C段的差值为像移补偿控制误差,如蓝色虚线阶跃部分所示.由于外触发帧频为30 Hz,补偿电机工作在如此高频情况下跟踪命令时存在一定的滞后性,所以图中的补偿误差均为正值.从补偿误差放大后的曲线(图6(b))可以看出,补偿误差的峰峰值为 0.005° .考虑到补偿命令的执行对象为45°反射镜,根据平面镜成像的倍角关系,真实的像移补偿误差与图6(b)中的补偿误差存在二倍关系,峰峰值为 0.01° .曝光成像过程中影响补偿效果的是真实补偿误差的峰峰值,所以真实像移补偿的位置控制精度为 $\pm 0.005^\circ$ ($\pm 87.3 \mu\text{rad}$).对于瞬时视场为 $100 \mu\text{rad}$ 的画幅式相机来说,像移补偿效果为0.873个像元.图6(c)和图6(d)分别为摆扫一行8次曝光成像的像移补偿控制曲线和外触发成像脉冲,相机外触发帧频为30 Hz.

图7给出了翼展摆扫成像过程中某一帧图像的像移补偿前后效果对比.像移补偿前(图7左),图像中仅能看出楼宇、窗户的轮廓,具体细节分辨不清;像移补偿后(图7右),楼宇、窗户、空调以及远处的景物在图像中都清晰可见.单帧成像的良好像移补偿效果验证了本文提出的像移补偿技术的可行性.

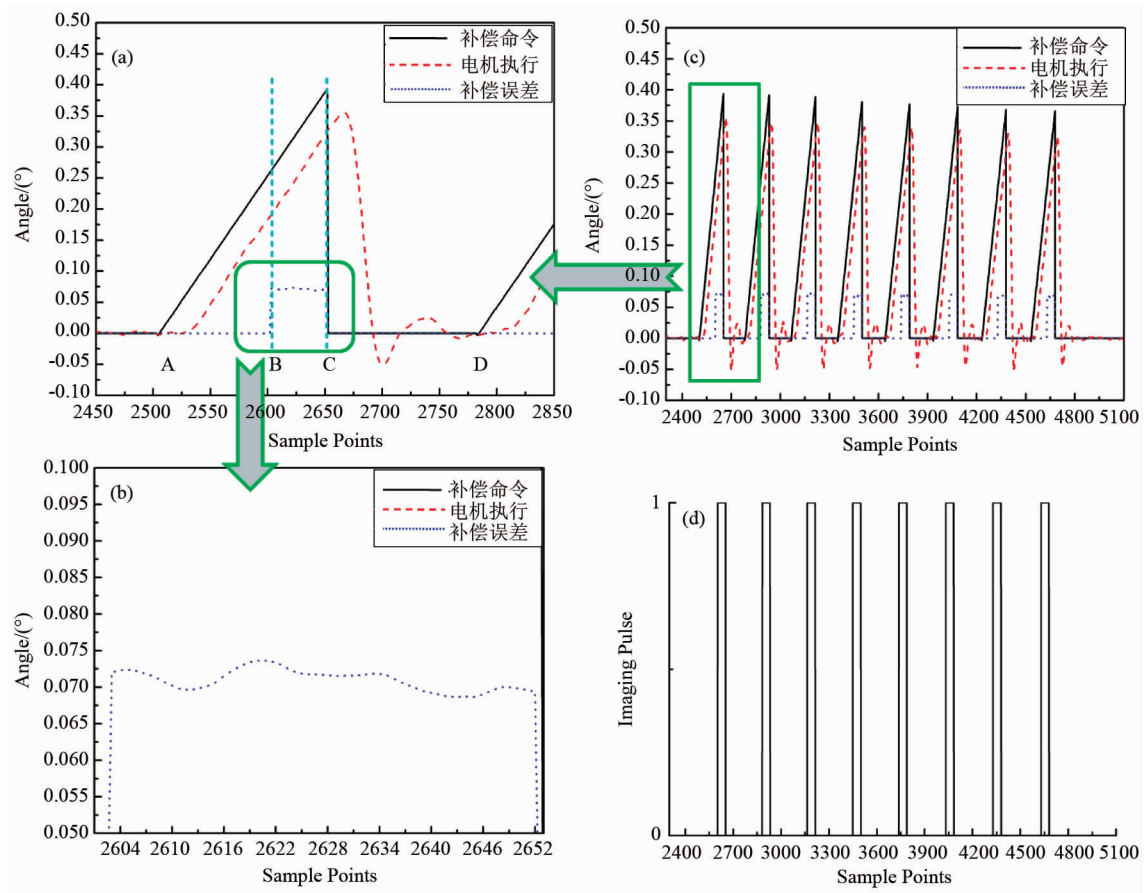


图6 翼展摆扫像移补偿控制曲线(a)、(b)分别为某一帧的像移补偿控制曲线和曝光成像过程中补偿控制误差, (c)、(d)分别为摆扫一行的补偿控制曲线和外触发成像脉冲
 Fig.6 Compensation control curve of image motion derived from wingspan pendulum sweep (a)Control curve of image motion compensation in the exposure imaging process of one frame, (b) Compensation control error in the exposure imaging process of one frame, (c) Compensation control curve of one pendulum sweeping line, (d) External trigger imaging pulse for one pendulum sweeping line



图7 翼展摆扫单帧成像的像移补偿前后效果对比图
 Fig.7 Before-and-after compensation of one frame image in wingspan pendulum sweeping process

图8 所示为进行像移补偿后摆扫一行8次曝光成像的图像经过拼接处理得到的宽视场图像. 由图可见,像移补偿对于翼展摆扫成像过程中的每一次曝光成像都非常有效,补偿后成像像质清晰,补偿效果稳定.

图9 为基于上述实时视轴跟踪的像移补偿技术



图8 像移补偿后翼展摆扫一行的宽视场、高空间分辨率图像
 Fig.8 WFOV and high spatial resolution image with compensation

进行外场飞行试验获取的可见光宽视场高分辨率拼接图像,飞行高度为3 000 m,飞行速度为200 km/h. 图中地物清晰,细节丰富,甚至可以明显分辨出行驶在公路上的汽车.

实验室和外场飞行试验结果说明基于实时视轴跟踪的像移补偿技术能够实现翼展摆扫像移的高频补偿. 应用此像移补偿技术后,画幅式扫描成像系统在翼展方向摆扫能够获得宽视场、高空间分辨率的图像.



图9 外场飞行试验获取的宽视场、高空间分辨率图像
Fig.9 WFOV and high spatial resolution image obtained from outfield flight test

3 结论

针对画幅式扫描红外成像技术中翼展摆扫引起的严重像移问题,本文提出了基于实时视轴跟踪的像移补偿技术,利用瞬时视场为 $100\mu\text{rad}$ 的可见光成像系统进行试验验证,像移补偿精度可达 $\pm 0.005^\circ$ ($\pm 87.3\mu\text{rad}$),补偿效果优于 1 个像元.实验室内和外场飞行的试验结果表明该像移补偿技术能够实现翼展摆扫像移的高频补偿,并获得高质量的宽视场、高空间分辨率图像.研究成果为推动机载红外成像技术向宽视场、高空间分辨率方向发展提供了重要的技术参考.

References

[1] WANG Jian-Yu, SHU Rong, LIU Yin-Nian, *et al.* *Introduc-*

- tion to imaging spectrum techniques* [M]. Beijing: Science Press (王建宇,舒嵘,刘银年. *成像光谱技术导论*.北京:科学出版社), 2011.
- [2] Oiknine Schlesinger J, Calahorra Z, Uri E, *et al.* Pelican: SCD's $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ pitch InSb detector[J]. *Infrared Technology and Applications XXXIII. Proc. SPIE*, 2007, **6542**: 654231.
- [3] Tribolet P, Manissadjian A, Brochier E. Compact and light-weight cooled IR detectors for high-resolution applications [J]. *Infrared Components and Their Applications. Proc. SPIE*, 2005, **5640**.
- [4] Axir M W: $640 \times 512 - 15 \mu\text{m}$ pitch - InSb [R]. France: Sofradir Corporation, 2014, 7.
- [5] Galatea M W: $640 \times 512 - 15 \mu\text{m}$ pitch - HOT MCT [R]. France: Sofradir Corporation, 2014, 4.
- [6] Lareau A G, Partynski A J. Dual-band framing cameras: technology and status [J]. *Airborne Reconnaissance XXIV. Proc. SPIE*, 2000, **4127**.
- [7] Iyengar M, Lange D. The goodrich 3 rd generation DB-110 system; operational on tactical and unmanned aircraft [J]. *Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications III. Proc. SPIE*, 2006, **6209**: 620909 - 1.
- [8] Höfft J, Tietz T. Multispectral EO LOROP camera [J]. *Part of the SPIE Conference on Infrared Technology and Applications XXIV. Proc. SPIE*, 1998, **3436**.
- [9] JIANG Bo, XIAO Gong-Hai, WANG Yi-Kun, *et al.* Ameliorated and optimized method of acquiring wide-view infrared images with high resolution [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姜博,肖功海,王义坤,等. 高分辨率大视场红外图像获取的改进与优化方法. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(3): 283 - 288.
- [10] Dorf R C, Bishop R H. *Modern control systems* (11th edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [11] Voice coil actuators applications & product selection guide [R]. America: BEI Kimco Magnetics Corporation.