

文章编号: 0253-2239(2010)12-3471-05

联合变换相关器像移测量静态仿真实验分析

易红伟 赵 惠 汶德胜 李英才

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 光学联合变换相关方法是进行空间相机像移测量的有效技术途径。在给出该方法测量像移基本原理的基础上,利用半实物静态仿真实验装置对该方法的测量精度和性能进行了分析和评估。通过对仿真序列影像的测试结果表明实验装置在沿航和穿航方向的像移测量精度均能满足空间相机对像移测量低于 0.2 pixel 的要求。分析了寻质心窗口尺寸对互相关峰位置确定精度的影响,并提出采用强度权重质心法替代传统质心算法,不仅降低了测量精度对寻质心窗口尺寸的敏感性,而且进一步提高了像移测量的精度。

关键词 成像系统;像移测量;亚像元;质心计算;联合变换相关器

中图分类号 TN751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3471

Static Simulation Experiment of Image Motion Measurement Based on Optical Joint Transform Correlator

Yi Hongwei Zhao Hui Wen Desheng Li Yingcai

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract The optical joint transform correlator (JTC) is an effective technical way for image motion measurement of the space camera. Its basic principles are presented, and performance is evaluated through static simulation experiment. A calibrated image set is tested by the experimental device. The results show that, the measurement accuracy can be controlled below 0.2 pixel in two directions, which is satisfied for the space camera. The influence of centroiding window size on cross-correlation peaks locating is analyzed, based on which, intensity weighted centroiding (IWC) is proposed instead of the traditional centroiding method, by which not only the influence of centroiding window size on image motion measurement is reduced, but also the measurement accuracy is improved.

Key words imaging systems; image motion measurement; sub-pixel; centroid calculation; joint transform correlator (JTC)

1 引 言

当前的空间相机普遍采用时间延迟积分(TDI) CCD作为成像器件进行推扫成像。这样可以在不降低空间分辨率和工作速度的情况下提高成像系统的信噪比。这种成像方式的基本前提是 CCD器件上光生电荷包的转移与焦面影像的运动需要保持同步。但是在推扫成像过程中卫星平台飞行姿态变化(俯仰、翻滚、偏航),轨道速高比变化,地球自转,星上活动部件颤振等因素都会导致相机在积分成像过程中产生像移,破坏焦面影像与光生电荷包运动的

同步性,从而使空间相机输出图像产生退化^[1]。同时由于空间环境的复杂性使得空间相机在推扫成像过程中产生的像移具有随机性的特点。消除像移影响的直接途径是尽量提高卫星平台姿态控制的稳定性,减小卫星的振动。但是这势必增加卫星整体的费用、尺寸和重量,并产生新的技术困难^[2,3]。对空间相机运动成像过程中产生的像移进行实时在轨测量和补偿是解决上述问题的一种有效技术途径。用于空间相机像移在轨测量的装置应该具有高精度、实时性和小型化的特点。利用光学联合变换相关器

收稿日期: 2010-02-25; 收到修改稿日期: 2010-05-12

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006) 资助课题。

作者简介: 易红伟(1973—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。

E-mail: yi_hongwei@126.com

(JTC)进行空间相机像移测量能够满足上述要求,因而成为研究的热点^[4~13]。基于 JTC 的像移测量方法一般通过在相机焦面上安装高帧频的辅助面阵图像传感器,在相机运动成像时高速采集图像序列,并利用 JTC 对相继采集到的两幅时序图像进行相关运算,测量相关峰的位移量,达到像移测量的目的。这种方法既具有光学图像处理高速度、大容量和并行处理等特点,又具有电路控制灵活、精确、可编程的优点,因此具有很大的应用潜力。

本文在对该技术理论分析的基础上搭建了半实物静态仿真实验装置,模拟空间相机运动成像过程人工产生了用于像移测量的序列图像,利用实验装置进行像移的静态测量,对像移测量的精度进行了分析,研究了互相关峰质心提取过程中影响测量精度的因素和改善途径,为以后的动态像移测量实验打下了基础。

2 JTC 测量像移的基本原理

联合变换相关器通常由两套结构相同的光学傅里叶变换单元组成,分别完成联合变换功率谱的记录和功率谱的相关读出,典型的结构如图 1 所示。在进行两幅影像像移测量或配准时,首先将参考影像 $f_r(x, y)$ 和被测影像 $f_t(x, y)$ 分别以坐标 $(0, -a)$, $(0, a)$ 为中心位置排放,形成输入图像数据。把输入图像数据加载到一个光学傅里叶变换单元的空间光调制器 (SLM) 上。如果两幅影像间沿 x, y 方向的像移量分别为 $\delta x, \delta y$, 则此 SLM 上的输入 $i(x, y)$ 可表示为

$$i(x, y) = f_r(x, y - a) + f_t(x + \delta x, y + a + \delta y). \quad (1)$$

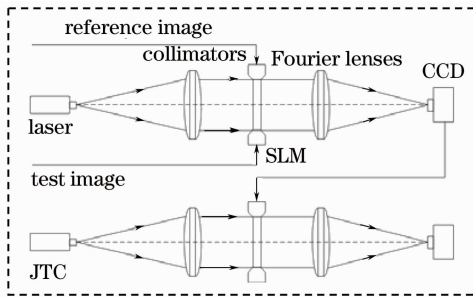


图 1 典型的 JTC 结构示意图

Fig. 1 Typical structural scheme of JTC

如图 1 所示,激光器发出的单色相干光经准直后照射到 SLM 上,经 $i(x, y)$ 调制后通过傅里叶透镜完成第一次傅里叶变换,得到其频谱函数

$$T(u, v) = F_r(u, v) \exp(-2i\pi av) + F_t \exp\{2i\pi[u\delta x + (a + \delta y)v]\}. \quad (2)$$

通过傅里叶透镜焦面上的 CCD 可以记录联合变换功率谱 $|T(u, v)|^2$, 其数学表达式为

$$|T(u, v)|^2 = |F_r(u, v)|^2 + |F_t(u, v)|^2 + F_r F_r^* \exp\{2i\pi(u\delta x + (2a + \delta y)v)\}. \quad (3)$$

联合变换功率谱被再次加载到第二套光学傅里叶变换单元的 SLM 上,傅里叶透镜完成第二次傅里叶变换后,利用 CCD 接受焦面上的相关输出,其数学表达式为

$$c(x, y) = f_r(x, y) \otimes f_r(x, y) + f_t(x, y) \otimes f_t(x, y) + f_r \otimes f_t * \delta(x - \delta x, y - 2a - \delta y) + f_t \otimes f_r * \delta(x + \delta x, y + 2a + \delta y), \quad (4)$$

式中 $*$ 表示卷积, \otimes 表示相关运算。从 (4) 式可见,前两项为两幅影像的自相关项,后两项为互相关项。通过对互相关峰位置的检测和计算,可以得到两幅影像间的像移量,达到像移测量的目的。

3 像移测量静态仿真实验

为了对利用 JTC 进行空间相机像移测量方法的性能进行评估和分析,根据 JTC 的基本结构搭建了单透镜、单 SLM 结构的像移测量静态仿真实验装置,如图 2 所示。仿真实验中所使用的 SLM 为英国 CRL 公司生产的 XGA3 型电寻址 TFT-LCD,空间分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,像元间距 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,像元尺寸 $13 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。使用的 CCD 相机为微视公司推出的 MVC6800DA-GE60,其分辨率为 $656 \text{ pixel} \times 492 \text{ pixel}$,像元尺寸 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 。采用波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器作为相干光源,傅里叶透镜焦距为 196.6 mm 。

实验中用于像移测量的序列影像由一幅 Denver 市的 QUICKBIRD 高分辨率遥感影像产生,如图 3 所示。每幅序列影像的大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。相

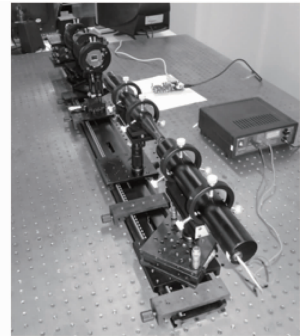


图 2 像移测量静态仿真实验装置实物图

Fig. 2 Device of static simulation experiment for image motion measurement

邻两幅影像之间产生 10 pixel 的正常像移用于模拟焦面影像随空间相机在轨道上行进时产生的移动,在此基础上加入由于平台扰动所产生的非正常像移。非正常像移为在变化范围 ± 3 pixel 内产生的随机数。具体实现方法是对该影像进行傅里叶变换得到其频谱,根据设定的像移量在频率域对频谱进行相位移动,再进行傅里叶逆变换得到具有设定像移量的影像。对该影像以相同的坐标偏移量截取 128 pixel \times 128 pixel 大小的子影像,得到用于像移测量的一幅序列影像,按照这种方式实验中共产生 21 幅序列影像。



图 3 仿真输入影像

Fig. 3 Input image for simulating

相邻两幅序列影像分别以坐标 $(-128, 0)$, $(128, 0)$ 为中心位置排放在 1024 pixel \times 768 pixel 大小的全零矩阵中作为 JTC 的输入图像数据被加载到 SLM 上。经过准直、扩束的激光光束通过 SLM 和傅里叶透镜后完成傅里叶变换, CCD 相机在透镜焦面上接收联合变换功率谱。联合变换功率谱再次被加载到 SLM 上,再次完成傅里叶变换后由 CCD 相机在透镜焦面上接收相关输出数据。

4 实验结果及分析

用于像移测量的 21 幅序列影像按照相邻关系共组成 20 个影像对形成实验输入数据。它们被依次送入 JTC 像移测量实验装置,获得两幅影像的联合功率谱和相关输出,图 4 为 17# 影像对相应的实验结果。

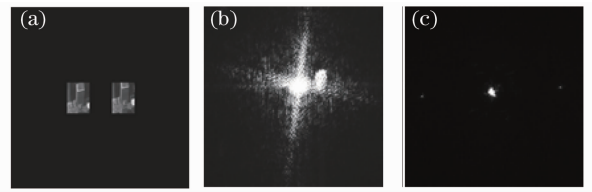


图 4 17# 影像对的联合功率谱和相关输出实验结果。

(a) 输入图像, (b) 功率谱, (c) 相关输出

Fig. 4 The joint power spectrum and the correlation output of No. 17 input image pair. (a) Input images, (b) power spectrum, (c) correlation output

在获得 20 个影像对的相关输出后在相关输出面上确定两个幅影像互相关峰的亚像元位置。首先以两幅影像不存在像移情况下的理论互相关峰位置为中心的 15 pixel \times 15 pixel 像元区域内寻找灰度最大值,然后在以该最大值点为中心的子窗口内计算互相关峰的质心坐标,计算公式为

$$(x_c, y_c) = \frac{\sum_{ij} X_{ij} I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}}, \quad (5)$$

式中 I_{ij} 为子窗口内的互相关峰影像, X_{ij} 为当前像元的行号或列号。分别计算相关输出面上两个互相关峰的质心位置,并与理论互相关峰位置相减和平均后最终获得两幅序列影像间的相对像移。图 5 是对 20 个影像对进行测量的结果。从图中可见,利用所搭建的 JTC 像移测量装置比较准确的测得了序列影像间的相对像移,并且取得了亚像元的精度。其中沿 x 方向,也就是相机推扫方向 20 个影像对像移测量误差均值为 0.024 pixel, RMS 测量误差为 0.142 pixel。 y 方向像移测量误差均值为 0.06 pixel, RMS 测量误差为 0.138 pixel。两个方向像移测量误差整体小于 0.2 pixel。对于 TDICCD 空间相机来说,像移对像质影响的调制传递函数(MTF)可以表示为

$$f_{MT} = \sin(\pi f \Delta b) / \pi f \Delta b, \quad (6)$$

式中 Δb 为附加像移, f 为相机焦面所对应的空间频

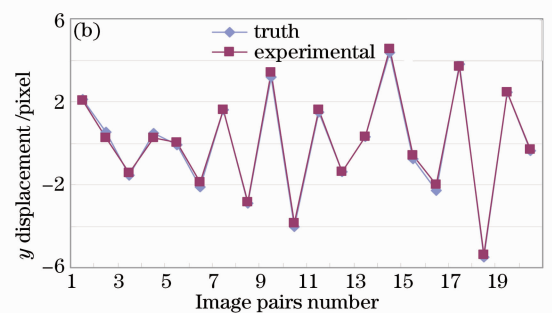
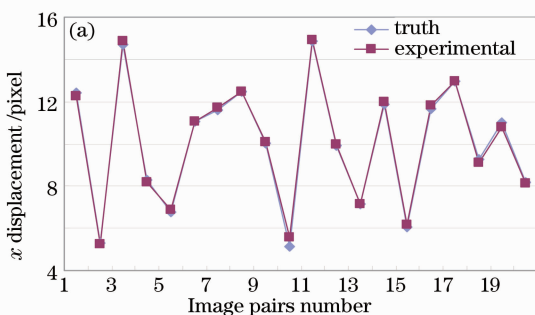


图 5 像移测试曲线图

Fig. 5 Curve of image motion measurement

率。当像移测量误差 $\Delta b < 0.2b$ (b 为像元尺寸) 时, 在奈奎斯特频率处 $f_{\text{MTF}} > 0.984$, 基本可以忽略像移对相机像质的影响。因此, 以上对像移测量的结果能够满足空间相机像移测量和补偿的基本要求。

在计算互相关峰质心时子窗口尺寸的大小无疑会对互相关峰位置确定精度产生直接的影响。为了分析子窗口尺寸对像移测量精度的影响, 实验中比较了不同子窗口尺寸下的像移测量误差, 结果如图 6 所示。从图中可见, 当子窗口尺寸为 5×5 时 x 方向像移测量 RMS 误差为 0.149 pixel。 y 方向像移 RMS 测量误差为 0.142 pixel。随着子窗口尺寸的增大测量误差逐渐降低。当子窗口尺寸为 9×9 时达到最小值, x 方向 RMS 误差为 0.138 pixel, y 方向 RMS 误差为 0.124 pixel。当子窗口尺寸大于 9×9 时像移测量 RMS 误差逐渐增大。因此在不同的测量条件下存在一个最优的寻质心子窗口尺寸。

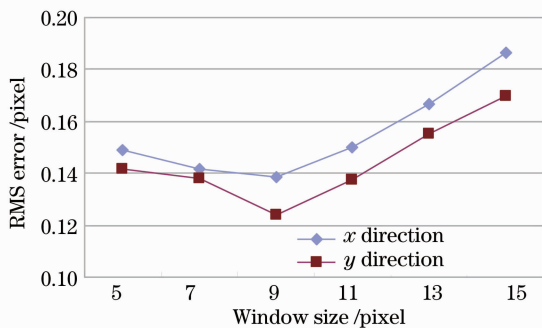


图 6 寻质心窗口尺寸对像移测量的影响

Fig. 6 Influence of centroiding window size on image motion measurement

空间相机推扫成像时用于像移测量的序列图像内容随焦面影像的移动而变化。这将影响相关输出面上互相关峰领域的能量分布。如果针对不同的能量分布计算最优子窗口尺寸势必增加像移测量过程中的计算量, 影响像移实时测量的性能。因此需要改进质心提取的计算方法, 提高提取精度和降低对子窗口尺寸的敏感度。目前提取质心的方法除基本的质心计算方法[如(5)式]外还有强度权重质心法(IWC), 迭代权重中心法(IWCoG)等^[14,15]。其中IWC以寻质心窗口像元强度矩阵的幂作为权重参与质心计算, 其本质是拉大了明暗像元间的亮度差, 从而有利于确定峰值像元的位置和抑制噪声的影响, 具体计算公式为

$$(x_c, y_c) = \frac{\sum_{ij} X_{ij} I_{ij} W_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij} W_{ij}}, \quad (7)$$

式中 $W(x, y) = [I(x, y)]^p$ 。IWC 计算相对简单, 不需要对质心形状的先验知识和迭代计算, 因此特别适合这里对质心算法的改善。实验中在子窗口尺寸固定的情况下分析了 P 取不同值情况下对质心确定精度的影响, 最终选取质心窗口内像元强度矩阵的 4 次方作为权重矩阵。图 7 用(5), (7)式在不同子窗口尺寸下像移测量的结果。从图中可见, 采用灰度权重质心法有效的提高了像移测量的精度, 当子窗口尺寸为 9×9 时 x 方向像移测量 RMS 误差由 0.138 pixel 低到 0.12 pixel。同时, 采用 IWC 也大大降低了对子窗口尺寸的敏感性, 各种窗口尺寸下 RMS 测量误差基本稳定在 0.12 pixel, 均方差为 0.003 pixel。

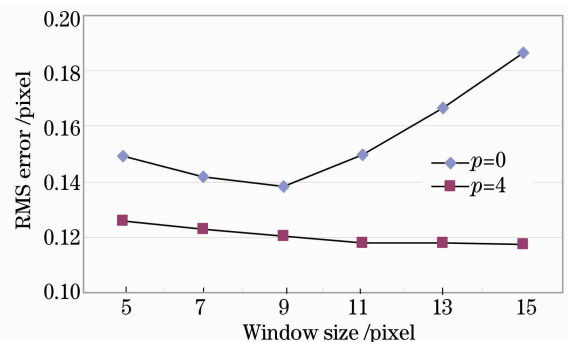


图 7 灰度权重质心法对像移测量性能的改善

Fig. 7 Performance improvement of image motion measurement by IWC

5 结 论

利用光学联合变换器进行像移测量是实现空间相机运动成像过程中非正常像移测量和补偿的有效技术途径。在对光学联合变换器基本工作原理分析的基础上利用半实物静态仿真实验装置对该方法的测量精度和性能进行了分析和评估。利用仿真序列影像进行测试的结果表明实验装置在沿航和穿航方向的像移测量精度均能满足空间相机对像移测量低于 0.2 pixel 的要求。针对寻质心窗口尺寸对互相关峰位置确定精度影响较大的问题, 提出采用灰度权重质心法替代传统质心算法, 不仅降低了测量精度对寻质心窗口尺寸的敏感性而且进一步提高了像移测量的精度, 为进一步的动态像移测量实验打下了基础。

参 考 文 献

- 1 H. S. Wong, Y. L. Yao, E. S. Schilig. TDI charge-coupled devices: Design and applications[J]. *IBM Res. Develop.*, 1992, 36(1): 83~106

- 2 R. Sylvie, J. Loic, R. Bernard *et al.*. Satellite attitude instability effects on stereo images [J]. *IEEE*, 2004, **9**(4): 477~480
- 3 Fan Chao, Li Yingcai, Wang Feng *et al.*. Analysis of factors having influence on image quality of TDICCD camera [J]. *Infrared*, 2008, **29**(8): 21~25
樊超, 李英才, 王峰等. 影响 TDICCD 相机成像质量的因素分析[J]. *红外*, 2008, **29**(8): 21~25
- 4 T. Valerij, D. Sergei, J. Klaus *et al.*. Smartsan hardware test results for smart optoelectronic image correction for pushbroom cameras[C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 264~272
- 5 S. Jutamulia. Joint transform correlators and their applications [C]. *SPIE*, 1992, **1812**: 233~243
- 6 K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko, *et al.*. Compensation of the attitude instability effect on the imaging payload performance with optical correlators [J]. *Acta Astronautica*, 2003, **52**: 965~974
- 7 V. Tchernykh, S. Dyblenko, K. Janschek *et al.*. Airborne test results for a smart pushbroom imaging system with optoelectronic image correction[J]. *SPIE*, 2004, **5234**: 550~559
- 8 K. Janschek, V. Tchernykh. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera[J]. *Space Technology*, 2001, **21**: 127~132
- 9 Fan Chao, Yi Hongwei, Chen Haofeng *et al.*. Research on the measurement method of the sub-pixel image motion based on optical correlator[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(2): 181~184
樊超, 易红伟, 陈浩峰等. 基于光学相关的亚像元像移测量方法研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2): 181~184
- 10 S. Heredia, C. M. Hinojosa, P. Hinojosa *et al.*. Hybrid optical-digital joint transform correlator based in a digital signal processor (DSP) or a field programmable gate arrays(FPGA) [J]. *SPIE*, 2002, **4772**: 136~143
- 11 Chen Xiaowei, Chen Huaixin, Hong Rutong *et al.*. Discrete cosine transform based binary joint transform correlator for fingerprint identification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 931~936
陈晓伟, 陈怀新, 洪汝桐等. 用于指纹识别的基于离散余弦变换的二值化联合变换相关器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 931~936
- 12 Ge Pen, Chen Yueting, Li Qi *et al.*. Robustness study of motion detection based on joint transform correlator without enough illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1796~1800
葛鹏, 陈跃庭, 李奇等. 欠曝光下光学联合变换相关器位探测技术的稳健性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1796~1800
- 13 Huang Xianlie, Cao Guoqiang, Lai Hongkai. Binary joint transform correlator with high pass filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 866~869
黄献烈, 曹国强, 赖虹凯. 高通滤波的二元联合变换相关器[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 866~869
- 14 A. Vyas, M. B. Roopashree, B. R. Prasad. Optimization of existing centroiding algorithms for Shack-Hartmann sensor [C]. National Conference on Innovative Computational Intelligence & Security Systems, Sona College of Technology, Salem. 2009: 400~405
- 15 Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *J. Beijing Institute of Machinery*, 2009, **24**(1): 61~64
唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. *北京机械工业学院学报*, 2009, **24**(1): 61~64