

光学相关法测量空间相机像移的性能研究

樊超¹ 李英才² 傅洪亮¹ 梁义涛¹

(¹ 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)
(² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 为了测量由卫星姿态不稳定或振动等原因引起的空间相机的亚像元像移, 使用了光学联合变换相关器 (JTC) 对安装在相机焦面上的辅助面阵 CCD 采集到的相邻两帧图像进行相关运算。给出了使用该方法测量像移的原理, 搭建了实现 JTC 的光学实验平台, 对 JTC 测量相机像移的性能进行了实验研究。结果表明, 使用 JTC 完全可以测量空间相机的亚像元像移, 并且像移测量精度不随所拍摄景物的内容变化。测量误差服从均值为 0 的正态分布, 在显著性水平为 0.05 下, 像移测量误差的均方差不大于 0.12 pixel, 完全满足空间相机的使用要求。

关键词 遥感; 像移; 联合变换相关器; 测量

中图分类号 V448.21 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0712006

Research on Measurement Method of Image Motion of Space Camera Based on Optical Correlator

Fan Chao¹ Li Yingcai² Fu Hongliang¹ Liang Yitao¹

¹ College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou, Henan 450001, China

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract To measure the sub-pixel image motion which is caused by satellite attitude instability or vibration, the optical joint transform correlator (JTC) is used, which is based on using the auxiliary plane CCD to record the image motion in the focal plane of the satellite camera. The principle of this method is described, and the experimental platform is built. The measurement performance of the JTC is researched. The results show that the JTC can measure the sub-pixel image motion of the space camera entirely, and the accuracy is not variable with the contents of the input images. The measurement error submits the normal distribution with the mean of zero, and the root mean square (RMS) error is no more than 0.12 pixel under the conspicuous level of 0.05. This can meet the operating requirement of the space camera completely.

Key words remote sensing; image motion; joint transform correlator; measurement

OCIS codes 120.0280; 280.0280; 040.1490; 040.1520; 070.4550

1 引言

空间相机利用卫星平台的运动推扫成像, 相机拍照时焦面上被照物影像的运动与光生电荷包的转移间存在相对运动, 由此带来的成像模糊及拖尾效应即为像移。引起像移的因素有很多, 例如由于卫星侧摆、太阳帆板调整和动量轮变速等引起的卫星颤振以及速高比变化、偏流角误差等^[1,2]。随着空间相机分辨率的提高, 像移成为影响像质的主要因

素。由于卫星空间运行环境的复杂性, 导致这种像移是随机变化的, 基本上没有规律可循。解决这个问题的方法通常是提高卫星姿态控制的稳定性, 减小由动量轮或其他因素引起的卫星振动。然而, 这种方法会大幅增加卫星的研制成本和难度^[3~6]。为此, 本文采用光电混合的联合变换相关器 (JTC) 测量相机的像移, 该方法具有高速度、大容量、抗电磁干扰等优点, 可以在轨实时精确测量像移, 实现像移

收稿日期: 2011-01-04; 收到修改稿日期: 2011-03-21

基金项目: 国家 973 计划 (2009CB724006) 资助课题。

作者简介: 樊超 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间遥感技术、信息光学和图像处理等方面的研究。

E-mail: anfan2003@gmail.com

补偿,以提高相机的成像质量。

2 联合变换相关器测量像移的原理

为了测量空间相机的随机像移,在相机的视场内安装具有一定尺寸的面阵像移 CCD 探测器,将其相继采集到的相邻两幅时序图像作为相关器的输入,经过相关运算,测量输出相关峰的位移量,达到测量像移的目的^[7]。考虑到 JTC 最终要完成在星上测量相机像移的目的,这对器件的体积和重量都提出了较高要求,因此使用了单透镜、单空间光调制器(SLM)的相关器结构,如图 1 所示。

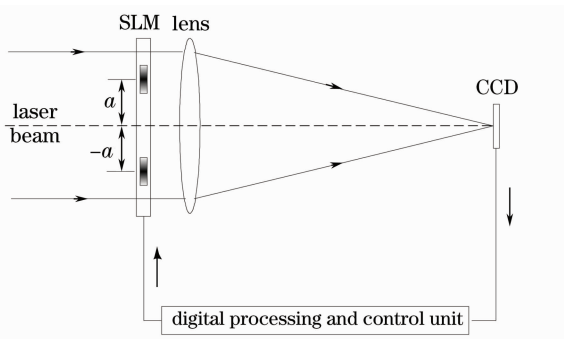


图 1 光电混合 JTC 结构图

Fig. 1 Structural scheme of optoelectronic JTC

中心点分别位于 $(0, a)$, $(0, -a)$ 的参考图像 $r(x, y)$ 和目标图像 $t(x, y)$ 同时对称地读入 SLM, 并且和参考图像相比, 目标图像的景物沿 x 方向和 y 方向分别移动了 $\Delta x, \Delta y$, 则相关器的输入 $E(x, y)$ 可表示为

$$E(x, y) = r(x, y - a) + t(x + \Delta x, y + a + \Delta y). \quad (1)$$

该输入经过一次傅里叶变换(FT)后, 得到的频谱函数 $G(u, v)$ 为

$$G(u, v) = R(u, v) \exp(-2i\pi av) + T(u, v) \exp\{2i\pi[u\Delta x + (a + \Delta y)v]\}, \quad (2)$$

式中 $R(u, v)$ 和 $T(u, v)$ 分别为 $r(x, y)$, $t(x, y)$ 的傅里叶变换。该频谱复振幅分布经平方律探测器转换成联合变换功率谱分布

$$|G(u, v)|^2 = |R(u, v)|^2 + |T(u, v)|^2 + R(u, v)T^*(u, v) \exp\{-2i\pi[u\Delta x + (2a + \Delta y)v]\} + T(u, v)R^*(u, v) \exp\{2i\pi[u\Delta x + (2a + \Delta y)v]\}, \quad (3)$$

式中上标 $*$ 表示复共轭。在数字处理与控制单元的控制下, 联合变换功率谱 $|G(u, v)|^2$ 重新送入 SLM 中, 再经过一次傅里叶变换后, 得到相关输出

$$c(x, y) = t(x, y) \otimes t(x, y) + r(x, y) \otimes r(x, y) + t(x, y) \otimes r(x, y) * \delta(x - \Delta x, y - 2a - \Delta y) + r(x, y) \otimes t(x, y) * \delta(x + \Delta x, y + 2a + \Delta y), \quad (4)$$

式中 $*$ 表示卷积, \otimes 表示相关运算。前两项为自相关项, 后两项为互相关项。从(4)式可以看出, 互相关信号中包含了像移信息 $\Delta x, \Delta y$, 只要测出互相关峰相对于理想位置 $(0, \pm 2a)$ 的偏移量, 就可以得到所要探测的像移值。

3 JTC 测量像移的实验

为了对使用 JTC 测量像移的性能进行实验研究, 采用了如图 2 所示的光路结构。使用的 SLM 是英国 Scipher 公司中央研究实验室光学中心(CRL Opto)生产的 XGA3 型电寻址 TFT-LCD, 其空间分辨力为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, 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 是意大利 DTA 公司生产的 EL-400ME, 其分辨力为 $768 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像元尺寸 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 。在用 CCD 探测联合变换功率谱时, 为了使 CCD 能够完整探测到零级功率谱, 要求傅里叶变换透镜的焦距满足公式^[8,9]

$$f = \frac{N_2 d_2 d_1}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 N_2 是 CCD 每一行的像元数, d_2 是 CCD 的像元尺寸, d_1 是 SLM 的像元间距, λ 为照明光波长。当使用 He-Ne 激光器作为相干光源时, 计算得到傅里叶透镜的焦距 $f = 196.6 \text{ mm}$ 。再根据菲涅耳衍射原理和 SLM 的面板尺寸, 最终选择了相对孔径为 1:5.3 的双胶合透镜作为傅里叶变换透镜。

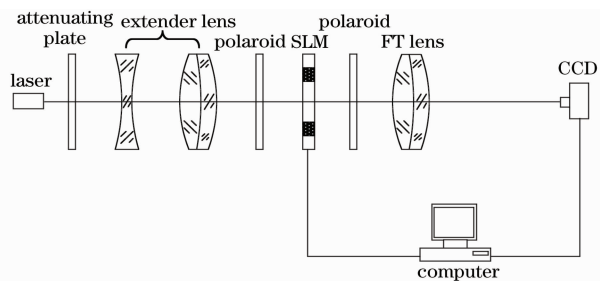


图 2 JTC 的实验光路图

Fig. 2 Experimental light route of JTC

为了研究使用 JTC 测量像移的性能, 实验中使用了景物内容各不相同的 10 幅图像, 这些图像中既包含了景物结构较为复杂的城市社区和机场, 又包含了景物内容相对较少的田地和公路, 由于篇幅限制, 这里只给出了 3 幅图像, 如图 3 所示。由于该像移测量系统最终应用于空间相机上, 假设航天器的

运行高度为 500 km, 飞行轨道为圆轨道, 则航天器相对于惯性系的速度 $V_s \approx 7.6$ km/s。在这样高的速度下, 要使辅助面阵像移传感 CCD 拍摄到的图像不出现严重拖尾现象而造成图像完全模糊, 从而影响像移测量的精度, 就要求其曝光时间很短。在大气散射和云层遮挡的影响下, 短时曝光势必造成面阵传感 CCD 采集到的图像的信噪比很低。基于这种考虑, 对所使用的景物图像加入了高斯白噪声, 使图像的信噪比 $R_{SN} = 1$ 。为了得到具有亚像元精度的像移图像, 对图 3 中的图像使用线性内插和像元合并的方法得到一幅在 x 方向和 y 方向具有亚像元像移, 且分辨力下降 1/2 的图像。如果认为原图像以奈奎斯特频率采样, 那么最终得到的降采样图像就可以准确模拟出亚像元像移。

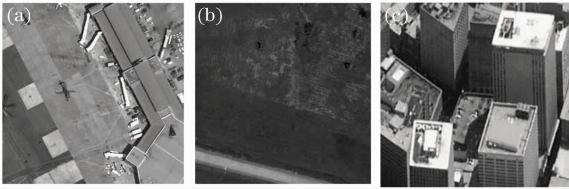


图 3 实验使用的图像。(a) 机场; (b) 田地; (c) 城市
Fig. 3 Images used in the experiment. (a) Airport; (b) field; (c) city

3.1 图像景物结构对像移测量精度的影响

使用上面描述的像移图像产生方法, 对 10 幅不同图像加入不同量值的像移, 像移范围在 1 pixel 以内, 并使用 JTC 实验装置对其进行测试。例如, 将图 3(c) 所产生的一对象移图像作为 JTC 的输入, 由 CCD 拍摄到的联合功率谱 (JPS) 和相关输出如图 4 所示。

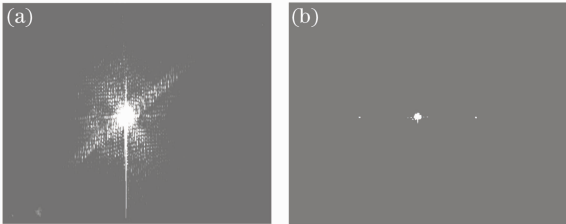


图 4 联合功率谱 (a) 和相关输出 (b)
Fig. 4 JPS (a) and (b) output of the correlator

测试结果表明, 使用 JTC 测量像移时, 无论是对结构较为丰富的城市社区和机场, 还是对景物内容相对较少的田地和公路, 像移测量精度几乎不随图像内容变化。但相比而言, 对于结构较为复杂的图像来说, 该方法的测量精度略好一些。其原因在于景物结构越简单, 图像像元间的灰度值变化越小 (近似均衡), 在随机噪声的影响下, 图像间的相关性越易破坏, 从而导致像移测量误差增加。

3.2 图像大小对像移测量精度的影响

由于 JTC 的像移测量精度基本不随图像景物变化, 因此从图 3(a) 中取出不同尺寸的子图像, 分别得到 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$, $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$, $96 \text{ pixel} \times 96 \text{ pixel}$ 和 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的输入图像。不同输入图像尺寸下的归一化相关输出如图 5 所示。结果表明, 随着图像尺寸的增加, 功率谱记录的信息量逐渐增多。当输入图像的尺寸为 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 时, 除零级谱外, 功率谱中包含的其他谱信息很少, 导致相关输出中互相关峰的能量很弱, 并且边缘模糊, 而自相关峰的能量较强, 这对于像移测量来说是很不利的。而随着输入图像尺寸的增加, 记录到的功率谱信息越来越多, 相关输出的互相关峰能量逐渐增强。通过对像移范围在 1 pixel 内的一组输入图像的测量, 得到了不同图像尺寸下的像移测量误差, 如表 1 所示。根据此表, 即使对于信噪比 $R_{SN} = 1$ 的输入图像, 当图像的尺寸达到 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 时, 也能得到较好的像移测量精度。

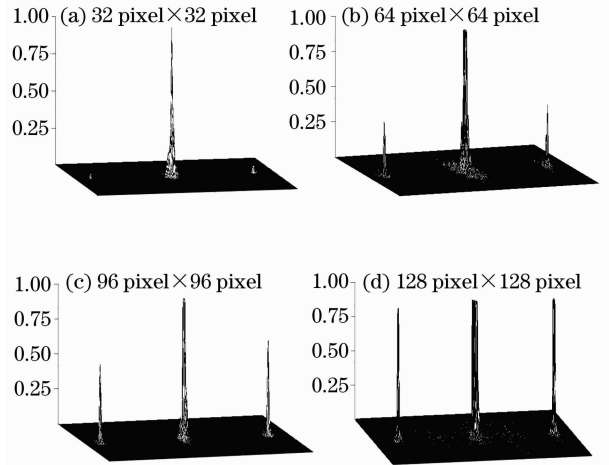


图 5 不同输入图像尺寸下的相关输出

Fig. 5 Output under the different-sized input image

3.3 JTC 测量像移的范围

以上测量结果是在目标图像和参考图像间的像移小于 1 pixel 的情况下得到的。为了研究使用该方法测量像移时, 测量精度与像移范围之间的关系, 当输入图像的尺寸为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$, 信噪比

表 1 不同输入图像尺寸下的像移测量误差

Table 1 Measurement errors for different sizes of the input image

Image size / pixel	Mean-squared error / pixel
32×32	0.325
64×64	0.252
96×96	0.176
128×128	0.109

$R_{SN}=1$ 时,使用计算机软件分别得到了像移范围在 0~60 pixel 内的像移图像。利用 JTC 对这些图像进行像移测量,测量结果如图 6 所示。由图可以看出,像移测量误差随像移量的增加并非成线性变化,当像移量在 25 pixel 以内变化时,测量误差变化不大;当像移量小于 50 pixel 时,使用该方法得到的像移测量误差小于 0.2 pixel;继续增加像移量,测量误差急剧增大。这是因为增大像移相当于削弱了两幅图像的相似性,导致相关峰强度衰减直至消失,造成像移测量误差增大。

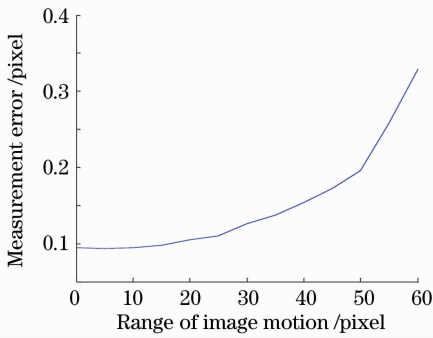


图 6 像移测量精度与像移范围的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the measurement error and the range of image motion

3.4 综合实验验证

在对 JTC 测量像移的性能分别进行了上述研究之后,又使用 10 幅内容不同的图像对其测量性能进行了综合验证。由每幅图像随机产生 5 幅大小为 128 pixel×128 pixel 的像移图像,像移范围在 0~60 pixel 内,对这些图像加入高斯白噪声,使其 $R_{SN}=1$,构成包含 50 个不同像移值的测试样本。使用 JTC 对该样本的像移进行测量。根据此结果,计算得到样本测量误差的均值 $\bar{e}=0.023$,标准差 $s=0.113$ 。然后使用数理统计的方法对测量误差的分布形式、样本均值和方差分别进行了假设检验。结果表明,使用 JTC 测量像移时,测量误差服从均值为 0 的正态分布,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,像移测量误差的均方差不大于 0.12 pixel。对于 TDI CCD 相机来说,像移对像质影响的调制传递函数(MTF)可以表示为

$$F_{MT}(f) = \sin(\pi f \Delta b) / \pi f \Delta b,$$

式中 Δb 为附加像移, f 为相机焦面所对应的空间频率。当采用 JTC 测量相机的像移时,在奈奎斯特频率处,当像移测量误差 $\Delta b \leq 0.12b$ (b 为像元尺寸) 时, $F_{MT}(f) \geq 0.994$, 此时基本可以忽略像移对相机像质的影响。

3.5 误差源分析

针对本实验,有一系列因素将会影响像移测量的精度,分析起来主要的测量误差来源如下:1)激光光束的光强分布不均匀,经过扩束后,光强仍呈高斯分布,导致 SLM 不能被均匀照亮,影响测量精度。2)光电器件本身缺陷引入的测量误差。例如,SLM 的表面会存在散射、空间不均匀性、面型误差等;CCD 在工作过程中,会存在暗电流、电荷转移噪声和散粒噪声等。这些因素都会对测量精度产生影响。3)双胶合透镜的像差和表面的灰尘颗粒引入的测量误差。4) CCD 的离焦引入的系统误差。严格来说,只有当 CCD 准确位于傅里叶透镜的后焦面上才能与输入图像成傅里叶变换关系,任何离焦都会对测量产生影响。5)外界杂光干扰引入的随机误差。6)两幅相关图像之间的相关性,如果它们之间的相关程度很低,则会造成比较大的误差。而增加输入图像的噪声和增大像移范围均会使两幅图像的相关性变差。

4 结 论

实验研究表明,使用 JTC 完全可以测量空间相机的亚像元像移,并且像移测量精度不随所拍摄景物的内容变化。当输入图像的尺寸达 128 pixel×128 pixel 时,即使对于信噪比 $R_{SN}=1$ 的输入图像,也能得到较好的像移测量精度。在使用联合变换相关器测量像移时,测量误差服从均值为 0 的正态分布,在显著性水平为 0.05 下,像移测量误差的均方差不大于 0.12 pixel,完全满足空间相机的使用要求。在获得亚像元像移后,采用图像处理算法或使用补偿机构根据像移量对变形图像进行补偿即可达到提高相机像质的目的^[10,11]。

参 考 文 献

- Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2017~2021
巩盾,王红,田铁印. 温度对星载相机的影响和温控指标的制定[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2017~2021
- D. Y. Chen, R. K. Zhou, Y. C. Li *et al.*. Studies on the satellite TDICCD camera of kinetics modeling for interface jitter and resonance dot scanning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1508~1512
陈丁跃,周仁魁,李英才等. 星载 TDICCD 界面颤振的动力学模型及其共振点扫描研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1508~1512
- R. Sylvie, J. Loic, R. Bernard *et al.*. Satellite attitude instability effects on stereo images[C]. Montreal: 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal

- Processing, 2004
- 4 B. E. Bonshtdt, D. N. Eskov, A. J. Smirnov. Optoelectronic sensing of image movement in focal plane of earth surveillance optical system[C]. *SPIE*, 1994, **2221**: 128~133
 - 5 M. G. Leitmann, N. M. Gomes, J. M. Rebordao *et al.*. Modern space guidance, control and tracking for small LEO satellites[C]. *SPIE*, 1994, **2221**: 79~86
 - 6 S. Lee, J. W. Alexander, M. Jeganathan. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground[C]. *SPIE*, 2000, **3932**: 150~157
 - 7 T. Valerij, D. Sergei, J. Klaus *et al.*. Smart-scan hardware test results for smart optoelectronic image correction for pushbroom cameras[C]. *SPIE*, 2002, **4814**: 264~272
 - 8 M. B. Phillip, Gongde Li, C. T. Frederic *et al.*. Optical design of a miniature Fourier transform lens system for a hybrid digital-optical correlator [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(7): 1650~1654
 - 9 X. J. Lu, C. Y. Wrigley, D. A. Gregory. Basic parameters for miniature optical correlators employing spatial light modulators [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(2): 429~435
 - 10 Pan Haibin, Zhang Wei, Cong Mingyu *et al.*. Image preprocessing algorithm for space target space-based detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2402~2407
 - 潘海斌, 张伟, 丛明煜等. 一种空间目标在轨检测图像预处理算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2402~2407
 - 11 Chen Zhigang, Yin Fuchang, Sun Fu. Registration technique for high-resolution remote sensing images based on nonsubsampling contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2744~2750
 - 陈志刚, 尹福昌, 孙孚. 基于非采样 Contourlet 变换高分辨率遥感图像配准[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2744~2750