

联合变换相关法测量空间相机像移的实验研究

樊超, 梁义涛, 王锋, 李伟

(河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

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(JTC)的方法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, 使用联合变换相关器可以测量空间相机的亚像元像移, 测量误差服从均值为 0 的正态分布, 在显著水平为 0.05 下, 像移测量误差的均方差不大于 0.12 个像元, 完全满足空间相机的使用要求。

关键词:联合变换相关器; 空间相机; 像移; 测量

中图分类号:V448.21

文献标识码:A

Experimental Research on the Measurement Method of Image Motion of the Space Camera Based on Joint Transform Correlator

FAN Chao, LIANG Yi-tao, WANG Feng, LI Wei

(College of information Science and Engineering of Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To measure the sub-pixel image motion which were caused by satellite attitude instability or vibration, the joint optical transform correlator (JTC) was used, which was based on using the auxiliary plane CCD to record of the image motion in the focal plane of the satellite camera. The principle of this method was described, and the experimental platform was built. Based on which, the measurement performance of the JTC was researched. The results show that, the JTC can measure the sub-pixel image motion of the space camera entirely, and the measurement error submits the normal distribution, which mean is zero and the RMS is no more than 0.12 pixel under the conspicuous level is equal to 0.05, this can meet the operating requirement of the space camera completely.

Key words: joint transform correlator; space camera; image motion; measurement

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而带来的成像模糊及拖尾效应即为像移。空间相机的运行环境较为复杂, 引起像移的因素有很多, 例如卫星平台上由于动量轮变速转动、喷气、指向控制、太阳帆板调整、所拍摄景物的高度和地理位置的变化、相机侧摆以及地球自转等原因均会引起相机的像移^[1-3]。像移的产生将会限制相机的分辨率, 影响相机的成像质量。对于高分辨率空间相机来说, 情况更是如此。同时, 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。解决这个问题通常方法是增加卫星姿态控制的稳定性, 并同时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^[4-7]。因此, 如果能够对空间相机成像过程中的像移进行实时在轨测量, 那么就可以通过一定的补偿方法根据像移量对变形图像进行补偿校正, 降低对卫星姿态稳定性

作者简介:樊超(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要研究领域为空间遥感, 信息光学及图像处理。E-mail: anfan2003@gmail.com

收稿日期:2008-01-25; **修订日期:**2008-03-07

的要求。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,进而实现像移补偿,以提高相机的成像质量。

2 联合变换相关器测量像移原理

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探测器(CCD),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^[8]。考虑到 JTC 最终实现在星上测量相机的像移,这就对器件的体积和质量提出了较高要求,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。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,由于卫星的颤振、姿态变化等因素的影响,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后,得到频谱函数 $G(u, v)$:

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

这里, $R(u, v)$ 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。从上式可以看出,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。

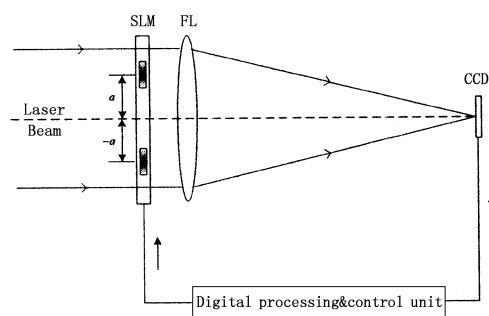


图1 光电混合 JTC 结构图

3 JTC 测量像移的实验研究

根据单透镜联合变换相关器原理,采用的实验光路结构如图2所示。这里,所使用的空间光调制器(SLM)是英国 CRL 公司生产的 XGA3 型电寻址 TFT-LCD,其空间分辨率为 1024×768 ,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,其分辨率为 768×512 ,像元尺寸 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ 。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。

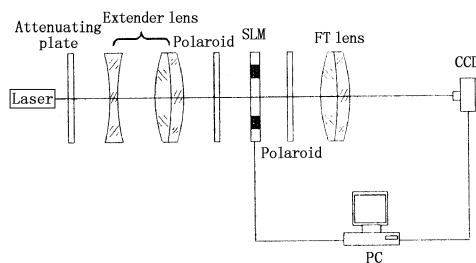


图2 JTC 的实验光路图

卫星运行过程中,安装于焦面的面阵像移探测器所拍摄的图像随景物是时刻变化的。为此,实验中使用了景物内容各不相同的 10 幅图像作为原始图像,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,还包含了景物内容相对较少的田地和公路,基于篇幅所限,这里只给出了 3 幅图像,如图3所示。为得到具有亚像元精度的像移图像,将图3中的图像使用线性内插和像元合并的方法得到在 x 方向和 y 方向具有亚像元像移,且分辨率下降二分之一的像移图像。如果认为原图像以奈奎斯特频率采样的话,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。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 500km ,飞行轨道为圆轨道,则航天器相对于惯性系

的速度 v_s 约为 7.6 km/s。在这样高的速度下,为了使面阵像移探测器拍摄到的图像不出现严重拖尾现象而造成图像的完全模糊,从而影响像移测量的精度,则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探测器采集到的图像的信噪比很低。基于这种考虑,实验中对 JTC 的输入图像加入了高斯白噪声,使图像的信噪比 $\text{SNR} = 1$ 。

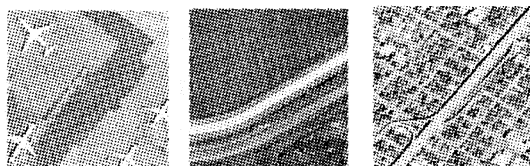


图3 实验使用的图像

使用上面描述的像移图像产生方法,对图3中的3幅图像分别加入不同量值的像移和噪声,并使用 JTC 实验装置对其进行测试。由此得到的联合功率谱(JPS)、相关输出以及归一化相关输出峰的能量分布分别如图4(a)~图4(c)所示。从这些图中可以看出:①对于不同像移的输入图像,JTC 输出的相关峰位置相应随之改变。这再一次从实验的角度证明了该方法测量像移的可行性和有效性;②随着输入图像间像移量的增加,相关输出中互相关峰的能量逐渐减弱,并且这种变化并非成线性关系。实验表明,当像移量接近 60 个像元时,输出面上基本观察不到相关峰的存在。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。

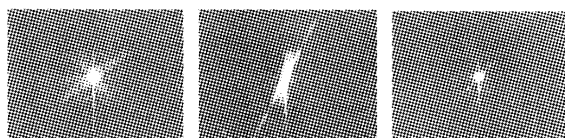
在进行上述研究之后,对于实验中使用的 10 幅图像,由每幅图像随机产生 5 幅 $\text{SNR} = 1$ 的像移图像,像移范围在 60 个像元以内,构成包含 50 个不同像移值的测试样本。使用 JTC 对该样本的像移进行测量,测量误差如表1所示。根据此表,计算得到样本测量误差的均值 $\bar{e} = 0.023$,标准差 $s = 0.113$,图5给出了样本测量误差

的直方图。使用数理统计中的 χ^2 分布、 u 分布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,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,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,像移测量误差的均方差不大于 0.12

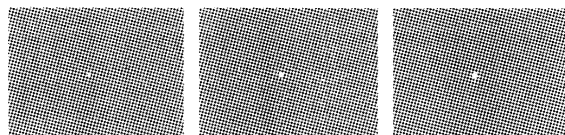
个像元。对于 TDICCD 相机来说,像移对像质影响的 MTF 可以表示为^[9]:

$$\text{MTF}(f) = \sin(\pi f \Delta b) / \pi f \Delta b$$

这里, Δb 为附加像移; f 为相机焦面所对应的空间频率。在采用 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, $\text{MTF}(f) \geq 0.994$, 此时基本可以忽略像移对相机像质的影响。



(a) 联合功率谱



(b) JTC 相关输出



(c) JTC 归一化相关输出峰的能量分布

图4 不同输入图像在不同像移量下的联合功率谱、相关输出及归一化相关峰能量分布

表1 样本的像移测量误差

像元									
序号	测量误差	序号	测量误差	序号	测量误差	序号	测量误差	序号	测量误差
1	-0.105	11	0.039	21	-0.124	31	0.045	41	-0.033
2	0.106	12	-0.013	22	0.284	32	-0.003	42	0.07
3	0.102	13	-0.108	23	-0.098	33	-0.01	43	0.155
4	0.03	14	0.081	24	-0.076	34	0.045	44	0.087
5	0.126	15	0.043	25	-0.164	35	0.062	45	-0.114
6	-0.053	16	0.067	26	0.006	36	0.093	46	0.138
7	-0.067	17	-0.179	27	0.086	37	0.039	47	0.105
8	0.028	18	0.124	28	-0.004	38	0.035	48	0.148
9	-0.15	19	-0.02	29	0.134	39	0.029	49	0.039
10	0.071	20	0.188	30	-0.055	40	-0.082	50	0.059

4 结 论

使用光学联合变换相关器完全可以测量空间相机的亚像元像移,并且测量精度不随所拍摄景物的内容变化。实验研究表明,在使用该方法测量像移时,测量误差服从均值为 0 的正态分布,在显著水平

(下转第 848 页)

表1 两种方法所用时间对比

方法	文献[5] Gabor 处理/s	本文 Gabor 处理/s	速度提高 百分比/%
方向图计算 时间	0.590 ~ 0.640	0.365 ~ 0.395	35.5
Gabor 增强 时间	2.185 ~ 2.290	1.828 ~ 1.859	16.7

4 结 论

本文研究了利用 Gabor 滤波器进行指纹图像增强的方法,在文献[5]的基础上改进了方向图的求法,不仅提高了方向估算的准确性而且提高了系统运算速度;利用频率均值求出自适应 Gabor 滤波器变换窗口的大小,精确选择纹理范围,可以更好发挥 Gabor 滤波器频率选择和方向选择的特性,更彻底地分离粘连的脊线或者连接断裂的脊线。对于实际应用中采集指纹图像质量不同,纹线粗细存在很大差异的指纹库来说,本文算法更具优越性。

(上接第 843 页)

为 0.05 下,像移测量误差的均方差不大于 0.12 个像元,完全满足空间相机的使用要求。并且,该方法还具有操作简单、运算速度快的优点,较为适合空间相机的在轨使用。近年来,随着 SLM 和 CCD 等光电器件制作工艺和技术的不断提高,目前已经出现了每秒几千帧的高频空间光调制器和高速 CCD 相机,这些器件的出现可以实现实时联合变换相关。在测得随机像移后,可将相机采集到的变形图像和像移测量值同时传回地面,然后,使用线性插值的方法根据像移量对变形图像进行补偿和恢复。这种补偿方法的计算量小、精度高、图像过渡平滑,可获得高质量的高分辨率卫星图像。并且使用软件在地面实施像移补偿,还可以有效减轻卫星的质量和功耗,降低稳像系统的设计难度。本研究为解决高分辨率空间相机的实时稳像问题提供了有益的探索和工程参考。

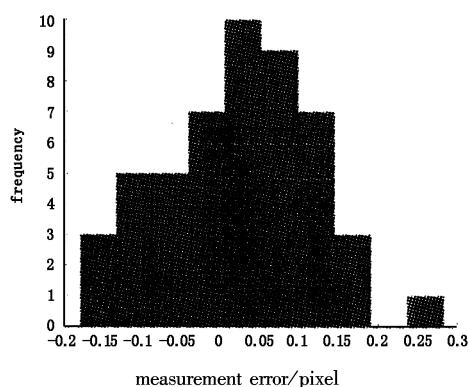


图5 测量误差的直方图

参考文献:

- [1] Lin Hong, Jian A, Pankanti S, et al. R. Fingerprint enhancement, applications of computer vision [C]//Wacv 96, Proceedings 3rd IEEE Workshop on, 1996; 202 - 207.
- [2] Kim B G, Kim H J, Park D J. New enhancement algorithm for fingerprint images [C]//Proc 16th International Conference Pattern Recognition, 2002, 3: 879 - 882.
- [3] Vutipong AreekuI, Ukrit Watchareeruetal. Fast separable gabor filter for finterprint enhancement [C]//ICBA LNCS 3072, 2004, 403 - 409.
- [4] Weipeng Zhang, Yuan Yan Tang, Xing You. Fingerprint enhancement using wavelet transform combined with Gabor filter [J]. Internaqtional Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2004, 18(8): 1391 - 1406.
- [5] 刘军波, 马利庄, 聂栋栋, 等. 改进的基于 Gabor 滤波器的指纹增强算法 [J]. 计算机工程, 2005, 31(15): 146 - 147, 164.
- [6] 苑玮琦, 郑潇. 基于连续方向图的指纹图像滤波 [J]. 激光与红外, 2006, 36(3): 718 - 721.

参考文献:

- [1] 樊超, 李英才, 易红伟. 偏流角对 TDICCD 相机像质的影响分析 [J]. 光电工程, 2007, 34(9): 70 - 73.
- [2] 佟首峰, 李德志, 郝志航. 高分辨率 TDI - CCD 遥感相机的特性分析 [J]. 光电工程, 2001, 28(4): 64 - 67.
- [3] 刘明, 刘刚, 李友一, 等. 航天相机像移计算及补偿分析 [J]. 光电工程, 2004, 31(增刊): 12 - 14.
- [4] Sylvie R, Loic J, Bernard R, et al. Satellite attitude Instability effects on stereo images [J]. IEEE, 2004, 9(4): 477 - 480.
- [5] Bonshtdt B E, Eskov D N, Smirnov A J. Optoelectronic sensing of image movement in focal plane of earth surveillance optical system [J]. Proceeding of SPIE, 1994, 2221: 128 - 133.
- [6] Leitmann M G, Gomes N M, Rebordao J M, et al. Modem space guidance, control and tracking for small LEO satellites [J]. Proceeding of SPIE, 1994, 2221: 79 - 86.
- [7] Lee S, Alexander J W, Jeganathan M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [J], Proceeding of SPIE, 2000, 3932: 150 - 157.
- [8] Valerij T, Sergei D, Klaus J, et al. Smart-scan hardware test results for smart optoelectronic image correction for pushbroom cameras [J]. Proceeding of SPIE, 2002, 4814: 264 - 272.
- [9] Wong H S, Yao Y L, Schlig E S. Tai charge-coupled Devices; Design and Application [J]. IBM Journal of research and development, 1992, 36(1): 83 - 105.