

光学相关的双 CCD 成像系统图像运动位移测量

钱义先 洪雪婷 金伟民

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 为测量卫星遥感相机因姿态不稳定以及各种扰动引起的亚像素像移,提出了基于光学相关的双 CCD 成像系统的图像运动测量方法。在主成像系统成像的同时,辅助高速 CCD 获取同一目标的图像序列,利用联合变换相关器对所采集的图像序列进行光学运算,测量出相邻图像序列的运动位移。阐述了使用光学相关方法测量像移的原理,并模拟分析了噪声和运动条件下的测量精度。建立了使用该方法测量像移的实验系统。实验结果证实了该方法的有效性,测量精度小于 0.1 pixel,满足卫星遥感相机的使用要求。

关键词 测量; 傅里叶光学; 光学相关器; 图像运动

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0708002

Motion Measurement of Dual-CCD Imaging System Based on Optical Correlator

Qian Yixian Hong Xueting Jin Weimin

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract To measure the sub-pixel image motion caused by satellite attitude instability or various disturbance, an effective approach to measure image motion by dual-CCD imaging system based on joint transform correlator (JTC) is presented. An auxiliary high-speed CCD is used to capture image sequences which are the same scenes as those images captured by the prime CCD. These image sequences are optically calculated by JTC system, and then relatively motion displacement can be obtained. The principle of this approach is represented, and measurement precision is analyzed in the condition of noise and image motion. Motion measurement system is also presented, and the experimental results show that the measurement precision can be controlled within 0.1 pixel.

Key words measurement; Fourier optics; optical correlator; image motion

OCIS codes 100.2000; 070.4550; 280.4788

1 引 言

卫星遥感技术是获取目标图像信息的主要手段之一。通过获取高分辨率图像可以满足自然灾害监测预警、军事侦察目标获取、数字城市规划、环境监测保护、地理信息系统的需要。由于遥感相机是搭载于高速运动的卫星上进行工作,因此总是受到载体振动(发动机、电机等)、飞行速度、姿态变化(俯仰、偏航、翻滚)、速高比变化、地球自转等动态因素影响^[1-2],从而引起 CCD 积分时间内图像运动,结果造成图像模糊。由于卫星空间运行环境的复杂性,导致这种像移是多种因素耦合而且随机变化的,

基本上没有规律可循,所以图像运动位移探测获取及图像复原一直都是一个挑战性的问题。通常,可以通过减小曝光时间来避免图像运动模糊,但是这样往往造成航天成像曝光不足以及噪声放大,尤其是高分辨卫星对地观测成像系统因大孔径比对曝光不足以及低亮度非常敏感。

为了补偿图像运动,实际上都需要使用图像稳定器。一般有两种图像稳定方法,一种是通过软件方式的数字图像稳定^[3-4],如经典复原算法和迭代算法,另一种是通过硬件方式的光学稳定^[5-6]方法,如通过移动(或转动)透镜或传感器改变光路来保持

收稿日期: 2013-01-11; **收到修改稿日期**: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61205012)、浙江省自然科学基金(LY12F05001)

作者简介: 钱义先(1974—),男,博士,副教授,主要从事航空光学遥感、光信息处理和图像复原等方面的研究。

E-mail: qianyixian@zjnu.edu.cn

图像稳定。但无论采用哪种补偿方法,最重要的都是要探测图像运动位移,这是数字图像处理和光学稳像的首要步骤,有利于提高图像复原质量。图像复原算法首先需要从模糊图像中提取运动矢量来构建点扩展函数(PSF),进而复原图像,然而这些图像本身因为运动模糊并没有包含明显的图像边缘,因此图像运动矢量的获取及 PSF 的构建精度不高,往往造成图像复原效果不理想。虽然盲复原不需要提前知道图像运动矢量和 PSF,但同样需要一个估计的 PSF 值,如果估计的 PSF 有偏差,往往造成复原效果不佳。而光学稳像通过陀螺或加速度计等复杂的光机电系统来测量运动位移,容易受摩擦力、风阻等力矩误差和传感器的误差影响,精度低,实时性差,且费用昂贵。

本文提出基于双 CCD 成像系统的光电混合联合变换相关器(JTC) [7-9] 测量遥感相机的图像运动。JTC 既具有光速、大容量、并行处理等优点,又具有数字处理的可编程、灵活的特点。在主成像系统曝光成像的同时,利用辅助高速 CCD 获取同一目标的图像

序列,通过 JTC 对采集到的图像序列进行光学相关运算,测量出相关峰的位置,达到测量像移的目的。目前光学相关速度可达 10000 次/秒,而且运动测量精度高。该方法适用于任何形式的运动测量。对提出的方法进行了数值模拟和精度分析,同时也建立了光电混合相关实验装置进行图像运动测量。

2 原 理

图 1 给出了光电混合联合变换相关的双 CCD 成像系统测量图像运动位移原理图。在主 CCD 成像系统曝光成像的同时,高速 CCD 成像获取的相邻图像序列 $f_i(x, y - a)$ 与 $f_{i+1}(x + \Delta x, y + a + \Delta y)$ 被并排地输入到空间光调制器(SLM)中。这里假设当前帧 $f_i(x, y - a)$ 为参考图像 $r(x, y)$,下一帧 $f_{i+1}(x + \Delta x, y + a + \Delta y)$ 代表目标图像 $t(x, y)$,它们分别以坐标 $(0, -a)$ 与 $(0, a)$ 为中心位置排放,形成联合输入图像 $s(x, y)$,可表示为

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

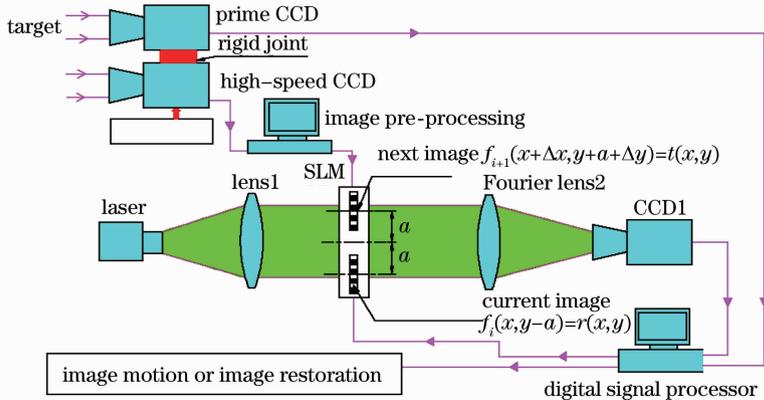


图 1 光电混合相关的图像运动位移测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of opto-electronic hybrid JTC for implementing image motion measurement

如图 1 所示,经过准直扩束的相干激光照射到 SLM 上,联合输入图像 $s(x, y)$ 经过傅里叶透镜 2 进行第一次光学傅里叶变换,在其后焦面由探测器 CCD1 可得到其联合功率谱(JPS)函数为

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

式中 $S(u, v)$, $R(u, v)$ 与 $T(u, v)$ 分别代表联合图像 $s(x, y)$, 参考图像 $r(x, y)$ 与目标图像 $t(x, y)$ 的傅里叶变换。 u 和 v 分别代表 x 和 y 坐标在傅里叶平面上的空间频率,并且有关系 $x = \lambda fu, y = \lambda fv$, λ 和 f 代表工作激光波长和傅里叶透镜 2 的焦距。 Δx 与 Δy 即表示图像 $f_{i+1}(x + \Delta x, y + a + \Delta y)$ 相对于上一帧图像 $f_i(x, y - a)$ 分别在 x 和 y 方向上的相对运动位移。

将 CCD1 探测到的 JPS 作为信号输入到 SLM 中,再次经过傅里叶变换透镜 2,可以在其后焦面上由 CCD1 探测到相关峰 $c(x, y)$,可表示为

$$c(x, y) = r(x, y) \otimes r(x, y) + t(x, y) \otimes t(x, y) + r(x, y) \otimes t(x, y) \times \delta(x + \Delta x, y + 2a + \Delta y) + t(x, y) \otimes r(x, y) \times \delta(x - \Delta x, y - 2a - \Delta y), \quad (3)$$

式中 \otimes 代表相关操作,第三项和第四项代表互相关峰,为有用的信号,包含了图像运动位移信息 Δx 和 Δy 。

为了探测得到尖锐的相关峰并提取出相关峰的位置信息 Δx 和 Δy 。首先让目标图像和参考图像相同,均为 $f_i(x, y - a)$,作为联合图像输入到 SLM 中,这样通过 JTC 就可以获得理想无位移的相关峰位置坐标信息 $(x_{\text{ideal}}, y_{\text{ideal}})$ 。然后使参考图像和目标图像不同,分别为 $f_i(x, y - a)$ 与 $f_{i+1}(x + \Delta x, y + a + \Delta y)$,作为联合图像输入 SLM 中,获得有相对运动位移的相关峰位置坐标 $(x_{\text{peak}}, y_{\text{peak}})$ 。该坐标位置的提取是首先找到其理想相关的中心位置,然后在该中心的 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 区域内寻找灰度最大值,最后在以该最大值为中心的子窗口内计算实际相关峰的质心坐标,其计算数学表达式为

$$(x_{\text{peak}}, y_{\text{peak}}) = \frac{\sum_{ij} X_{ij} I_{ij} W_{ij}}{\left(\sum_{ij} I_{ij} W_{ij}\right)}. \quad (4)$$

则相邻图像序列之间的相对运动位移可以很容易地通过相应的坐标相减得到:

$$\Delta x = x_{\text{peak}} - x_{\text{ideal}}, \quad (5)$$

$$\Delta y = y_{\text{peak}} - y_{\text{ideal}}. \quad (6)$$

(4) 式中 I_{ij} 表示子窗口内的互相关峰图像, X_{ij} 代表当前像素的行号或列号, $W_{ij}(x, y) = [I(x, y)]^k$ 代表在相关峰 I_{ij} 处的权重因子, k 是一个正整数。

3 实验结果及分析

由于输入图像信噪比低、图像本身模糊以及复杂的背景干扰,常常存在较大相关旁瓣以及宽的相关峰,造成 ± 1 级衍射效率低下,影响相关峰的探测。为解决这些问题,国内外学者提出了许多改进相关峰探测的方法^[9-11],如二值化功率谱、条纹调制、功率谱相减调制、相移相减等方法。近年来利用小波变换(WT)^[12-13]来提高相关峰探测也取得一定的效果,能有效提取出图像边缘特征同时抑制噪声。但图像边缘和噪声都属于高频信号,混杂在一起,因此在抑制噪声的同时不可避免地会丢失细节边缘。

这里采用 Canny 算法^[14-16]提取更加丰富、连续、明显的图像边缘作为联合输入图像,以提高相关峰的探测能力。首先 Canny 算法选取高斯函数来滤波去噪,二维高斯滤波函数如下:

$$G(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2}\right), \quad (7)$$

式中 δ 代表高斯滤波卷积核的宽度。因此图像在 x 和 y 方向上的偏微分方程可以表示为

$$E_x = \frac{\partial G(x, y)}{\partial x} \cdot f(x, y), \quad (8)$$

$$E_y = \frac{\partial G(x, y)}{\partial y} \cdot f(x, y), \quad (9)$$

式中 $f(x, y)$ 表示目标图像 $t(x, y)$ 。因此,图像梯度的幅值和方向分别为

$$M(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}, \quad (10)$$

$$\theta(i, j) = \arctan\left[\frac{E_y(i, j)}{E_x(i, j)}\right]. \quad (11)$$

式中 $M(i, j)$ 代表图像边缘的幅值大小, $\theta(i, j)$ 代表最大幅值的方向。

接下来对梯度幅值进行非极大值抑制,确定候选边缘点。首先需要确定高低阈值的大小。采用灰度直方图自适应地获取最佳阈值。设图像中总像素为 N ,灰度级范围为 $[0, L - 1]$,灰度级 i 对应的像素为 N_i ,其概率为

$$p_i = N_i / N, \quad (12)$$

式中 $i = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ 。非边缘点的灰度值由在 $[0, T]$ 之间的像素组成,边缘点的灰度值由在 $[T + 1, L - 1]$ 之间的像素组成,则非边缘点与边缘点的灰度均值分别可表示为

$$u_b(T) = \frac{\sum_{i=0}^T i \cdot p_i}{[\omega_b(T)]}, \quad (13)$$

$$u_o(T) = \frac{\sum_{i=T+1}^{L-1} i \cdot p_i}{[\omega_o(T)]}, \quad (14)$$

式中 $\omega_b(T) = \sum_{i=0}^T p_i$ 代表非边缘点概率, $\omega_o(T) = \sum_{i=T+1}^{L-1} p_i$ 代表边缘点概率,且 $\omega_b(T) + \omega_o(T) = 1$ 。图像总灰度均值定义为

$$u = u_b(T)\omega_b(T) + u_o(T)\omega_o(T). \quad (15)$$

则边缘与非边缘两类像素的类间方差定义为

$$\sigma^2(T) = \omega_b(T)[u_b(T) - u]^2 + \omega_o(T)[u_o(T) - u]^2. \quad (16)$$

让 T 在 $[0, L - 1]$ 范围内依次取值,使 $\sigma^2(T)$ 最大的 T 值即为最佳高阈值 T_h 。

由上面的公式可知,在两类像素点的交界处,灰度往往变化非常剧烈,此时的灰度值可以认为是最佳分割阈值。方差代表了图像像素灰度分布均匀性。如果等式中方差大,说明图像的分布不均匀,图像中的目标和背景的差别就大。如果有一部分目标被分割到背景中或者说一部分背景被分割到目标中,方差就会变小,所以使用这种方法错分的概率较小。

根据经验一般取低阈值 $T_1 = 0.4T_h \sim 0.5T_h$,这里取 $T_1 = 0.4T_h$,因此得到双阈值 T_h 和 T_1 。分别

应用两个阈值可以探测到两个边缘特征图像 $f_H(x, y)$ 与 $f_L(x, y)$, 凡是边缘强度高于高阈值 T_H 则定为边缘点, 边缘强度小于低阈值 T_L 则置为 0, 不是边缘点, 如果边缘强度大于 T_L 又小于 T_H , 则通过判断这个像素 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 的邻域内有无高于 T_H 的边缘点, 如果有则把此点当作边缘点, 否则就不是边缘点。最后把所有检测到的边缘点连接形成边缘特征图像。

为了验证该方法提高相关峰的有效性, 进行了计算机模拟。图 2(a) 是复杂背景下输入的联合图

像, 大小为 $512 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 图 2(b) 是未经过处理的三维(3D)相关峰, 可以看出相关峰淹没在噪声中基本探测不到。

图 3 和图 4 分别给出了小波变换边缘特征提取和 Canny 算法边缘特征提取的相关峰输出。与图 2 和图 3 比较, 很明显可以看出, 图 4 中 Canny 算法可以提取更加连续清晰的图像边缘, 因此可以探测到更尖锐的相关峰值, 而且其相关峰值也明显提高, 为未处理前的 22 倍, 噪声和相关旁瓣也得到明显的抑制。

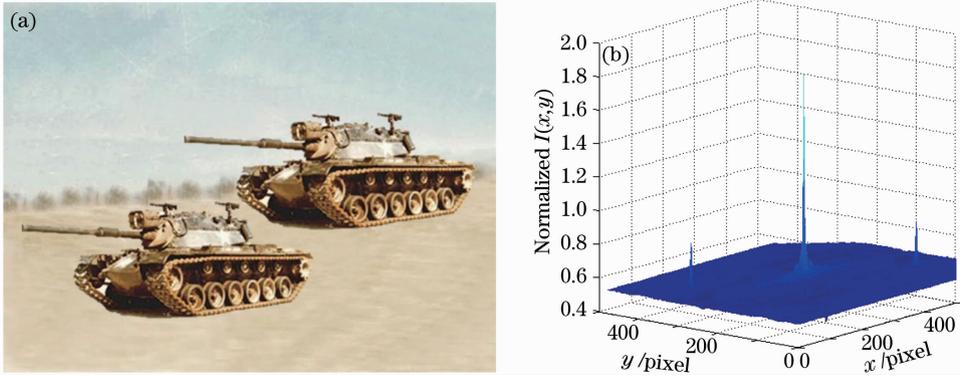


图 2 (a) 输入联合图像; (b) 未处理的相关峰

Fig. 2 (a) Input joint tank image; (b) unprocessed correlation output

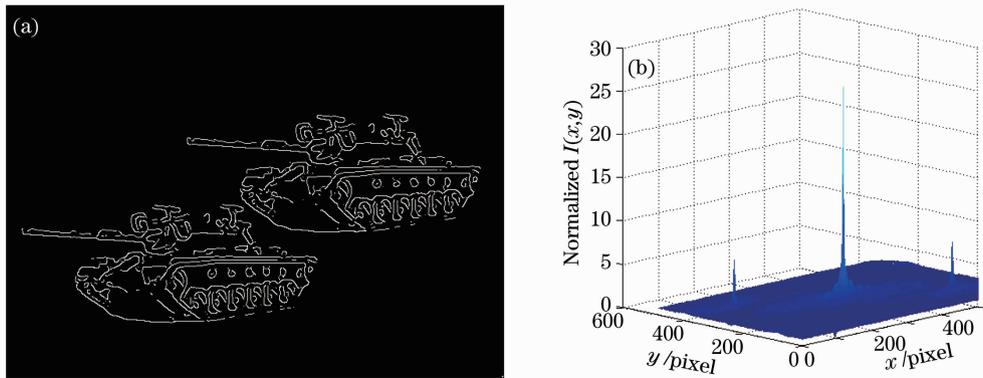


图 3 (a) 小波边缘特征提取图像; (b) 小波处理相关峰

Fig. 3 (a) Enhanced image edge extracted by WT; (b) 3D correlation output by WT processing

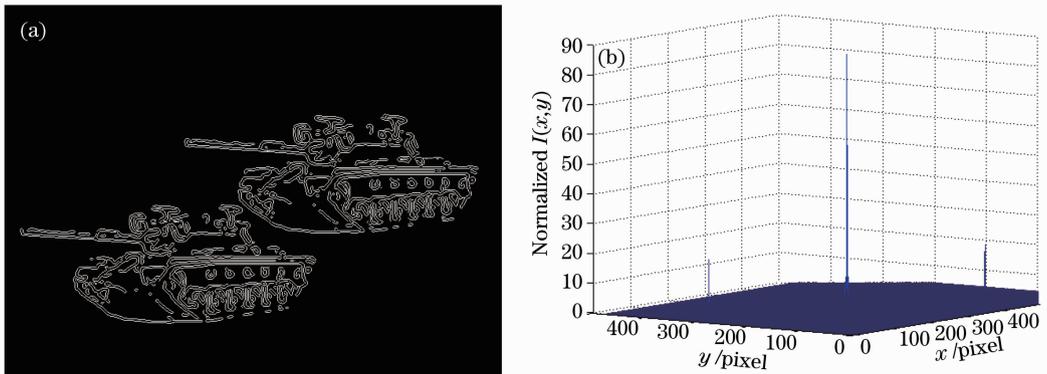


图 4 (a) Canny 算法边缘特征提取图像; (b) 经 Canny 算法处理的相关峰

Fig. 4 (a) Edge extracted by our proposed scheme; (b) 3D correlation output by our proposed scheme

为了验证 JTC 的抗噪性及运动位移的测量精度,建立了光电混合联合变换相关测试装置,如图 5 所示。主要由 640 pixel×480 pixel 的 SLM、平方律探测器 CCD、632 nm 的氦氖激光器、激光准直系统、焦距 $f' = 300$ mm 的傅里叶变换透镜以及处理器组成。实验中增加的载荷对遥感是一个很大的问题。而当该系统要用到实际中时,必须小型化、轻量化,实际尺寸可控制在 180 mm×80 mm×50 mm 以内,重量小于 0.5 kg。因此,实际上该系统不会存在增加的载荷过大问题。



图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

实验中将一幅遥感图像作为原始参考图像,如图 6 所示。实际中短曝光的高速 CCD 获取的序列图像不可避免地导致低信噪比。为了模拟不同噪声大小的图像,首先在输入图像中加入高斯白噪声,噪声方差 ϵ 分别为 1~40,间隔为 1,模拟出 40 幅不同噪声的图像。另外为了分析图像运动位移的测量精度,提前将输入图像引入已知大小的像移。与参考图像相比,分别引入 1~40 pixel 大小的位移,像移大小间隔为 1 pixel,形成 40 幅不同像移的图像。



图 6 参考图像

Fig. 6 Reference image

渐增多,这对提高相关峰探测精度是有利的,但当输入图像的尺寸越来越大时处理的时间也大大增加,没能更好地体现光学相关探测的优势。为了减少处理时间,实际上只提取遥感图像中的子图像作为原始图像,如图 6 中标出的小方框。经过 32 pixel×32 pixel,64 pixel×64 pixel,128 pixel×128 pixel,256 pixel×256 pixel 不同子图像的比较,最终在测量速度和精度都满足的条件下选择 128 pixel×128 pixel 大小的子图像^[17]。

首先利用先前模拟制作好的噪声图像和原始图像形成联合图像输入到实验中的 SLM 中,经过 JTC 系统及坐标提取处理,得到不同噪声条件下的位移测量精度曲线,如图 7 所示,在噪声方差 ϵ 小于 30 时,位移测量误差可以小于 0.08 pixel,结果表明系统具有较好的抗噪能力。同样,将具有位移的图像和原始图像形成联合图像输入到 SLM 中,获得了不同位移条件下的测量误差曲线如图 8 所示,在位移小于 40 pixel 的范围内,测量误差小于 0.1 pixel。图 9 给出了不同像移条件下的相关峰值,可以看出随着像移的增大,相关峰明显降低,主要原因是随着像移(或噪声)的增大,两幅图像相关性降低。图 10

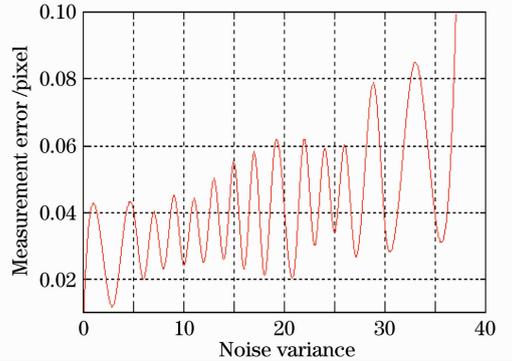


图 7 噪声下的位移测量误差

Fig. 7 Measurement error under noise

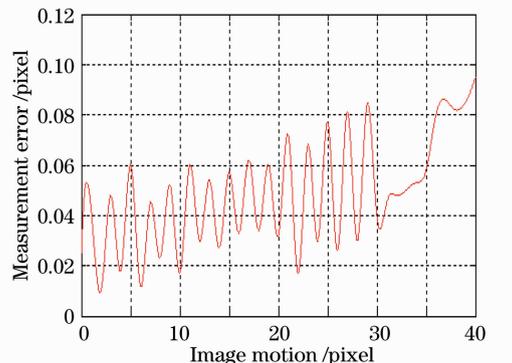


图 8 不同像移下的位移测量误差

Fig. 8 Measurement error of different image motions

随着图像尺寸的增加,功率谱记录的信息量逐

给出了在噪声方差为 40、像移为 30 pixel 条件下的相关峰实验探测结果。实验表明,即使在一定的噪声和像移条件下,该系统也能有效地探测较明显的相关峰。另外,光学相关探测图像运动位移的精度对图像具体的结构特点(房屋、森林或公路等)不敏感,探测精度几乎不随景物内容而改变^[18-19]。

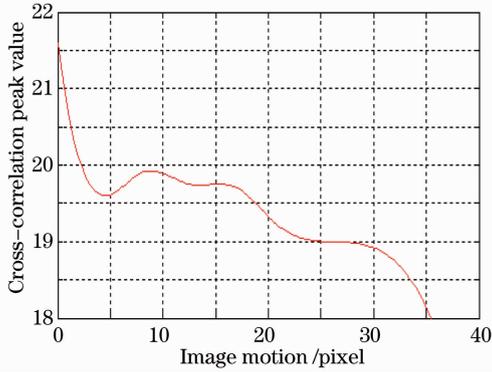


图 9 不同像移下的归一化相关峰值曲线

Fig. 9 Normalized cross-correlation peak value under different image motions

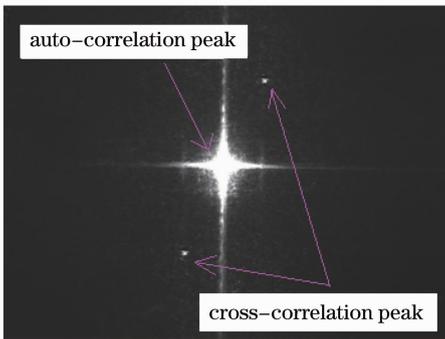


图 10 相关峰图像

Fig. 10 Correlation peak

4 结 论

提出基于光学相关的双 CCD 成像系统的图像运动测量方法,在主成像系统曝光成像的同时,辅助高速 CCD 获取同一目标的图像序列,利用联合变换相关方法对所采集的图像序列进行光学运算,测量出相邻图像序列的运动位移。通过提高图像边缘特征提取能力,明显提高相关峰探测性能。实验表明 JTC 系统有较强的抗噪能力,且图像位移探测误差小于 0.1 pixel,可以满足卫星遥感测量精度要求。

参 考 文 献

1 G Hochman, Y Yitzhaky, N S Kopeika. Restoration of images captured by a staggered time delay and integration camera in the presence of mechanical vibrations[J]. Appl Opt, 2004, 43(22): 4345-4354.

2 B Golik, D Wueller. Measurement method for image stabilizing systems[C]. SPIE, 2007, 6502: 650200.

3 Boris Likhterov, N S Kopeika. Motion-blurred image restoration using modified inverse all-pole filters[C]. SPIE, 2002, 4790: 56-62.

4 V Loyev, Y Yitzhaky. Initialization of iterative parametric algorithms for blind deconvolution of motion-blurred images[J]. Appl Opt, 2006, 45(11): 2444-2452.

5 H Choi, J Kim, M Song, *et al.*. Effects of motion of an imaging system and optical image stabilizer on the modulation transfer function[J]. Opt Express, 2008, 16(25): 21132-21141.

6 C W Chiu, P C P Chao, D Y Wu. Optimal design of magnetically actuated optical image stabilizer mechanism for cameras in mobile phones via genetic algorithm[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(6): 2582-2584.

7 J F Barrera, C Vargas, M Tebaldi, *et al.*. Known-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system[J]. Opt Lett, 2010, 35(21): 3553-3555.

8 Y Qian, Y Li, J Shao, *et al.*. Real-time image stabilization for arbitrary motion blurred image based on opto-electronic hybrid joint transform correlator[J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10762-10769.

9 J Widjaja. Wavelet filter for improving detection performance of compression-based joint transform correlator[J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 5768-5777.

10 A Bal, A M El-Saba, M S Alam. Improved fingerprint identification with supervised filtering enhancement[J]. Appl Opt, 2005, 44(5): 647-654.

11 M S Alam, M A Karim. Fringe-adjusted joint transform correlation[J]. Appl Opt, 1993, 32(23): 4344-4351.

12 F Lei, M Iton, T Yatagai. Adaptive binary joint transform correlator for image recognition[J]. Appl Opt, 2002, 41(35): 7416-7422.

13 B Y Soon, M S Alam, M A Karim. Improved feature extraction by use of a joint wavelet transform correlator[J]. Appl Opt, 1998, 37(5): 821-827.

14 Y S Cheng, H C Chen. Projection-invariant pattern recognition with logarithmic harmonic function and wavelet transform[J]. Appl Opt, 2001, 40(26): 4661-4666.

15 J Canny. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on PAMI, 1986, 8(6): 679-698.

16 Pengcheng Wen, Xiangjun Wang, Hong Wei. Modified level set method with Canny operator for image noise removal[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(12): 1127-1130.

17 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.*. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712006.

樊超,李英才,傅洪亮,等.光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J].光学学报,2011,31(7):0712006.

18 Yi Hongwei, Zhao Hui, Wen Desheng, *et al.*. Static simulation experiment of image motion measurement based on optical joint transform correlator[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3471-3475.

易红伟,赵惠,汶德胜,等.联合变换相关器像移测量静态仿真实验分析[J].光学学报,2010,30(12):3471-3475.

19 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.*. Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1028002.

樊超,李英才,傅洪亮,等.离焦对光学相关法测量空间相机像移精度的影响[J].光学学报,2011,31(10):1028002.