

高精度光电混合联合变换相关的亚像素像移测量

洪雪婷^{1,2} 钱义先^{1,2}

¹浙江师范大学数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004

²浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004

摘要 为更精确测量出卫星遥感相机因姿态变化和振动等原因引起的亚像素像移,提出了基于光电混合联合变换相关的像移测量方法。该方法通过对采集到的图像序列做光学相关运算,并对联合功率谱做拉普拉斯变换,得到尖锐的相关峰,再用质心法获取相关峰的坐标信息,从而测得更精确的图像像移值。阐述了基于光电混合联合变换相关的图像像移测量原理,搭建了相应的光学实验装置。实验结果表明,该方法的像移测量误差低至0.03 pixel,大大提高了图像像移的测量精度。

关键词 测量;傅里叶光学;像移测量;光学相关器;拉普拉斯变换

中图分类号 TP751.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0212001

High-Accuracy Measurement of Sub-Pixel Image Motion Based on Hybrid Photoelectirc Joint Transform Correlator

Hong Xueting^{1,2} Qian Yixian^{1,2}

¹College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

²Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology in Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract To measure the sub-pixel image motion which is caused by satellite attitude instability and vibration, an effective approach to measure image motion is presented based on Hybrid Photoelectirc joint transform correlator. Firstly, captured image sequences are optically calculated by joint transform correlator, then the acquired joint power spectrum is processed by Laplace transform, an improved correlation peak is obtained. Lastly, a modified centroid algorithm is proposed to get more accurate motion measurement. Motion measurement based on optical correlation is discussed, and the optical experimental system is also set up. The experimental results show that the measurement error is as low as 0.03 pixel, the accuracy is improved greatly.

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

OCIS codes 120.0280; 070.4550; 100.3008; 280.4788

1 引 言

卫星遥感技术是正在飞速发展的高新技术,通过它获得的高分辨率图像源源不断地向人们提供大量的科学数据和动态信息。但是由于遥感相机是搭载在高速运动的卫星上对地面获取目标物体成像的,成像器件与目标物体之间往往存在相对运动,这就造成单个物点在图像传感器[光电耦合器件(CCD)]靶面上成像瞬间会在若干个图像像素上扩散,此时得到的目标是被运动模糊后的图像。国内外学者对稳定图像的方法作

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(61377014)、浙江省自然科学基金(LY12F05001)

作者简介: 洪雪婷(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学相关探测处理方面的研究。E-mail: hongxueting@sina.com

导师简介: 钱义先(1974—),男,博士,副教授,主要从事航空航天光学遥感、光信息处理、图像复原等方面的研究。

E-mail: qiannyixian@zjnu.edu.cn(通信联系人)

了很多研究,主要可以分为两大类:第一类是数字图像稳定^[1-2],还有一类就是通过硬件的光学稳定方法^[3-4]。无论是数字稳像还是光学稳像,图像运动像移的测量都是稳像的最关键步骤,但是这些稳像方法大多都存在运算量大或测量精度低的缺陷。因此本文提出基于光电混合联合变换相关的像移测量方法^[5],这种像移测量方法充分利用了联合变换相关器(JTC)的光速、大容量、并行处理等优点,又结合了数字处理可编程、灵活的特点,该方法通过对采集到的图像序列做光学相关运算,再对联合功率谱做拉普拉斯变换得到尖锐的相关峰,最后采用质心法从相关峰的位置信息中获得像移值,对提出的方法进行了数值模拟,同时建立了光电混合联合变换相关实验装置。实验结果表明,该方法大大提高了图像像移的测量精度。

2 光电混合联合变换相关器测量像移原理

2.1 光学相关探测

图1是光电混合联合变换相关器^[6-11]的原理图,系统中采用He-Ne激光器(波长632.8 nm)作为光源,通过衰减片调制、显微物镜聚焦、针孔空间滤波,最后经双分离准直透镜形成均匀的准直扩束平行光。高速CCD1实时拍摄一组运动目标的图像序列,在计算机1(PC1)中以前一帧作为参考图像,下一帧作为目标图像制作成联合图像并输入空间光调制器(SLM)中显示。联合图像经平行光照射作光学相关运算,其中CCD2用来采集联合功率谱,PC2用来将功率谱输入SLM作二次傅里叶变换,最后还是由CCD2获取相关峰。

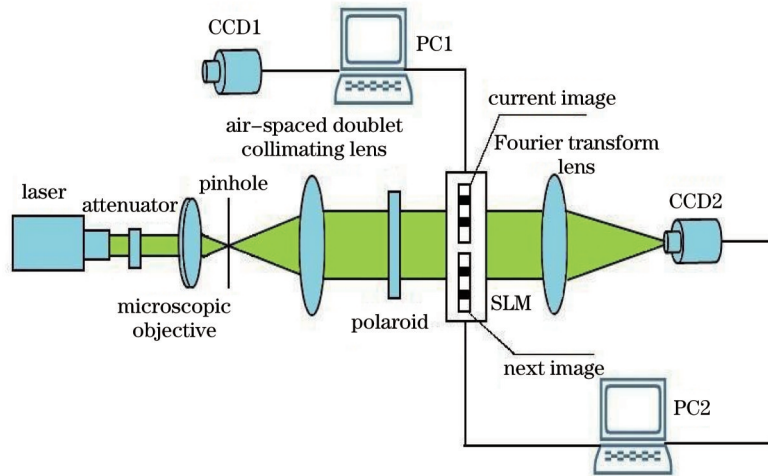


图1 光电混合联合变换相关原理图

Fig.1 Schematic diagram of hybrid photoelectric JTC

设输入到空间光调制器中的第一帧和下一帧图像为 $f_i(x,y)$ 和 $f_{i+1}(x,y)$, 中心分别位于 $(-a,-b)$ 和 (a,b) , 其中两帧图像之间有 $\Delta x, \Delta y$ 的像移, 它们的联合图像可以表示为

$$S(x,y) = f_i(x+a,y+b) + f_{i+1}(x-a-\Delta x,y-\Delta y-b). \quad (1)$$

将联合图像输入光电混合联合变换相关器中作光学相关运算, 得到相关输出 $c(x,y)$, 可表示为

$$c(x,y) = f_i(x,y) \otimes f_i(x,y) + f_{i+1}(x,y) \otimes f_{i+1}(x,y) + f_i(x,y) \otimes f_{i+1}(x,y) \otimes \sigma(x+2a+\Delta x,y+2b+\Delta y) + f_{i+1}(x,y) \otimes f_i(x,y) \otimes \sigma(x-2a-\Delta x,y-2b-\Delta y). \quad (2)$$

式中 \otimes 代表相关操作, 前两项是自相关项(零级衍射项), 不是所要探测的信息。后面两项是互相关项(正负一级衍射项), 正是所需的相关输出信息, 其位置信息中包含了图像像移值 Δx 和 Δy 。

然而由于输入图像对比度和信噪比低以及复杂的背景等因素, 往往探测不到相关峰, 并存在较大的旁瓣。为改善这种状况, 国内外专家提出了很多方法来改进相关峰, 有处理物面联合图像的方法, 如数学形态学、边缘检测、中值滤波等方法^[12-14]; 还有处理联合功率谱面的方法, 如条纹调制、二值化功率谱、功率谱相减等方法^[15-17]。由于目标是复杂的遥感图像, 因此采用对功率谱面做拉普拉斯变换^[18]的方法来提高相关峰的探测能力, 进而提高测量精度。联合变换功率谱的拉普拉斯变换就是利用拉普拉斯算子对联合功率谱进行二次微分处理。

对于输入的联合功率谱 $S'(u,v)$ 做拉普拉斯变换可表示为

$$\nabla^2 S' = \frac{\partial^2 S'}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 S'}{\partial v^2}. \quad (3)$$

其中一阶偏导数近似式为

$$\frac{\partial S'(u,v)}{\partial u} = \Delta_u S'(u,v) = S'(u,v) - S'(u-1,v), \quad (4)$$

$$\frac{\partial S'(u,v)}{\partial v} = \Delta_v S'(u,v) = S'(u,v) - S'(u,v-1), \quad (5)$$

其二阶偏导数的近似式为

$$\frac{\partial^2 S'(u,v)}{\partial u^2} = \Delta_u S'(u+1,v) - \Delta_u S'(u,v) = S'(u+1,v) + S'(u-1,v) - 2S'(u,v), \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 S'(u,v)}{\partial v^2} = \Delta_v S'(u,v+1) - \Delta_v S'(u,v) = S'(u,v+1) + S'(u,v-1) - 2S'(u,v). \quad (7)$$

则联合功率谱的拉普拉斯变换可以表示为

$$\nabla^2 S' = \frac{\partial^2 S'}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 S'}{\partial v^2} = S'(u-1,v) + S'(u+1,v) + S'(u,v-1) + S'(u,v+1) - 4S'(u,v). \quad (8)$$

此时功率谱中非边缘处振幅不变和线性变化的区域都滤除,得到微分后的功率谱。边缘增强图像 $G(u,v)$ 是微分功率谱与原功率谱的叠加:

$$G(u,v) = S'(u,v) - \nabla^2 S'(u,v). \quad (9)$$

联合功率谱经过拉普拉斯变换能提高功率谱中的高频成分,丰富其杨氏条纹结构,有效地增加联合功率谱杨氏条纹的对比度,最终得到尖锐的相关峰。

2.2 图像运动测量

接下来将参考图像和目标图像均为第一帧图像 $f_i(x,y)$ 作为联合图像输入到 SLM 中,根据相关输出图像,确定理想互相关峰的像素位置为 (x,y) ,其灰度值为 $I(x,y)$ 。然后在该中心位置周围取 $M \times N$ 的领域 ($M=10, N=10$)。根据质心法得到互相关峰的理想无运动位移的像素坐标 $(x_{\text{ideal}}, y_{\text{ideal}})$:

$$x_{\text{ideal}} = \frac{\sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} I(x+k, y+l) \times (x+k)}{\sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} I(x+k, y+l)}, \quad (10)$$

$$y_{\text{ideal}} = \frac{\sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} I(x+k, y+l) \times (y+l)}{\sum_{k=-M}^{k=M} \sum_{l=-N}^{l=N} I(x+k, y+l)}, \quad (11)$$

然后将有像移差的参考图像 $f_i(x+a, y+b)$ 和目标图像 $f_{i+1}(x-a-\Delta x, y-b-\Delta y)$ 同样地制作成联合图像输入 SLM 中,得到实际有相对位移的相关峰位置坐标 $(x_{\text{practical}}, y_{\text{practical}})$,则相邻两帧相关峰坐标相减得到运动图像相对位移值 $(\Delta x, \Delta y)$:

$$\Delta x = x_{\text{practical}} - x_{\text{ideal}}, \quad (12)$$

$$\Delta y = y_{\text{practical}} - y_{\text{ideal}}. \quad (13)$$

3 模拟和实验

为验证光学联合变换相关器测量图像位移的可行性和精度,首先进行了计算机模拟。将图 2 所示的飞机联合图像作为输入图像,做光学相关运算,得到相关输出。图 3 和图 4 分别给出了联合功率谱未经处理和经拉普拉斯处理的相关峰输出。比较图 3 和图 4,很明显可以看出,图 4 中联合功率谱经过拉普拉斯变换处理后得到的相关峰强度明显提高了,处理后的相关峰强度是未处理前的 8 倍。

为验证本文方法能有效提高图像像移的测量精度,搭建了光学实验装置,如图 5 所示。首先将实际拍



图2 输入的联合图像
Fig.2 Input joint image

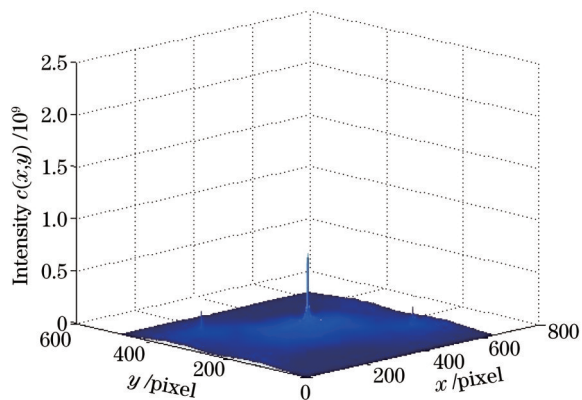


图3 未处理的相关峰
Fig.3 Unprocessed correlation output

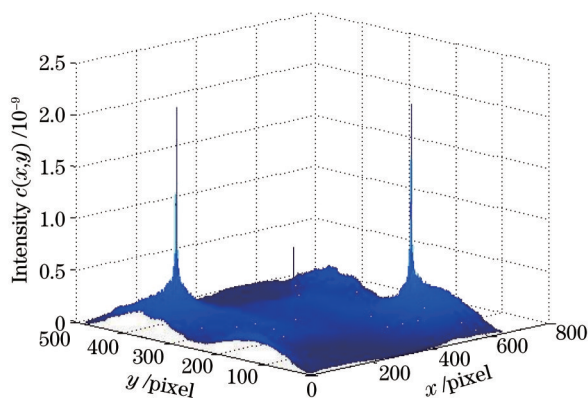


图4 拉普拉斯处理后的相关峰
Fig.4 Correlation output by Laplace processing

摄得到的一幅遥感图像作为参考图像,如图6所示。为满足测量速度和精度,选128 pixel×128 pixel大小的子图像。设遥感图像左下角第一个像素为起始坐标点[1,1],取[1:128;1:128]范围像素作为 t_0 时刻的参考图像,用线性插值法取 $[\Delta x:128 + \Delta x; \Delta y:128 + \Delta y]$ 范围内的像素作为下一时刻 $t_0 + \Delta t$ 的目标图像,其中 Δx 和 Δy 分别是经过 Δt 时间后高速摄像机所摄相邻两帧图像的像移值。按照此方法引入与参考图像位移差分别为1~39 pixel的序列图像,其中相邻图像序列像移间隔为1 pixel,形成39帧图像序列。



图5 实验装置
Fig.5 Experimental setup

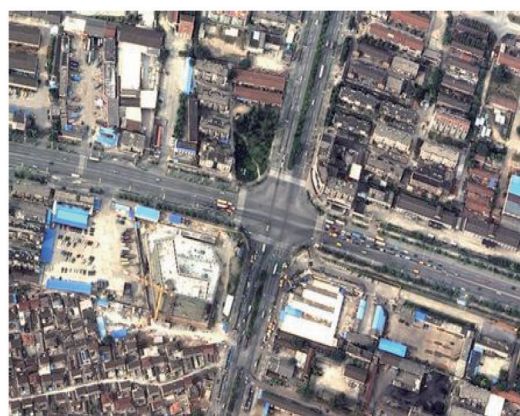


图6 遥感图像
Fig.6 Remote sensing image

然后将无像移联合图像(参考图像本身组成的联合图像)送入实验装置中,获得的相关峰如图7所示。可以看出由于图像信噪比低、图像本身模糊等原因探测不到明显的相关峰。此时对联合功率谱作拉普拉斯

变换,图8就是功率谱处理后得到的相关峰,与未处理的相关峰相比,显然功率谱经拉普拉斯变换后能得到明显的相关峰。

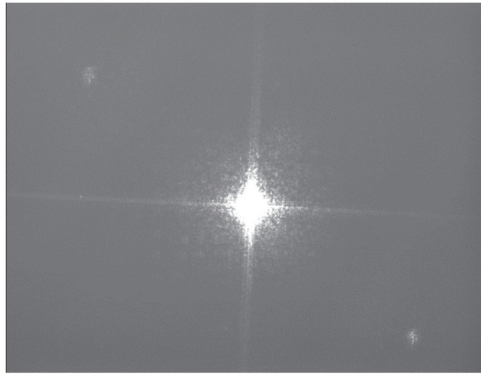


图7 未处理功率谱的相关峰

Fig.7 Unprocessed correlation output of the power spectrum

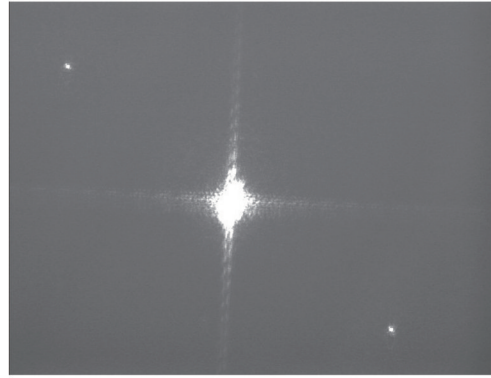


图8 拉普拉斯处理后的相关峰

Fig.8 Correlation output by Laplace processing

接着将上述产生的39帧序列图中相邻两帧图像制作成联合图像输入SLM中,获得相邻两帧图像(每帧相差1 pixel)的像移测量误差曲线。为进一步说明本文提出方法的测量精度,依照此方法产生了两组35帧序列(一组序列相邻两帧相差2 pixel,另一组序列相邻两帧相差3 pixel)将这些序列图与参考图像制作成联合图像输入SLM中,分别获得每两帧相差2 pixel、3 pixel的像移测量误差曲线。图9(a)是相邻两帧功率谱未做拉普拉斯变换得到的像移测量误差图,图9(b)是相邻两帧功率谱经过拉普拉斯变换得到的像移测量误差图。图10和图11分别是相差2 pixel和3 pixel的像移测量误差曲线。

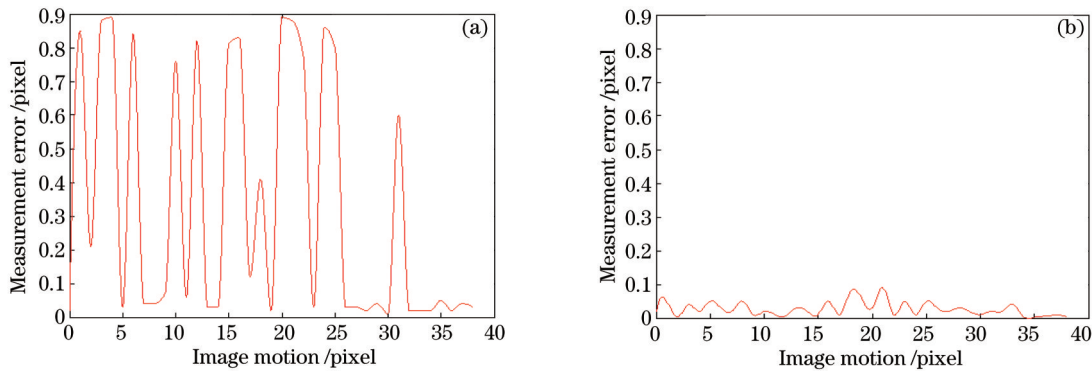


图9 (a)未处理功率谱的像移测量误差(1 pixel);(b)处理功率谱后的像移测量误差(1 pixel)

Fig.9 (a) Unprocessed image motion measurement error (1 pixel); (b) image motion measurement error by Laplace processing (1 pixel)

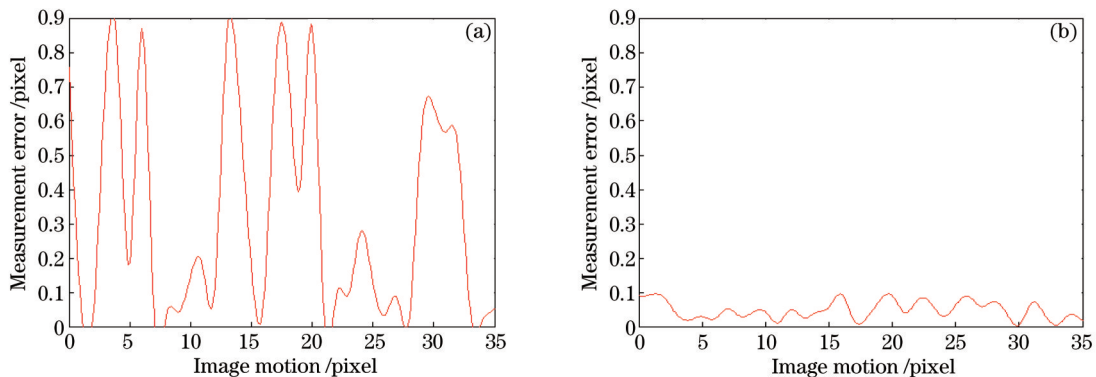


图10 (a)未处理功率谱的像移测量误差(2 pixel);(b)处理功率谱后的像移测量误差(2 pixel)

Fig.10 (a) Unprocessed image motion measurement error (2 pixel); (b) image motion measurement error by Laplace processing (2 pixel)

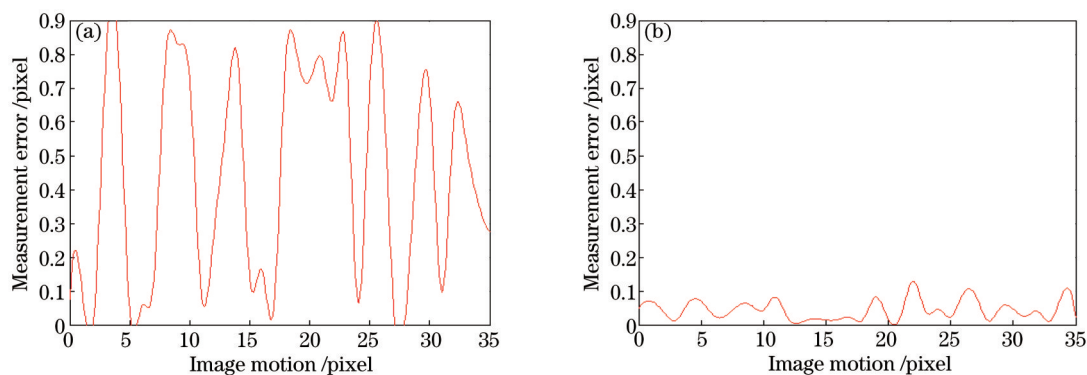


图 11 (a)未处理功率谱的像移测量误差(3 pixel);(b)处理功率谱后的像移测量误差 (3 pixel)

Fig.11 (a) Unprocessed image motion measurement error (3 pixel); (b) image motion measurement error by Laplace processing (3 pixel)

由图 11 结果得知相邻两帧图像相差 1 pixel 的功率谱未经处理的像移测量误差均值约 0.33 pixel,而功率谱做拉普拉斯变换处理后的像移测量误差均值约 0.03 pixel。相邻两帧图像像移差为 2 pixel 的功率谱未经处理的像移测量误差均值为 0.4 pixel,功率谱作拉普拉斯变换处理后的像移测量误差均值约为 0.04 pixel。相邻两帧图像像移差为 3 pixel 的功率谱未经处理的像移测量误差均值为 0.45 pixel,功率谱作拉普拉斯变换处理后的像移测量误差均值约为 0.047 pixel。可以看出,功率谱未经拉普拉斯变换的像移测量误差都能控制在 0.9 pixel 内,而经过拉普拉斯变换处理的像移测量误差则能有效地控制在 0.1 pixel 内。目前图像像移测量的精度均值普遍在 10^{-1} pixel 数量级内^[19-22],而本文方法不仅能光速计算运动图像的像移值,而且其测量精度均值能控制在 10^{-2} pixel 数量级内。以上论述均能表明,联合功率谱经过拉普拉斯变换得到的尖锐相关峰能大大提高图像运动像移值的测量精度。

4 结 论

提出了光电混合联合变换相关的亚像元像移测量方法,利用联合变换相关的方法对图像序列进行光学相关运算,得到相邻图像序列的像移。通过对联合功率谱做拉普拉斯变换的方法,明显提高相关峰探测性能。实验结果表明,联合功率谱作拉普拉斯变换后得到的像移测量误差控制在 0.1 pixel 以内,相比于功率谱未经处理的像移测量误差控制在 0.9 pixel 以内,像移测量精度有大大地提高,充分满足空间相机对像移测量低于 0.2 pixel 的要求。

参 考 文 献

- 1 V Loyev, Y Yitzhaky. Initialization of iterative parametric algorithms for blind deconvolution of motion-blurred images [J]. Appl Opt, 2006, 45(11): 2444-2452.
- 2 B Likhterov, N S Kopeika. Motion-blurred image restoration using modified inverse all-pole filters [C]. SPIE, 2002, 4790: 56-62.
- 3 C W Chiu, P C 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Q Li, C Yang, J Q Zhang. Target acquisition performance in a cluttered environment [J]. Appl Opt, 2012, 51(31): 7668-7673.
- 7 J Widjaja. Noisy face recognition using compression-based joint wavelet-transform correlator [J]. Opt Commun, 2012, 285(6): 1029-1034.
- 8 J Widjaja. Detection performance of wavelet-based joint transform correlation [J]. Appl Opt, 2007, 46(34): 8278-8283.
- 9 P Kaewkasi, J Widjaja, J Uozumi. Effect of threshold on single-target detection by using modified amplitude-modulated joint transform correlator [J]. Opt Commun, 2007, 271(2): 48-58.
- 10 Yi Yao, Cao Liangcai, Zheng Tianxiang, *et al.*. High-speed and high-accuracy volume holographic optical correlator [J]. Chinese J

- Lasers, 2014, 41(2): 0209005.
易 瑶, 曹良才, 郑天祥, 等. 高速高精度体全息光学相关器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209005.
- 11 Guo Guangming. Research on large-scale face recognition using opto-electronic hybrid matched filtering correlator [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0809003.
郭广明. 光电混合匹配滤波相关器的大规模人脸识别研究[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809003.
- 12 J Debayle, J C Pinoli. Multiscale image filtering and segmentation by means of adaptive neighborhood mathematical morphology [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2005. 537-540.
- 13 F Y Shi, Yita Wu. Decomposition of binary morphological structuring elements based on genetic algorithms [J]. Computer Vision and Image Under Standing, 2005, 99(2): 291-302.
- 14 Lin Yuchi, Cui Yangping, Huang Yinguo. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 509-512.
林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘检测与目标识别方法研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 509-512.
- 15 J Widjaja. Wavelet filter for improving detection performance of compression-based joint transform correlator [J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 5768-5777.
- 16 A Bal, A M Elsaba, M S Alam. Improved fingerprint identification with supervised filtering enhancement [J]. Appl Opt, 2002, 41(35): 7416-7422.
- 17 Jin Ma, Tao Tian. Target tracking method based on joint transform correlation [J]. Appl Opt, 2012, 33(5): 904-908.
- 18 Feng Jihong, Jin Guofan, Wu Minxian, *et al.*. Joint transform correlator based on differential filtering [J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(3): 326-331.
冯继宏, 金国藩, 邬敏贤, 等. 基于微分滤波的联合变换相关[J]. 光学学报, 1995, 15(3): 326-331.
- 19 Yi Hongwei, Li Yingcai, He Tianbing, *et al.*. Sub-pixel image motion measurement of space camera based on JTC-CDMA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1635-1640.
易红伟, 李英才, 贺天兵, 等. 利用码分多址联合变换相关器实现亚像元像移测量[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1635-1640.
- 20 Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499.
孙 辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学 精密工程, 2013, 20(11): 2492-2499.
- 21 Dai Chaoyue, Ge Peng, Li Qi, *et al.*. Image displacement measurement using double phase-encoding joint transform correlator [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712004.
戴朝约, 葛 鹏, 李 奇, 等. 基于双相位编码联合变换相关器的图像位移探测算法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712004.
- 22 Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong, *et al.*. Space camera image motion measurement based on images from time delayed integration sensors overlapped area [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212001.
刘海秋, 徐抒岩, 王 栋, 等. 基于空间相机实际延迟积分传感器拼接区图像的像移测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212001.

栏目编辑: 何卓铭