

基于双相位编码联合变换相关器的图像位移探测算法

戴朝约 葛 鹏 李 奇* 冯华君 徐之海

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出了基于双相位编码联合变换相关器(JTC)的图像位移探测算法。随机产生一相位码对参考图像编码,与目标图像叠加作为输入图像,通过傅里叶变换得到联合功率谱,用同样的相位码对其编码并进行滤波,傅里叶逆变换后得到涉及位移矢量的互相关峰。给出了多帧图像间位移矢量的探测技术。相比传统的相关器探测技术,此算法能更有效地利用输入平面,将自相关项以噪声的形式散射在输出面,只保留一互相关项,有利于位移矢量的探测。比较了不同位移矢量探测技术,表明所提的技术更具有优势,均方根误差能够控制在 0.1 pixel 内。

关键词 图像处理;傅里叶光学;位移探测;联合变换相关器;双相位编码

中图分类号 TP751.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0712004

Image Displacement Measurement Using Double Phase-Encoding Joint Transform Correlator

Dai Chaoyue Ge Peng Li Qi Feng Huajun Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract An image displacement measurement technology based on double phase-encoding joint transform correlator (DPEJTC) is proposed. Firstly, a phase mask is generated electronically and applied to encode the reference image. The encoded reference image is overlaid with the target image to form the input image. Joint power spectrum (JPS) of the input image is obtained by a Fourier transform. Secondly, a filter is applied to JPS which is encoded by the same phase mask. After an inverse Fourier transform, a brightest peak in relation to the displacement between the reference and target image appears in the correlation plane. Displacement measurement of multiple images with this method is given. In comparison with the methods based on traditional joint transform correlator (JTC), this method can use the space of the input plane efficiently, disperse the auto-correlation item into system noises and remain the cross-correlation item only, which is convenient for detection. Comparing with different displacement measurement technologies, results show that our method takes edge over the other algorithms, and its root mean square errors (RMSE) can remain within 0.1 pixel.

Key words image processing; Fourier optics; displacement measurement; joint transform correlator; double phase-encoding

OCIS codes 120.1880; 100.0100; 070.0070

1 引 言

联合变换相关器(JTC)最初由 Weaver 等^[1]在 1966 年提出,随着电光转换设备空间光调制器(SLM)的高速发展,基于光学傅里叶变换的联合变换相关器被广泛应用于模式识别和运动目标跟踪等

方面。Tchernykh 等^[2~6]将联合变换相关器用于图像运动位移探测装置,应用在实时补偿运动位移和卫星导航等方面。易红伟等^[7,8]提出一种光电混合联合变换相关器,它的位移探测均方根误差能够控制在 0.05 pixel 以内。分析了联合变换相关器在欠

收稿日期: 2011-01-19; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724002)资助课题。

作者简介: 戴朝约(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学图像处理方面的研究。E-mail: timedcy@zju.edu.cn

导师简介: 冯华君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事成像工程与图像处理技术等方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liqi@zju.edu.cn

曝光情况下的探测情况,证明其对超低信噪比不敏感的特性^[9]。但在以上这些技术中,在输出面上产生一强度很大的直流项和一对互相关项,而直流分量通常有很大的旁瓣,会影响互相关峰的准确探测。这些直流分量的消除有不少办法^[10~14],但是这些方法都需要将空间光调制器上的参考图和目标图像隔离一段物理空间放置,因此不能有效地利用输入面的空间。

本文提出一种采用双相位编码联合变换相关器的图像位移探测技术。先用计算机产生一随机相位掩模板来对参考图像进行编码,将目标图像与其叠加后作为输入图像置于输入平面。输入面的空间利用率提高至少一倍,而输出面上直流分量也以噪声的形式分布于整个输出面,只留下一个互相关峰以利于自动探测。为了提高探测的精度,在联合功率谱上应用一种新的滤波器,互相关峰变得尖锐,提高了亚像素位移探测的精度。

2 位移矢量探测工作原理

2.1 双相位编码联合变换相关器探测两幅图像间的位移矢量原理

考虑一个在傅氏频域的随机相位函数 $\Phi(u, v)$, 定义相位掩模 $\Theta(u, v)$ 为

$$\Theta(u, v) = \exp[-j\Phi(u, v)], \quad (1)$$

$$\phi(x, y) = \mathcal{F}^{-1(2)}[\Theta(u, v)], \quad (2)$$

式中 $\Phi(u, v)$ 是在 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的傅氏频域随机相位函数, j 是虚数单位, $\mathcal{F}^{-1(2)}$ 为二维傅里叶逆变换算子。用 $\phi(x, y)$ 对参考图像 $r(x, y)$ 编码,

$$r''(x, y) = r(x, y) \otimes \phi(x, y). \quad (3)$$

因为目标图像对参考图像有移位 (x_i, y_i) , 目标图像可表示为 $t(x + x_i, y + y_i)$, 将相位编码后的目标图像和参考图像重叠组成输入图像, 输入图可表示为

$$f(x, y) = r''(x, y) + t(x + x_i, y + y_i), \quad (4)$$

其傅里叶变换频谱为

$$F(u, v) = \mathcal{F}^{(2)}[r''(x, y) + t(x + x_i, y + y_i)] = \mathcal{F}^{(2)}[r(x, y) \otimes \phi(x, y)] + \mathcal{F}^{(2)}[t(x + x_i, y + y_i)] = R(u, v)\Theta(u, v) + T(u, v)\exp(-jux_i - jvy_i), \quad (5)$$

平方后得到联合功率谱

$$S_{JP}(u, v) = F(u, v)^2 = R(u, v)^2 + T(u, v)^2 + R(u, v)\Theta(u, v)T(u, v)^* \exp(jux_i + jvy_i) + R(u, v)^* \Theta(u, v)^* T(u, v)\exp(-jux_i - jvy_i), \quad (6)$$

对联合功率谱(6)式乘上相位掩模 $\Theta(u, v)$ 得到相位编码联合功率谱(PJPS)

$$S_{PJP} = S_{JP}(u, v)\Theta(u, v) = R(u, v)^2\Theta(u, v) + T(u, v)^2\Theta(u, v) + R(u, v)\Theta^2(u, v)T(u, v)^* \exp(jux_i + jvy_i) + R(u, v)^* T(u, v)\exp(-jux_i - jvy_i), \quad (7)$$

最后对相位编码的联合功率谱求二维傅里叶逆变换, 得到相关输出项

$$c(x, y) = r \otimes r^* \otimes \phi + t \otimes t^* \otimes \phi + t^* \otimes \phi \otimes \phi^* \otimes r(x + x_i, y + y_i) + t(x - x_i, y - y_i) \otimes r^*, \quad (8)$$

式中, 前 3 项带有随机相位函数, 随机相位函数会将直流分量以噪声的形式散射到整个输出面, 只留下第 4 项互相关项, 得出位移矢量 (x_i, y_i) 。

有时相位掩模的大小相对输入图像不够大或者输入图像内容过于复杂, 随机相位掩模产生的噪声会影响互相关峰的探测, 另外互相关峰的旁瓣太宽, 因此在经典联合变换相关器中用 $H(u, v) = |R(u, v)|^{-2}$ 滤波来消除旁瓣干扰^[12, 15]。由于本方法中采用了双相位编码探测位移矢量, 参考图像与目标图像因为存在位移矢量并不完全一致, 采用经典的滤波器并不能完全消除互相关峰中的振幅系数使得相关输出呈现极好的单峰性, 因此滤波器需要做一定修改使最后结果的相关项中相关峰不被卷积滤波而扩散, 消除旁瓣干扰, 呈现极好的单峰性, 所以经过实验后提出采用如下滤波器,

$$H(u, v) = |R(u, v)|^{-1}. \quad (9)$$

(7)式两边乘以(9)式, 得到滤波后的联合功率谱为

$$S_{HPJP}(u, v) = \frac{1}{|R(u, v)|} R(u, v)^2 \Theta(u, v) + \frac{1}{|R(u, v)|} T(u, v)^2 \Theta(u, v) + \frac{1}{|R(u, v)|} R(u, v) \Theta^2(u, v) T(u, v)^* \exp(jux_i + jvy_i) + \frac{1}{|R(u, v)|} R(u, v)^* T(u, v) \exp(-jux_i - jvy_i), \quad (10)$$

式中, 等号右边部分只有第四项不存在随机相位项, 对(10)式进行傅里叶逆变换, 得到输出为

$$c(x, y) = \exp(j\varphi_x + j\varphi_y) \otimes r^* \otimes \phi + \exp(j\varphi_x + j\varphi_y) / r \otimes t \otimes t^* \otimes \phi + \exp(j\varphi_x + j\varphi_y) \otimes \phi \otimes \phi \otimes t^*(x + x_i, y + y_i) + \exp(j\varphi_x + j\varphi_y) \otimes t(x - x_i, y - y_i), \quad (11)$$

式中, $\exp(j\varphi_x + j\varphi_y)$ 为一相位项, 在接收面上强度为一单位值。采用(9)式的滤波项后, (11)式中的互相关峰将变得很尖锐, 噪声对相关峰的影响大大减小。

2.2 多帧图像位移同时探测原理

经典的联合变换相关器中参考图像和多张目标图像同时进行位移探测时, 输入 3 张参考图像和 3 张目标图像会在输出面上得到 36 个相关峰^[16]。要区分这些相关峰对应的各帧图像之间的位移关系是不容易的, 因此用双相位编码联合变换相关器来处理多帧图像同时探测位移的情况。这个过程和两张图的探测类似。4 幅图像同时探测的流程图如图 1 所示。

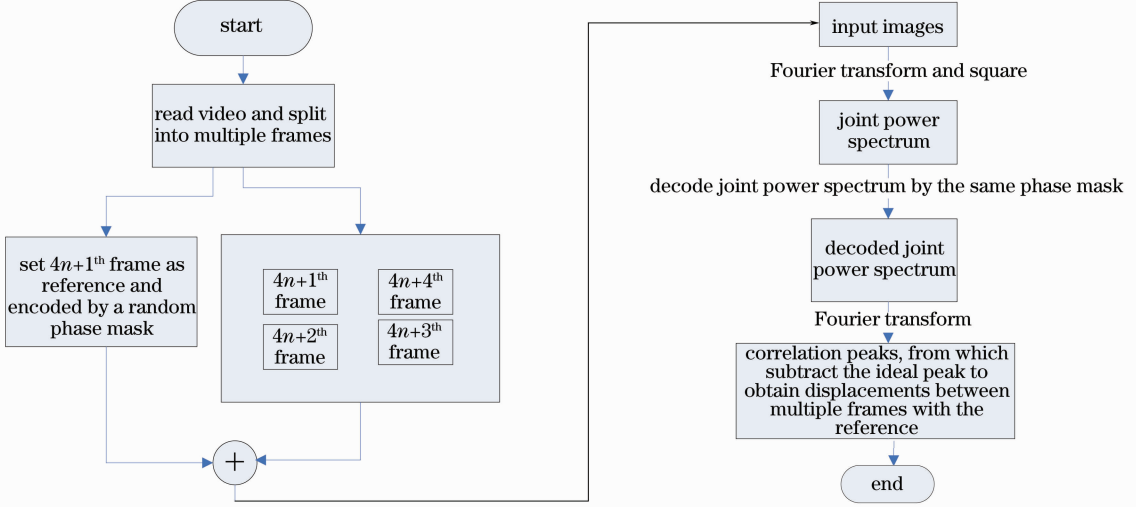


图 1 多幅图像位移探测的流程图

Fig. 1 Flow chart of displacement detection between multiple images

设多张图像为 $t(x, y) = \sum_{i=1}^n t_i(x, y)$, 这些目标图像分别放于输入面的 (a_i, b_i) 位置, 而各个目标图像中相对参考图像的位移矢量为 (x_i, y_i) , 那么(4)式变换为

$$f(x, y) = r''(x, y) + \sum_{i=1}^n t_i(x + a_i + x_i, y + b_i + y_i). \quad (12)$$

(5)式可变换为

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \mathcal{F}^{(2)} \left[r''(x, y) + \sum_{i=1}^n t(x + a_i + x_i, y + b_i + y_i) \right] = \\ &= \mathcal{F}^{(2)} [r(x, y) \otimes \phi(x, y)] + \\ &= \mathcal{F}^{(2)} \left[P \sum_{i=1}^n t(x + a_i + x_i, y + b_i + y_i) \right] = \\ &= R(u, v) \Theta(u, v) + \sum_{i=1}^n \{ T(u, v) \exp[-ju(x_i + a_i) - jv(y_i + b_i)] \}. \end{aligned} \quad (13)$$

相位编码的联合功率谱为

$$\begin{aligned} S_{\text{PIP}}(u, v) &= F(u, v)^2 \Theta(u, v) = R(u, v)^2 \Theta(u, v) + \sum_{i=1}^n T(u, v)^2 \Theta(u, v) + \\ &= R(u, v) \Theta(u, v) \Theta(u, v) \sum_{i=1}^n T(u, v)^* \exp[ju(x_i + a_i) + jv(y_i + b_i)] + \\ &= R(u, v)^* \sum_{i=1}^n T(u, v) \exp[-ju(x_i + a_i) - jv(y_i + b_i)] + \\ &= 2\Theta(u, v) \sum_{i=1}^{n-1} T(u, v) \exp[-ju(x_i + a_i) - jv(y_i + b_i)] \sum_{j=i+1}^n T(u, v)^* \exp[ju(x_j + a_j) + jv(y_j + b_j)]. \end{aligned} \quad (14)$$

(14)式两边乘以(9)式, 并进行傅里叶逆变换, 得到输出面:

$$\begin{aligned}
c(x, y) = & \exp(j\varphi_x + j\varphi_y) \otimes r^* \otimes \phi + \exp(j\varphi_x + j\varphi_y)/r \sum_{i=1}^n t_i \otimes t_i^* \otimes \phi + \\
& \exp(j\varphi_x + j\varphi_y)/r \otimes \varphi \otimes \sum_{i=1}^n t(x + x_i + a_i, y + y_i + b_i) \otimes \sum_{j=1}^n t^*(x - x_j - a_j, y - y_j - b_j) + \\
& \exp(-j\varphi_x - j\varphi_y) \otimes \sum_{i=1}^n t_i(x + x_i + a_i, y + y_i + b_i),
\end{aligned} \quad (15)$$

式中,前3项含有随机相位信息,以噪声形式散射于输出面,第四项含有目标图像和参考图像的位移关系,其每一个相关峰的位置对应每帧目标图像的位移矢量,利于计算机自动探测,且能有效地获取高精度位移矢量。

3 结果及分析

3.1 两幅图像间位移探测仿真实验

实验中用双相位编码联合变换相关器来探测两幅遥感图像间的位移矢量。图2(a)是参考图,图2(b)是目标图,它们的分辨率为256 pixel×256 pixel。采用Matlab软件的rand函数生成在 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的随机相位掩模,其大小为1024 pixel×1024 pixel。图2(c)是图2(a)参考图经过相位编码后的幅度图,将

目标图叠加上后得到输入图如图2(d)所示。

图2(e)和图2(f)分别是PJPS未滤波的相关峰的二维和三维图,图2(g)和图2(h)分别是在PJPS滤波后相关峰的二维和三维图。从图2(h)可以发现只存在一互相关峰,而其他分量都被散射到系统噪声中。此方法排除了直流分量及旁瓣和噪声的影响,互相关峰尖锐便于探测,也证明所提出的滤波函数对相位编码联合变换相关器的输出结果有很大的改善作用。

为了得到亚像素精度的位移矢量,找到相关峰的整数坐标位置,然后采用一个3×3邻域窗口对其进行二次插值^[17],实验中得到的位移矢量为(7.78, 4.03) pixel,而真实的位移矢量为(7.64, 4.08) pixel,误差为(0.14, -0.05) pixel。

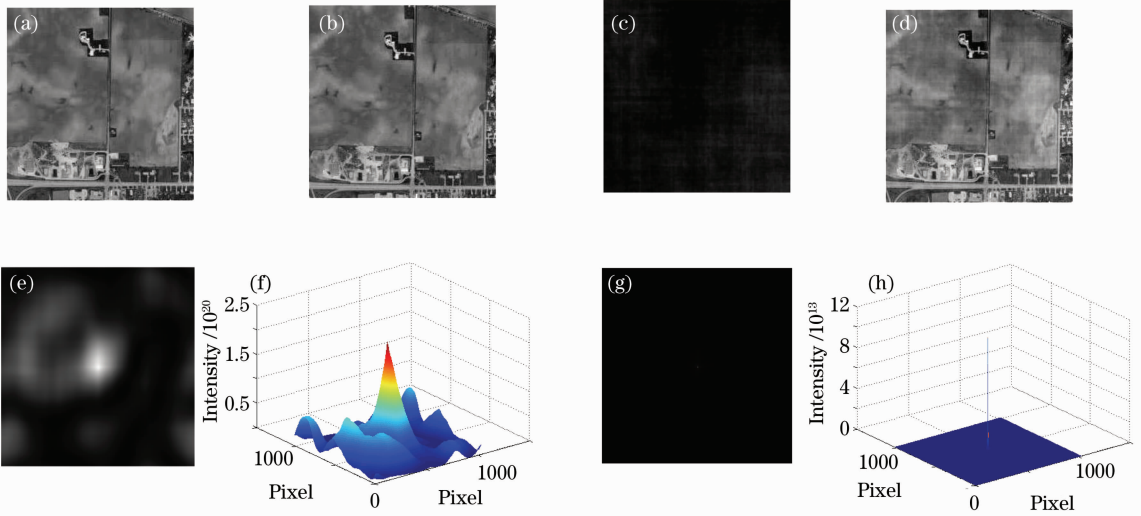


图2 对两幅图的实验结果

Fig. 2 Results of displacement measurement method of two targets

3.2 多帧图像位移同时探测仿真实验

图3是对多幅图像同时探测的实验结果,本文选取4幅图像同时探测,图3(a)是参考图像,图3(b)是4幅目标图像,它们被排列置于768 pixel×1024 pixel的黑色图像中央,图3(c)是图3(b)叠加有相位编码的参考图像的结果。图3(d)和图3(e)分别是PJPS未滤波的相关峰的二维和三维图,图3(f)和图3(g)分别是在

PJPS滤波后的相关峰的二维和三维图。图3(e)中的互相关峰被系统噪声覆盖且很弱,不利于精确探测。图3(g)可看到所加的滤波器使互相关峰非常明显,易于精确探测。相对参考图,4幅图的位移矢量分别为(7.73, 4.05) pixel, (-6.68, -0.96) pixel, (-4.51, 5.36) pixel, (4.00, -5.62) pixel,而它们真实的位移矢量分别为(7.64, 4.08) pixel, (-6.57, -1.02) pixel,

$(-4.50, 5.45)$ pixel, 和 $(4.02, -5.60)$ pixel, 其误差分别为 $(0.09, -0.03)$ pixel, $(-0.11, 0.06)$ pixel,

$(-0.01, -0.09)$ pixel, 和 $(-0.02, -0.02)$ pixel。

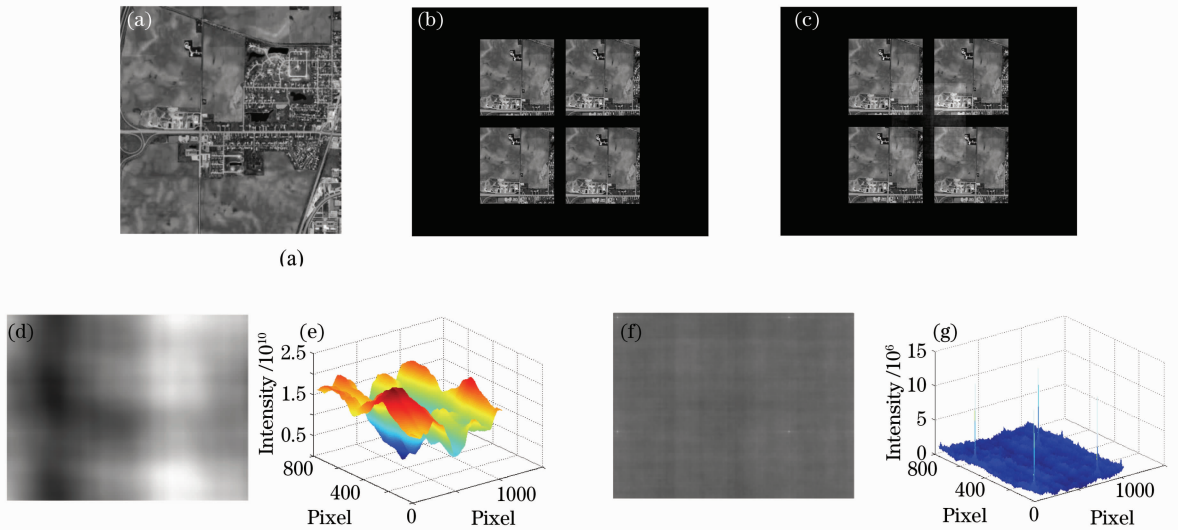


图 3 对多幅图的实验结果

Fig. 3 Results of multiple images

3.3 合成视频仿真实验

以一幅图像作为参考帧,随机产生 100 个位移矢量,根据位移矢量移动参考帧图像得到 100 frame 目标图像,再合成这 101 frame 图像为一段视频。将本方法与边缘调整光学联合变换相关器^[13]、相位相关^[18]、光流法^[19]和亚像素投影算法^[20]比较,对这段合成视频进行位移测量,每次计算相邻两帧图像之间的位移。图 4(a)和(b)分别是各方法对应的误

差,均方根误差、平均误差如表 1 所示,所提算法的均方根误差是 0.0072 和 0.0087,精度最高,可见所提出的算法比其他位移测量方法更具有优势。图 5 是用 4 幅目标图像同时探测的结果,采用多帧同时探测的方法在保持亚像素精度的同时又减少了探测时间,对这 101 frame 图像处理,多帧同时探测的时间从单幅图像探测时间 32.26 s 降至 8.86 s,大大提高了算法的实时性。

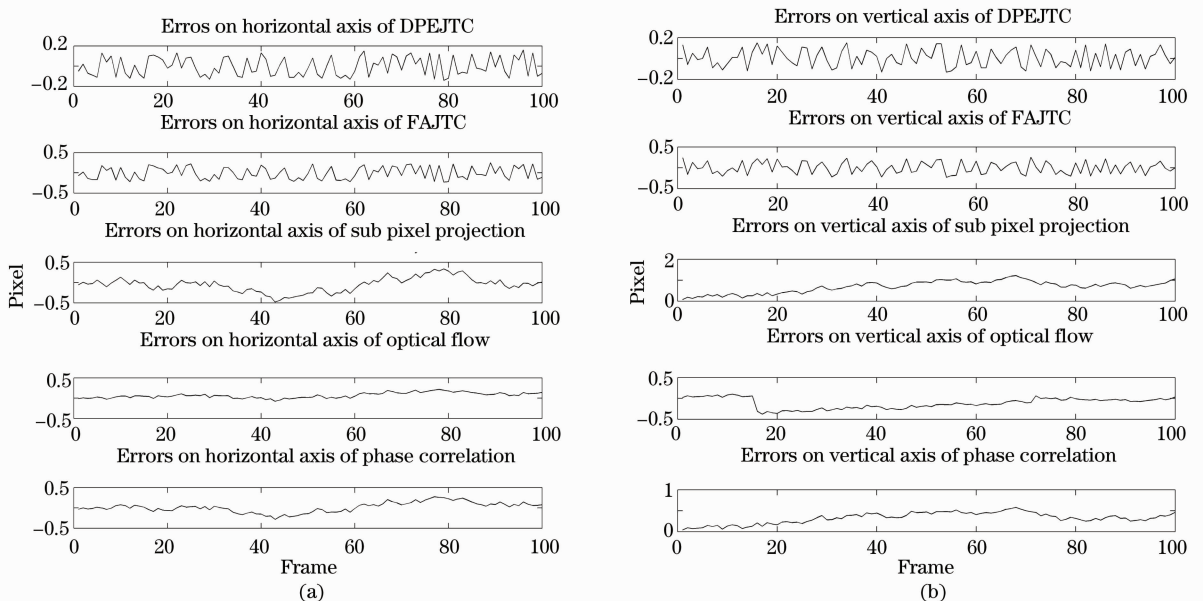


图 4 不同方法对视频位移测量误差

Fig. 4 Detection errors over a video by different algorithms

表 1 各种位移探测算法的比较

Table 1 Results of different displacement measurement methods

Measurement method	DPEJTC	FAJTC	Optical flow	Sub pixel projection	Phase correlation
RMSE along vertical axis	0.0072	0.0198	0.0160	0.0767	0.0171
Mean of errors on vertical axis	0.0010	0.0062	0.6859	-0.1174	0.3263
RMSE along horizontal axis	0.0087	0.0229	0.0043	0.0313	0.0151
Mean of errors on horizontal axis	-0.0041	-0.0099	-0.0533	0.0675	0.0138

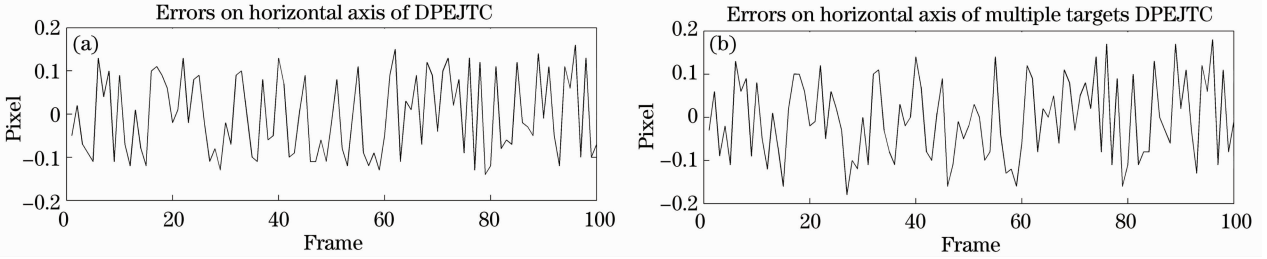


图 5 多幅目标图像位移同时测量误差

Fig. 5 Errors of displacement between multiple targets by our method

3.4 实拍视频实验

用所提算法对实际拍摄的视频进行实验,视频采用 Mikrottron 公司的 MC 1360 拍摄,固定摄像机,将目标物体固定于颤振平台上进行随机振动,得到含 51 frame 图像的视频。图 6(a)和(b)分别是视频的第一帧和最后一帧,它们的分辨率为 512 pixel × 512 pixel。图 7 是相邻两帧间的竖直和水平方向位移量。因为实际位移量未知,所以采用峰值信噪比 (PSNR), $R_{PSN}^{[21]}$ 来衡量探测精度,

$$R_{PSN}(f_1, f_2) = 10 \lg \frac{255 \times 255}{E_{MS}(f_1, f_2)}, \quad (16)$$

式中均方差为

$$E_{MS}(f_1, f_2) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_1(i, j) - f_2(i, j)], \quad (17)$$

式中 $f_1(i, j)$ 和 $f_2(i, j)$ 是待比较的两幅图像, $f_1(i,$

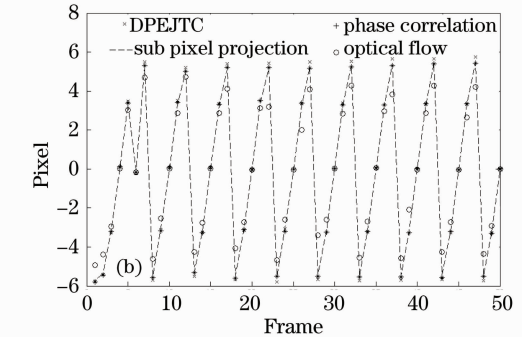
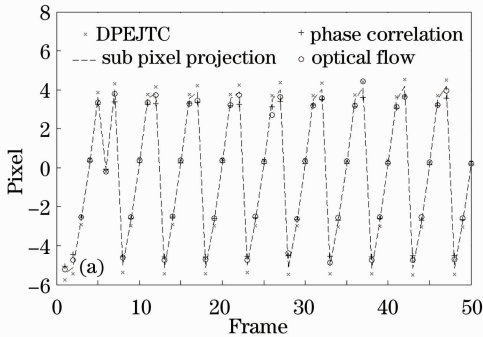


图 7 各方法在视频位移探测中的结果。(a)水平方向位移,(b)竖直方向位移

Fig. 7 Results of displacement of video by multiple methods. (a) Horizontal displacement, (b) vertical displacement

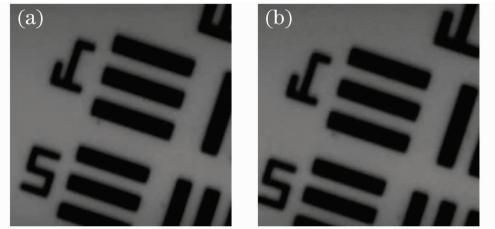


图 6 用于探测的实际视频

Fig. 6 Video for displacement measurement

f_1 是前一帧图像, $f_2(i, j)$ 是当前帧图像。首先计算每相邻两帧的 PSNR, 然后利用得到的位移矢量将每帧目标图像配准进行稳像, 重新计算相邻两帧的 PSNR, 结果如图 8 所示。可以发现稳像后的 PSNR 高于稳像前, 由此说明稳像是有效的, 所提位移矢量探测算法是精确的。

另外, 从图 8 可知, 用双相位编码联合变换相关器、相位相关、亚像素投影算法和光流法得到的位移

矢量,图像稳像后 PSNR 分别平均提高了 18.1, 16.3, 14.2 和 11 dB,表明双相位编码联合变换相关器对稳像最有效,所测位移矢量最精确。

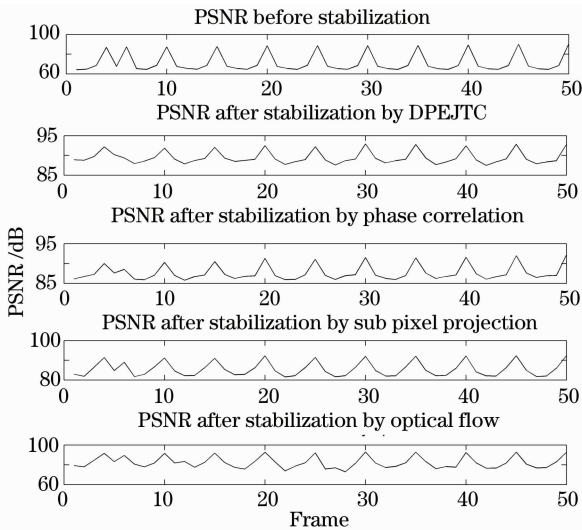


图 8 各方法在视频位移探测中的 PSNR

Fig. 8 PSNR of the results by different methods

4 结 论

提出了一种基于双相位编码的位移矢量探测技术,对相位编码的联合功率谱应用新的滤波器,使得相关峰呈现极好的单峰性,此方法大大提高了空间光调制器的利用率,同时用实验证明了此方法相比其他几种常用算法在位移探测中的优越性,并给出了多幅目标图像同时存在时的位移矢量探测算法。仿真和实际拍摄实验证明了本文方法的精确性,均方根误差能控制在 0.1 pixel 以内。

参 考 文 献

- 1 C. S. Weaver, J. W. Goodman. A technique for optically convolving two functions [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5** (7): 1248~1249
- 2 V. Tchernykh, K. Janschek, S. Dyblenko. Space application of a self-calibrating optical processor for harsh mechanical environment[C]. 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Darmstadt, 2000, **3**: 309~314
- 3 K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko *et al.*. Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop[C]. *SPIE*, 2004, **5570**: 280~288
- 4 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**(9-12): 965~974

- 5 K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko. Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera [J]. *Control Engng. Prac.*, 2007, **15** (3): 333~347
- 6 K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko. Integrated camera motion compensation by real-time image motion tracking and image deconvolution [C]. *Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey: IEEE/ASM, 2005, 1437~1444
- 7 H. Yi, H. Zhao, Y. Li *et al.*. Improved digital processing method used for image motion measurement based on hybrid opto-optical joint transform correlator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 989~992
- 8 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
- 9 Ge Peng, 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移探测技术的稳健性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29** (7): 1796~1800
- 10 T. J. Grycewicz. Fourier plane processing for the joint transform correlator: windows and time modulation [C]. *SPIE*, 1994, **2297**: 173~179
- 11 M. S. Alam, D. Chain. Efficient multiple target recognition using a joint wavelet transform processor [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(5): 1203~1210
- 12 M. S. Alam, J. S. Khoury. Fringe-adjusted incoherent erasure joint transform correlator [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37** (1): 75~82
- 13 M. S. Alam, M. Haque, J. F. Khan *et al.*. Fringe-adjusted joint transform correlator based target detection and tracking in forward looking infrared image sequence [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(6): 1407~1413
- 14 Q. Tang, B. Javidi. Technique for reducing the redundant and self-correlation terms in joint transform correlators [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(11): 1911~1918
- 15 D. Feng, H. Zhao, S. Xia. Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3-4): 260~264
- 16 M. Deutsch, J. García, D. Mendlovic. Multichannel single-output color pattern recognition by use of a joint-transform correlator [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(35): 6976~6982
- 17 T. M. Lehmann, C. Gonner, K. Spitzer. Survey: Interpolation methods in medical image processing [J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2002, **18**(11): 1049~1075
- 18 K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki *et al.*. High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation [J]. *IEICE Trans. Fund. Electr.*, 2003, **86**(8): 1925~1934
- 19 P. C. Chung, C. L. Huang, E. L. Chen. A region-based selective optical flow back-projection for genuine motion vector estimation [J]. *Pattern Recogn.*, 2007, **40**(3): 1066~1077
- 20 M. Sambora, R. K. Martin. Exploiting correlations in projection-based image registration [J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(7): 077005
- 21 Carlos Morimoto, Rama Chellappa. Evaluation of image stabilization algorithms [C]. *IEEE*, 1998, **5**: 2789~2792