

基于时空域分析影像云纹的低频振动测量

史红健 朱飞鹏 何小元

(东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096)

摘要 实现了一种基于时空域分析影像云纹的振动测量方法。在此方法中,一个正弦光栅放置在低频振动物体的正前方。光栅及其影像相互干涉产生的云纹图像由高速摄像机采集并保存。序列云纹图像的联合时空域信息将同时被三维傅里叶变换处理,而不是各自分开处理。通过过滤三维频谱和三维反傅里叶变换,得到三维复相位矩阵,从而获取运动物体在不同时刻的形貌和位移。连续振动悬臂梁的测量实验结果表明,影像云纹结合时空域分析能够用于动态测量,证实了该方法的有效性。

关键词 振动测量;时空域分析;影像云纹

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0412005

Low-Frequency Vibration Measurement Based on Spatiotemporal Analysis of Shadow Moiré

Shi Hongjian Zhu Feipeng He Xiaoyuan

(Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract A method for vibration measurement of an object based on spatiotemporal analysis of shadow moiré fringes is discussed. In this method, a sinusoidal grating is closed to a vibrating object. The moiré fringes patterns generated by the interference of grating lines and shadow lines are captured by a high-speed camera. The joint spatial and temporal information of the fringe sequences is processed by the 3D Fourier transform simultaneously rather than separately. A 3D space-time phase distribution can be obtained from the filtered spatiotemporal spectra and 3D inverse Fourier transform. From the phase values, the surface profile and displacement of the object at different time can be retrieved. The measurement experiment of a vibrating cantilever beam demonstrated the validity of this method. The results show that shadow moiré with spatiotemporal analysis can be applied to dynamic measurement.

Key words vibration measurement; spatiotemporal analysis; shadow moiré

OCIS codes 120.0120; 120.7280; 120.4120

1 引 言

在很多工业领域,动态性能测试对于提高结构可靠性有着重要的意义。接触式传感器被广泛使用,但很难运用到微小物体的动态测量,这是因为会改变物体的动态行为。光学方法具有非接触、全场和高精度的优点,适合对微小物体进行表面形貌、位移和变形的测量^[1~4]。在光学测量中,相机采集的干涉图像通常是散斑或条纹图形式,要想得到待测的物理量(如位移、物体形貌和应变等),必须对干涉图像进行分析,从中提取出直接和待测物理量有关的相位信息。

随着高速摄像机记录能力的快速发展,每秒可以采集大于 1×10^5 幅图像。测量物体动态变形时,高速摄像机记录得到序列干涉图像。物体的瞬时三维形貌、变形和动态响应可以从序列图像中通过提取精确的相位来进行分析。一些学者采用不同的算法^[5~15]来分析图像序列,有的在空间域上对图像进行逐帧处理来提取相位,有的在时间域上逐点进行逐帧处理来提取相位,最终得到三维相位矩阵。

在光学方法中,影像云纹^[15~18]是一种简单而且价格便宜的技术。影像云纹图像由参考光栅和它的

收稿日期: 2010-07-26; **收到修改稿日期:** 2010-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(10727201,10972054)资助课题。

作者简介: 史红健(1982—),男,博士研究生,主要从事微结构动静态力学性能光学测试方面的研究。

E-mail: shj_seu@yahoo.com.cn

导师简介: 何小元(1956—),男,博士,教授,主要从事光测力学方法与应用等方面的研究。E-mail: mmhxy@seu.edu.cn

影像相互干涉而产生。结合时间平均法^[19,20],它已经被运用于动态测量,但是时间平均法并不适合测量连续变形或振动物体的瞬时位移和形貌。通过引入时间域载波技术,Fu等提出时间域处理影像云纹图像技术^[21,22]用于测量阶梯物体随时间变形的情况。为了充分利用时间-空间信息,三维图像序列不应该分开处理,而应该在三维时空域被同时处理。Takeda等^[23]提出使用三维傅里叶变换处理时空的频率多元外差干涉,等同于分开做3个一维的傅里叶变换,也相当于先做逐帧的二维傅里叶变换,然后再做时间轴上的一维傅里叶变换。这样就不光利用了实验数据在空间的连续性,而且还利用了其在时间上的连续性。Qian等提出了三维加窗傅里叶变换^[24]用于序列图像分析,相对于三维傅里叶变换,它在去除噪声方面更加有效,但是计算的时间更长。

实验测量时振动物体的影像云纹图像由高速摄像机采集并保存。三维相位分布由时空域处理图像序列得到。运动物体的瞬时形貌和位移从相位分布中提取。实验处理的结果同在空间域上利用二维傅里叶变换法逐帧处理条纹图像的结果作了比较。

2 测量原理

2.1 影像云纹法

影像云纹法的测量光路如图1所示。一个间距为 p 的正弦光栅放置在被测物体表面附近。一束斜射的光穿过光栅,在物体表面投下光栅的影像。影像条纹由于物体的形貌而产生变形,当从另一个方向观察影像,光栅和它变形后的影像相互干涉,就产生了影像云纹图像。影像云纹图像由垂直光栅放置的 CCD 相机采集。CCD 相机和光源之间的距离为 d , CCD 相机和光源到光栅的距离相等且为 l 。CCD 传感器上记录的影像云纹图像的光强分布表达式为

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cos\left\{\frac{2\pi z(x,y)d}{p[l+z(x,y)]}\right\}, \quad (1)$$

式中 $A(x,y)$ 为背景光强, $B(x,y)$ 为调制光强, $z(x,y)$ 为物体上的一个点 (x,y) 到光栅之间的距离。通常情况下,光栅和物体之间的距离远远小于物体到光源之间的距离,即 $z(x,y) \ll l$, 因此上面表达(1)式可以简化为

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cos[kz(x,y)], \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi d/(pl)$ 是和光路设置有关的系数。

当物体沿着 z 方向变形时,(2)式可以写成随着时间变化的形式:

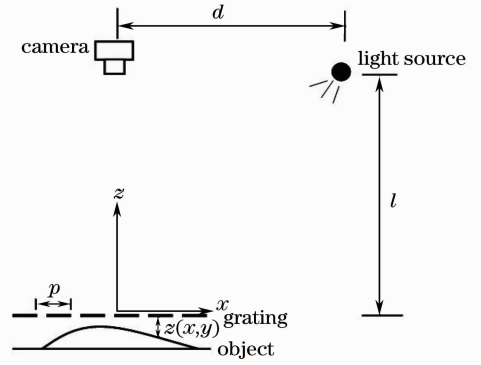


图1 影像云纹光路图

Fig. 1 Schematic setup of shadow moiré system

$$I(x,y;t) = A(x,y;t) +$$

$$B(x,y;t) \cos\{k[z(x,y;t) + z_0(x,y)]\}, \quad (3)$$

式中 $z_0(x,y)$ 是初始状态下点 (x,y) 和光栅之间的距离, $z(x,y;t)$ 是随着时间变化的点 (x,y) 和光栅之间的距离。对于空间频率而言, $A(x,y;t)$ 和 $B(x,y;t)$ 随时间变化缓慢。

当一系列连续变形的影像云纹图像由高速摄像机记录后,可以得到三维的图像序列矩阵 $I(x,y;t_n)$, $n = 1, 2, \dots, m$, 其中 m 是采集的图像的最大帧数。图像序列的联合的时空的信息将同时被三维傅里叶变换分析处理。

2.2 三维傅里叶分析

图像的光强分布可以写成复数形式:

$$I(x,y;t) = a(x,y;t) + c(x,y;t) \exp(2i\pi fx) + c^*(x,y;t) \exp(-2i\pi fx), \quad (4)$$

$$c(x,y;t) = 0.5b(x,y;t) \exp[i\varphi(x,y;t)], \quad (5)$$

式中 $c(x,y;t)$ 和 $c^*(x,y;t)$ 是复函数, $*$ 表示复数共轭。 f 是空间载波频率。由于空间载波的存在,图像序列也可以逐帧处理来提取相位。对于不连续表面物体的测量,还可以采用另外一种常用的时间域载波技术,序列图像中的每个点沿时间轴进行逐点分析。如果 x,y,t 3 个方向都没有明确的载波,为了分辨运动方向,就必须在至少一个方向上加合适的载波。

利用 Matlab 计算(4)式的三维傅里叶变换,得到其三维频谱为

$$I(u,v;\tau) = A(u,v;\tau) + C(u-f,v;\tau) + C^*(u+f,v;\tau), \quad (6)$$

式中 $C(u,v;\tau)$ 是 $c(x,y;t)$ 的三维傅里叶变换。相对于载波频率 f 而言, $a(x,y;t)$, $c(x,y;t)$ 和 $\varphi(x,y;t)$ 是缓慢变化的函数,因此 $C(u-f,v;\tau)$ 在频率域上可以被三维过滤窗口分离出来。在频域过滤出需要的部分是一个很重要的步骤,必须确保过滤窗口中选择的部分包含相位信息,并且过滤掉其余的

部分。在三维空间内,根据频谱在空间的分布情况选择长方体过滤窗口,确保一级频谱全部包含在内部,如图 2 所示。将过滤出来的三维频谱利用三维反傅里叶变换进行处理,就可以得到包含相位信息的 $c(x, y; t)$ 。三维相位矩阵可以通过下式计算得到:

$$\varphi(x, y; t) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y; t)]}{\text{Re}[c(x, y; t)]}, \quad (7)$$

式中 Re 和 Im 分别表示 $c(x, y; t)$ 的实部和虚部,相位值包裹在 $(-\pi, \pi)$ 之间。

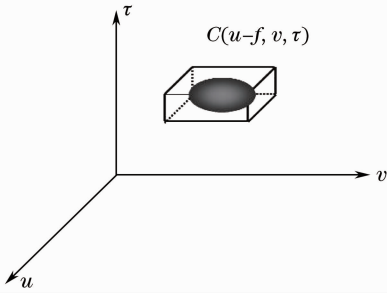


图 2 三维频谱过滤示意图

Fig. 2 Schematic of 3D spatiotemporal spectrum bandpass filtering

3 实验及结果

将上述方法应用于悬臂梁的低频振动测量实验,实验装置如图 3 所示。将频率为 6 line/mm 的正弦光栅紧靠试件放置。150 W 的白光光源通过光纤倾斜照射试件表面。试件为一端固定的铝制悬臂梁,长度、宽度和厚度分别为 85, 8 和 0.8 mm。悬臂梁和图像采集的区域如图 4 所示。利用 PZT 对悬臂梁施加 z 方向的正弦激励,频率由信号发生器控制,设定为 2 Hz,悬臂梁在激励作用下将做受迫振动。为了决定振动的方向,悬臂梁稍微倾斜放置于光栅后面,这相当于引入了空间载波。物体动态变形的影像云纹图像由高速摄像机 (FASTCAM-ultima 512) 记录到计算机硬盘,采样频率设置为 500 frame/s,曝光时间设置为 $(1/500)$ s。 d 和 l 分别为 250 mm 和 450 mm。采集的影像云纹图像如图 4 所示, 3×3 的均值滤波已经被运用于消除图像的高频栅线和随机噪声。图像区域包含 $270 \text{ pixel} \times 105 \text{ pixel}$, 相当于 14.4 mm 和 8 mm 的长度和宽度。下面对高速摄像机 1 s 内记录的 500 幅图像做处理。

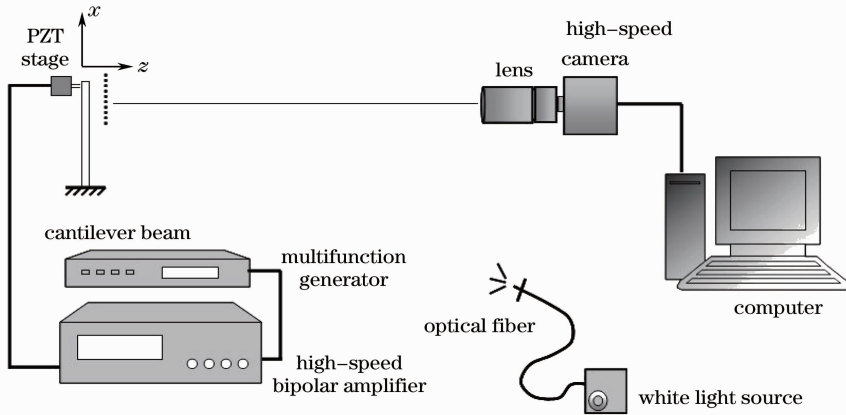


图 3 测量振动的影像云纹实验装置

Fig. 3 Experimental setup of shadow moiré for vibration measurement

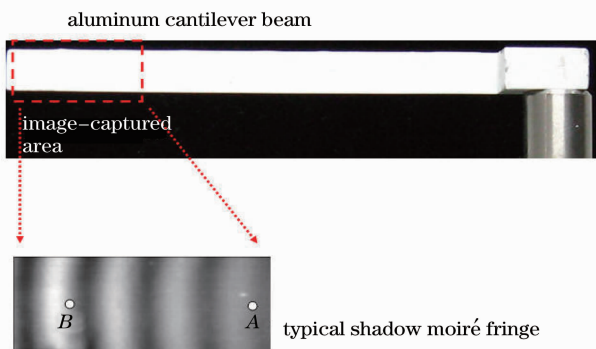


图 4 悬臂梁和图像采集区域

Fig. 4 Specimen of a cantilever beam and the image-captured area

将由 500 幅影像云纹图像组成的三维数据矩阵 $I(x, y; t_n)$ 转换到频率域,使用三维过滤窗口过滤出含有相位信息的部分,再利用三维反傅里叶变换将其转换回空域,进一步处理后可以得到三维复相位矩阵。图 5 中左边部分给出了用时空域分析影像云纹图后得到不同时刻的包裹相位图。由于噪声在影像云纹技术中不是很严重,可以得出用本文提出的方法处理的结果很好。把包裹相位展开后,就可以得到悬臂梁在不同时刻的形貌分布。图 6 为悬臂梁在 0.26 s 时候的形貌。对于悬臂梁上的每个点,经过沿时间轴相位展开,就可以得到连续的相位分布,从而得到其随时间变化的位移分布。图 7 中显示的

是悬臂梁上 A 点和 B 点在变形过程中的位移分布曲线。利用傅里叶变换计算 A 点的振动频率,其频

率响应显示在图 8 中,分析其频谱得到受迫振动的频率和悬臂梁所受激励的频率相等为 2 Hz。

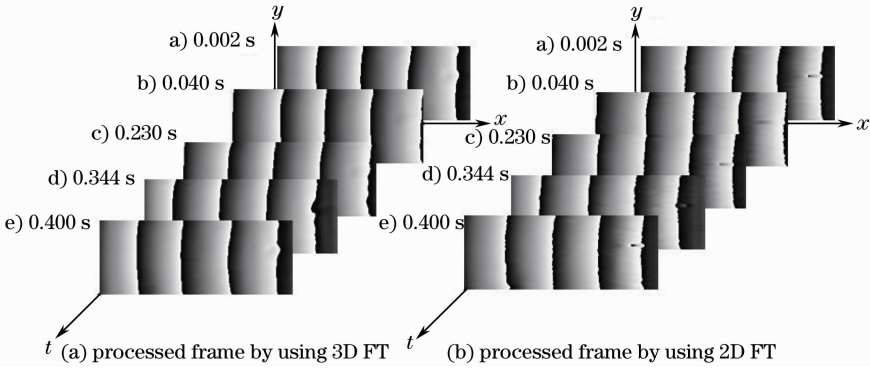


图 5 不同时刻的包裹相位图

Fig. 5 Typical wrapping phase at different times

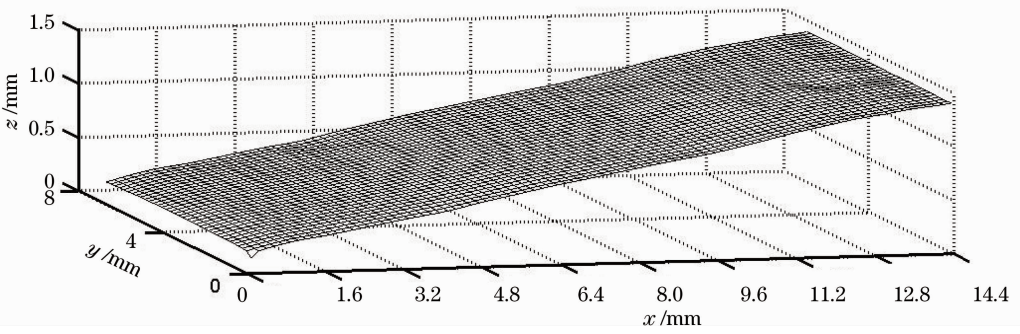


图 6 0.26 s 时的表面形貌的三维图

Fig. 6 3D plot of instantaneous surface profile at 0.26 s

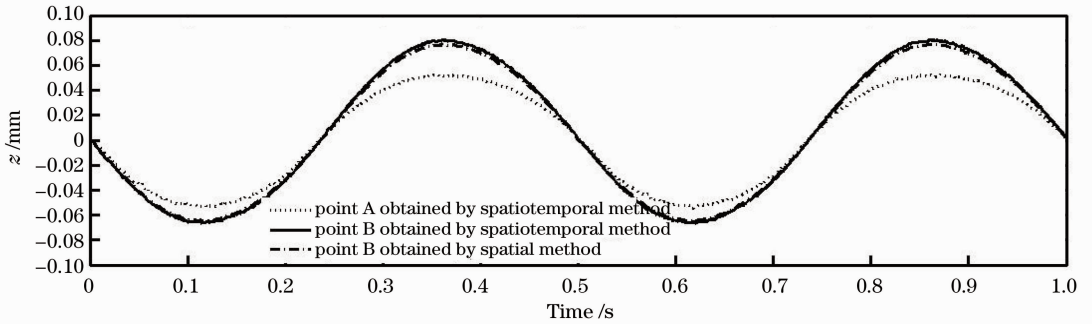


图 7 悬臂梁上 A 点和 B 点的位移分布

Fig. 7 Transient displacements distribution of point A and B on the cantilever beam

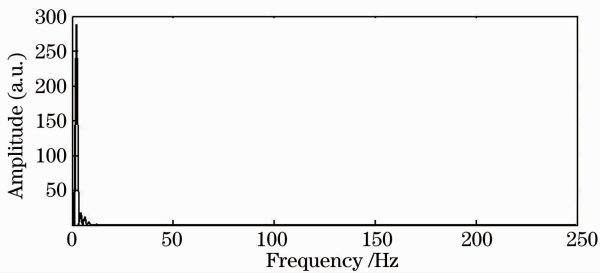


图 8 悬臂梁上 A 点的频率响应

Fig. 8 Frequency response of point A on the cantilever beam

高速摄像机采集到的图像序列也可以采用二维傅里叶变换法在空间域进行逐帧处理,最终将提取的每一幅图像的二维相位组合成三维相位矩阵。不同时刻的包裹相位图显示在图 5 中右边部分。图 7 中点划线表示的是利用空间域处理逐帧图像得到 B 点的位移分布曲线。比较结果可以看出,由于联合的三维时空域的信息比分开单独处理空间域的信息更加丰富,实验数据更加具有关联性,因此三维时空域同时处理的结果更好一些。

需要注意的是,只有当 (x, y, t) 三轴方向上同时

满足 Nyquist 采样理论的时候,才能对三维图像矩阵同时进行时空域的分析处理。动态测量的频率范围被 Nyquist 采样理论和相机的图像采集速率所限制。实验中使用的高速摄像机的最大采集速率为 3.2×10^4 frame/s, 根据 Nyquist 采样理论,理论上可以达到的最大动态测量频率为 1.6×10^4 Hz。

4 结 论

基于影像云纹技术,本文提出了一种提取运动物体瞬时形貌和位移的方法。三维傅里叶变换被用于时空域同时处理一系列影像云纹图像。经过处理,和待测物理量有关的三维复相位矩阵可以同时得到。相位展开以后,可以得到运动物体的瞬时形貌和离面位移。相比较利用二维傅里叶分析逐帧处理得到的结果,本文提出的方法所利用的信息更加丰富,更加有效。结果表明影像云纹结合时空域分析为动态测量提供了一种有效的手段。

参 考 文 献

- G. Coppolar, P. Ferraro, M. Iodice *et al.*. A digital holographic microscope complete characterization of microelectromechanical system [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(3): 529~539
- L. Salbut, M. Kujawinska. Optical measurement station for complex testing of microelement [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **36**(2): 225~240
- S. H. Wang, C. Quan, C. J. Tay *et al.*. Deformation measurement of MEMS components using optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(3): 909~915
- Wang Wei, He Xiaoyuan. Application of optical extensometer on the real-strain measurement of low-dimensional materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1662~1666
王 伟, 何小元. 光学引伸计在低维材料实时应变测量中的应用 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1662~1666
- M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- Q. Kema. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2007, **45**(2): 304~317
- Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. Application of two-dimensional wavelet transform on phase analysis of spatial carrier-fringe patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1673~1679
李思坤, 苏显渝, 陈文静. 二维实小波变换在空间载波条纹相位分析中的应用 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1673~1679
- Li Kai, Zhang Dazhi, Wang Jingjing *et al.*. Phase extraction of an ESPI fringe pattern by using two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3):

733~738

- 李 凯, 张大治, 王晶晶 等. 基于二维连续小波变换的 ESPI 条纹图相位提取方法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 733~738
- Huang Yu, Zhong Jingang. Improved algorithm to choose the window scale for windowed Fourier transform profilometry [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 378~385
黄 宇, 钟金钢. 窗口傅里叶变换轮廓术中窗口尺度选取的改进 [J]. *光学技术*, 2010, **36**(3): 378~385
- J. M. Huntley, G. H. Kaufmann, D. Kerr. Phase-shifted dynamic speckle pattern interferometry at 1 kHz [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6556~6563
- J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- Li Xide, Tao Gang, Deng Bing *et al.*. Time-sequence speckle metrology and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8): 993~997
李喜德, 陶 刚, 邓 兵 等. 时间序列散斑干涉技术研究及应用 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(8): 993~997
- Y. Fu, C. J. Tay, C. Quan *et al.*. Wavelet analysis of speckle patterns with a temporal carrier [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 959~965
- Chen Fanxiu, He Xiaoyuan. Instantaneous three-dimensional profile measurement based on temporal wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **26**(12): 1803~1805
陈凡秀, 何小元. 基于时域小波变换相位提取的三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2007, **26**(12): 1803~1805
- D. M. Meadows, W. O. Johnson, J. B. Allen. Generation of surface contours by moiré patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 942~947
- H. Takasaki. Moiré topography [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1467~1472
- L. H. Jin, Y. Kodera, T. Yoshizawa *et al.*. Shadow moiré profilometry using the phase-shifting method [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(8): 2119~2123
- K. S. Lee, C. J. Tang, H. C. Chen *et al.*. Measurement of stress in aluminum film coated on a flexible substrate by the shadow moiré method [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): C315~C318
- Y. Y. Hung, C. Y. Liang, J. D. Hovanessian *et al.*. Time-averaged shadow-moiré method for studying vibrations [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(6): 1717~1719
- J. Fujimoto. Determination of the vibration phase by a time-averaged shadow moiré method [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(23): 4373~4376
- L. H. Jin, Y. Otani, T. Yoshizawa. Shadow moiré profilometry by frequency sweeping [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(7): 1383~1386
- C. J. Tay, C. Quan, Y. Fu *et al.*. Instantaneous velocity displacement and contour measurement by use of shadow moiré and temporal wavelet analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4164~4171
- M. Takeda, M. Kitoh. Spatiotemporal frequency multiplex heterodyne interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(9): 1607~1614
- K. Qian, Y. Fu, Q. Liu *et al.*. Generalized three-dimensional windowed Fourier transform for fringe analysis [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2121~2123