

数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的 三维变形测量方法

孙明勇 蔡康 杨德宇 孙平

(山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要 采用对离面位移敏感的单束激光照明散斑干涉光路,将数字散斑相关法和电子散斑干涉术结合起来测量物体的三维变形。在无参考光时采集一幅物体变形前的散斑图,加入参考光并实现散斑干涉,结合相移技术测量物体离面位移。去掉参考光再采集一幅物体变形后的散斑图。对物体变形前后的散斑图进行散斑相关运算,得到二维面内位移分量,实现三维变形测量。对三点弯曲梁进行了实验,结果表明,该方法可以测量变形场的三个位移分量,具有光路简单、易操作的优点。

关键词 测量;三维位移测量;数字散斑相关法;电子散斑干涉术

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.111201

Three-Dimensional Deformation Measurement with the Combination of DSCM and ESPI

Sun Mingyong Cai Kang Yang Deyu Sun Ping

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract Based on an electronic speckle pattern interferometry (ESPI) optical setup with one illuminating light sensitive to out-of-plane displacement, a method is presented for three-dimensional deformation measurement by using the combination of digital speckle correlation method (DSCM) and ESPI. One speckle pattern before deformation is captured by a CCD camera without a reference light. The reference light is used and an ESPI system is constructed. The out-of-plane displacement component can be measured after the test object is deformed by using phase shifting technique in the ESPI system. Another speckle pattern is captured without reference light after deformation. The in-plane displacement components can be obtained by using DSCM from the two speckle patterns, one obtained before deformation and another after deformation. In this way the measurement of the three-dimensional displacement of an object is completed. A typical three-point-bending beam experiment is carried out by the method proposed. Experimental results show that the three displacement components can be obtained effectively. The deformation measurement system is simple and useful for it has a simple setup and easy operation.

Key words measurement; three-dimensional displacement measurement; digital speckle correlation method; electronic speckle pattern interferometry

OCIS codes 120.6165; 110.3180; 110.6150

1 引言

数字散斑图像相关方法(DSCM)在材料力学、断裂力学、生物力学、现场实时测量、微尺度变形场测量、电子封装以及动态位移及变形测试等众多应用领域都展示了其适用性和优越性。数字散斑图像相关技术通过记录物体变形前后的图像并运用一定的图像相关搜索算法得出物体的位移和变形^[1],具有原理简单、光路简单、非接触以及对测量环境要求低等优点。近年来,一些现代的数学理论和数学方法逐渐被引入到该方法中,其测量精度逐步提高,例如运用亚像素搜索算法可获得亚像素位移。亚像素算法有很多种,主要有相关

收稿日期: 2012-07-04; **收到修改稿日期:** 2012-07-18; **网络出版日期:** 2012-09-11

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2008G18)资助课题。

作者简介: 孙明勇(1987—),男,硕士研究生,主要从事散斑干涉测量方面的研究。E-mail: sunmy126@126.com

导师简介: 孙平(1964—),男,博士,教授,主要从事散斑干涉、云纹干涉光测量技术等方面的研究。

E-mail: sunpingmail@sohu.com

系数拟合法^[2~4]、Newton Raphson(N-R)迭代法^[5]、基于梯度的方法^[6~9]等。与其他方法相比,梯度法具有抗噪能力较高、计算量小和精度较高等优点,且在位移小时比较稳定^[8],然而在非刚体变形的物体进行测量时,梯度法会产生形函数欠匹配而导致的系统误差。目前,DSCM 应用的领域正逐渐从常规材料的测试向一些新型材料测试、从宏观场逐渐向细微观尺度、从常规环境向比较恶劣的环境、从实验室测试逐步向工程现场应用、从静态准静态向动态准动态等方面发展^[10]。

由于方法本身所具有的局限,单光束照明的散斑相关方法只能测量面内位移。科研人员正通过将 DSCM 与其他测量技术结合或通过三维散斑相关的方法测量三维位移。将 DSCM 与立体摄影技术或双目测量技术相结合,可以测量三维位移场^[11~14]。例如姚学锋等^[13]提出的立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场;谢惠民等^[14]提出的双目三维数字散斑相关测量三维变形和三维面形技术。将 DSCM 与针孔摄像技术相结合,何小元等^[15,16]提出了数字图像相关与针孔摄像机成像模型相结合测量三维物体位移方法。通过三维散斑相关的方法,伍小平等^[17]利用模拟实验获得了物体内部三维位移场。将 DSCM 与散斑干涉相结合,也可以测量三维位移场。张青川、周灿林等把散斑相关和电子散斑干涉结合起来解决三维测量问题^[18,19]。

利用电子散斑干涉(ESPI)方法可以测量物体的三维位移^[20,21],具有非接触,全场测量,精度高的优点。电子散斑干涉技术是基于参考光和物光在 CCD 靶面上产生散斑干涉进行测量的。因此,三维散斑干涉往往光路比较复杂。复杂的光路增加了测量系统不稳定性,降低了测量精度。将 DSCM 与散斑干涉结合测量三维位移测量,可以简化 ESPI 光路。文献[18]将 DSCM 引入 ESPI 中,采用对离面位移敏感的单光束照明电子散斑干涉光路。文中在利用散斑相关计算面内位移时不是直接得到所需的散斑图,而是由变形前后采集的相移图像经过处理得到,计算过程比较复杂。文献[19]对拉伸试件的前后表面分别使用不同的 CCD 摄像机同时测量,结合数字散斑干涉法和数字散斑相关法,实现了试件正面的面内位移测量和试件背面的离面位移测量。本文利用典型的对离面位移敏感的单束照明数字散斑光路,通过控制光路中的参考光,实现了散斑相关测量物体的面内位移和离面位移,实现了三维位移测量。该方法具有光路简单、操作和数据处理简单快捷的优点。

2 测量原理

2.1 DSCM 测量面内位移

DSCM 是利用数学相关方法来分析物体位移前后的试样表面数字图像数据,即利用数字图像的灰度值来精确测定位移。物体变形后其表面上几何点的移动产生了位移,通过相关算法确定物体变形前后对应的几何点,就可以得到位移^[1]

$$C(u, v) = \frac{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为变形前的图像, $g(x', y')$ 为变形后的图像。 u 、 v 分别对应原图像中位移点 (x, y) 在变形后的图像中对应点 (x', y') 的整像素位移。 \bar{f} 和 \bar{g} 为图像子区灰度平均值。为了提高测量精度,需要在整像素结果的基础上进一步进行亚像素位移的计算求解。例如梯度法^[7]所选取的相关系数计算公式为(1)式的平方,即

$$C(u, v) = \frac{\left\{ \sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + u + \Delta u, y_j + v + \Delta v) - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + u + \Delta u, y_j + v + \Delta v) - \bar{g}]^2}, \quad (2)$$

式中 Δu 、 Δv 为对应于整像素位移结果的亚像素位移。

将 $g(x_i + u + \Delta u, y_j + v + \Delta v) - \bar{g}$ 泰勒展开,取一级近似,并令 $\frac{\partial C}{\partial \Delta u} = 0, \frac{\partial C}{\partial \Delta v} = 0$, 可得^[7,8]

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & C \\ E & H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2,$$

$$B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG,$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG,$$

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2,$$

$$E = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG,$$

$$H = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_y^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG,$$

$$G(x_i, y_j) = g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g},$$

$$G_x = g_x - \bar{g}_x, \quad G_y = g_y - \bar{g}_y,$$

$$F(x_i, y_j) = f(x_i, y_j) - \bar{f},$$

式中以 x, y 为下标的表示对其求偏导。梯度法在模拟实验中, 0.001~0.01 亚像素位移精度可达 0.001 pixel, 0.01~0.1 亚像素位移绝对误差小于 0.005 pixel, 0.1~1.0 pixel 范围内的相对误差可以控制在 2%^[7]。本文采用梯度法计算面内位移的二维分量。

2.2 ESPI 测量离面位移

对于图 1 所示的电子散斑干涉光路, 不难得出光波相位变化与物体变形的相位关系^[20,21]为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [\omega(1 + \cos\theta) + u \sin\theta], \quad (4)$$

式中 λ 为所用激光的波长, θ 为照明光与物体表面法线的夹角, ω 为物体变形的离面位移, u 为物体变形的面内水平方向位移。由(4)式可知, 当照明光入射角度 θ 很小时 (小于 5°) 可以近似看成光程变化仅与离面位移 ω 有关。

由(4)式可得

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \omega. \quad (5)$$

采用等四步相移法^[22]计算物体变形相位, 可得出 ω

场。采用如图 1 所示的光路图, 控制参考光照明, 首先在无参考光时采集一幅物体变形前的散斑图, 然后光路中加入参考光, 实现散斑干涉。加载后物体变形, 采集四幅等相移的散斑干涉条纹图, 利用四步相移法计算出变形物体的离面位移。最后, 去掉参考光再采集一幅物体变形后的散斑图。利用物体变形前后的散斑图进行散斑相关运算, 得到二维面内位移分量, 实现三维变形测量。

3 典型实验

实验光路如图 1 所示, 试件为有机玻璃筒支梁, 长 150.0 mm, 高 19.5 mm, 厚 18.5 mm。筒支梁放在自制的可升降自平衡加载架上进行加载, 在其表面涂以水性涂料, 以增强其反射率, 整个实验装置放置在防震平台上进行。用 He-Ne 激光作为光源, 光束经扩束后照射在筒支梁表面上。由半透半反镜 (BS) 分出的另一束光作为参考光。实验时, 首先挡住参考光采集一幅筒支梁未变形时的散斑图像, 如图 2 所示。然后加上参考光, 实现电子散斑干涉。采集物体散斑干涉图像并实时相减, 其间对筒支梁的中心处进行加载, 加载至可以观察到数条物体离面位移条纹, 如图 3 所示。使用压电陶瓷相移器 (PZT phase shifter) 实现等相移并采

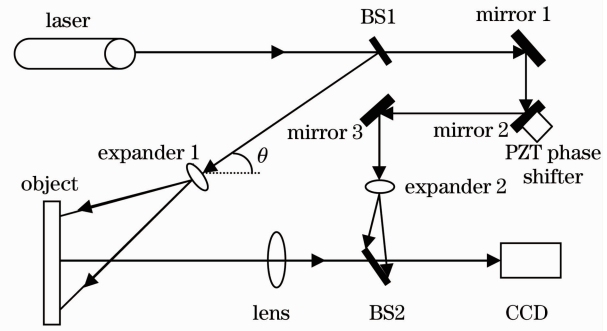


图 1 光学测量系统

Fig. 1 Schematic diagram of the optical measurement system

集散斑干涉条纹图。最后,挡住参考光,再次采集简支梁变形后的散斑图像,如图 4 所示。

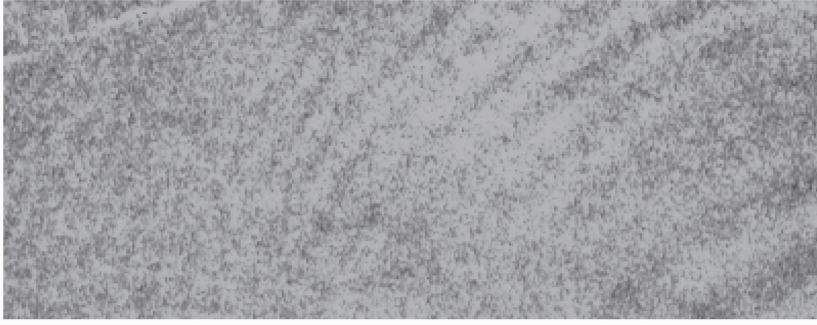


图 2 未变形时的散斑图像

Fig. 2 Speckle pattern of the object before deformation

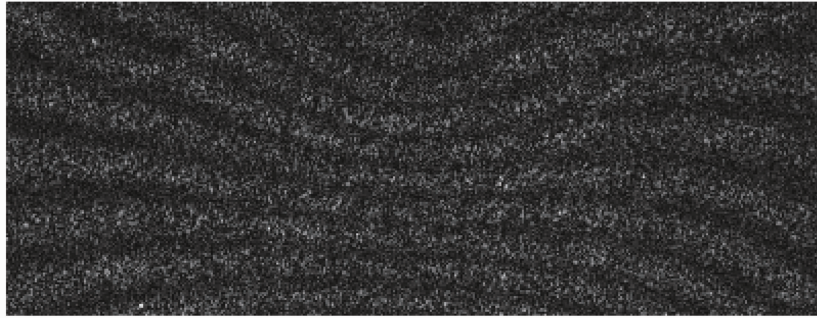


图 3 变形后的离面干涉条纹

Fig. 3 Out-of-plane interference fringe after deformation

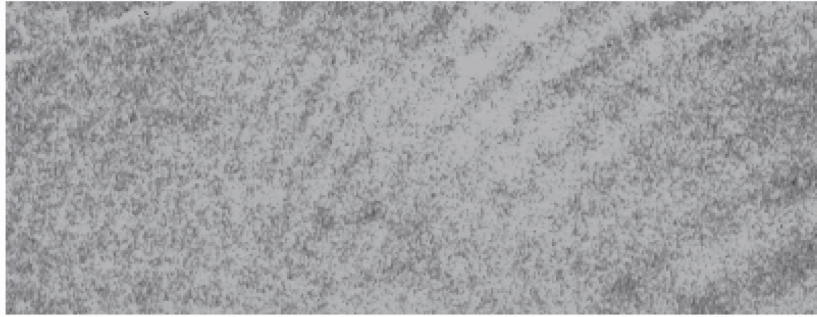


图 4 变形后的散斑图像

Fig. 4 Speckle pattern of the object after deformation

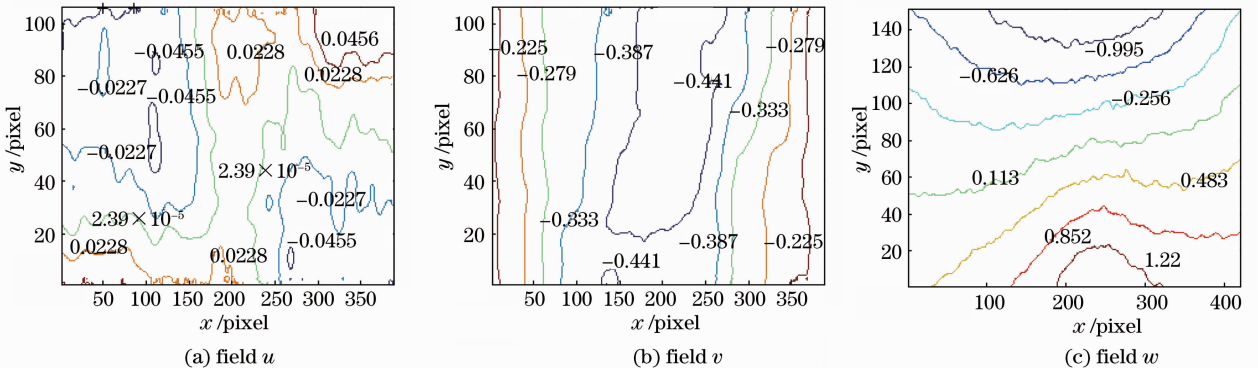


图 5 物体变形后的三维位移分量

Fig. 5 Three-dimensional displacement components of the object after deformation

变形前后散斑图像(图2和图4)用于散斑相关计算面内位移 u 场和 v 场(单位: pixel, 1 pixel=71 μm)。利用四步相移法对散斑干涉条纹图进行处理,可以得到离面位移 w 场(单位: μm)。实验结果如图5所示。

4 结 论

实验结果表明,利用散斑相关和散斑干涉相结合的方法可以快速有效的测量物体三维变形,具有光路简单、易操作和数据处理简单的优点。实验结果 v 、 w 场与文献[21]中的结果吻合的较好, u 场基本吻合。主要原因是简支梁在水平方向上的变形量较小,使散斑相关计算 u 场时对噪声更为敏感。事实上,散斑相关与散斑干涉相结合测量三维位移,其位移测量的范围受到散斑相关测量灵敏度和散斑干涉测量灵敏度的双重限制。如何匹配和利用二者测量灵敏度的差异,还有待进一步研究。

参 考 文 献

- Jin Guanchang. Computer-Aided Optical Metrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 143~161
金观昌. 计算机辅助光学测量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 143~161
- Pan Bing, Xu Boqin, Feng Juan *et al.*. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2005, **20**(z1): 43~50
潘 兵, 续伯钦, 冯 娟 等. 关于数字图像相关中曲面拟合法的几点讨论[J]. 实验力学, 2005, **20**(z1): 43~50
- Guo Rongxin, Cai Guangchen, Ma Kun *et al.*. A comparative study on the subpixel displacement calculation methods used in digital speckle measurement [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(5): 65~67
郭荣鑫, 蔡光程, 马 琨 等. 数字散斑测量中亚像素位移计算方法的选择研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(5): 65~67
- Pan Bing, Xu Boqin, Chen Ding *et al.*. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, **26**(2): 128~134
潘 兵, 续伯钦, 陈 丁 等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报, 2005, **26**(2): 128~134
- Pan Bing, Xie Huimin, Xu Boqin *et al.*. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, **35**(3): 345~352
潘 兵, 谢惠民, 续伯钦 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(3): 345~352
- Wang Linlin, Tang Chen. Sub-pixel searching algorithm of digital image/speckle correlation based on gradient method [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(3): 45~52
王琳霖, 唐 晨. 基于梯度法的数字散斑图像相关亚像素搜索算法[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(3): 45~52
- Zhang Jun, Jin Guanchang, Ma Shaopeng *et al.*. Gradient algorithm based on subpixel displacement of DSCM considering the statistical characterization of micro-region [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 467~472
张 军, 金观昌, 马少鹏 等. 基于微区统计特性的数字散斑相关测量亚像素位移梯度算法[J]. 光学技术, 2003, **29**(4): 467~472
- Meng Libo, Ma Shaopeng, Jin Guanchang. On the performance of the subpixel displacement estimations used in digital speckle correlation method (DSCM) [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2003, **18**(3): 342~348
孟利波, 马少鹏, 金观昌. 数字散斑相关测量中亚像素位移测量方法的比较[J]. 实验力学, 2003, **18**(3): 342~348
- Pan Bing, Xu Boqin, Li Kejing. Performance of gradient operators in algorithm of gradient-based subpixel registration [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1): 26~31
潘 兵, 续伯钦, 李克景. 梯度算子选择对基于梯度的亚像素位移算法的影响[J]. 光学技术, 2005, **31**(1): 26~31
- Wang Huaiwen, Kang Yilan, Xie Heping. Advance in digital speckle correlation method and its application [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, **35**(2): 195~203
王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(2): 195~203
- Jin Guanchang, Meng Libo, Chen Junda *et al.*. The progress and application of digital speckle correlation method [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2006, **21**(6): 689~702
金观昌, 孟利波, 陈俊达 等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. 实验力学, 2006, **21**(6): 689~702
- Tang Zhengzong, Liang Ji, Xiao Zhengzhong *et al.*. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2244~2253
唐正宗, 梁 晋, 肖振中 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(10): 2244~2253
- Yao Xuefeng, Lin Bisen, Jian Longhui *et al.*. Three-dimensions deformation field measurement combining digital speckle correlation technology with stereo photography [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 473~479

- 姚学锋, 林碧森, 简龙晖 等. 立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场[J]. 光学技术, 2003, **29**(4): 473~479
- 14 Pan Bing, Xie Huimin, Li Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2007, **22**(6): 556~567
潘 兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, **22**(6): 556~567
- 15 Sun Wei, He Xiaoyuan, C. Quan *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 894~901
孙 伟, 何小元, C. Quan 等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 894~901
- 16 Sun Wei, He Xiaoyuan, Zheng Xiang. Three-dimensional displacement measurement based on single CCD camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1723~1729
孙 伟, 何小元, 郑 翔. 基于单摄像机的三维位移测试方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1723~1729
- 17 Wang Min, Hu Xiaofang, Wu Xiaoping. Digital image correlation method for the analysis of 3-D internal displacement field in object [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5135~5139
汪 敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的 digital 图像相关方法[J]. 物理学报, 2006, **55**(10): 5135~5139
- 18 Zhou Canlin, Li Fang, Wang Yunshan. Large displacement measurement using ESPI [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(12): 1472~1475
周灿林, 李 方, 王蕴珊. 大位移电子散斑干涉法[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(12): 1472~1475
- 19 Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three-dimensional deformation of local shearing band by digital speckle metrology technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902
刘颢文, 张青川, 于少娟 等. 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 898~902
- 20 Sun Ping, Fan Xiangju, Wang Xinghai. Three-dimensional electronic speckle pattern interferometry with carrier modulation by using large-shearing block prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412012
孙 平, 范香菊, 王兴海. 基于大错位方棱镜的三维载频电子散斑干涉技术[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0412012
- 21 Wang Xinghai, Sun Ping, Gao Xiumei *et al.*. Three-dimensional ESPI based on large shearing blocky prism [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(2): 276~280
王兴海, 孙 平, 高秀梅 等. 基于大剪切方棱镜的三维电子散斑干涉技术[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(2): 276~280
- 22 Zhao Ruidong, Sun Ping. Shape measurement based on phase-shifting electronic speckle pattern interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2045~2048
赵瑞冬, 孙 平. 利用电子散斑相移技术测量物体三维面形的方法[J]. 光子学报, 2010, **39**(11): 2045~2048