

双反射镜成像用于二维数字图像相关应变精度提升

朱飞鹏*, 陆润之, 白鹏翔, 雷冬

河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100

摘要 受离面刚体位移的影响,普通二维数字图像相关(DIC)方法测得的应变结果往往精度较差。基于双 45°双反射镜成像技术,提出了一种改进的二维 DIC 方法来提高应变测量精度。利用双反射镜成像,将试样正反面散斑图案记录到同一张图像中,对左右图像中对应点的应变取平均值,可自动消除试样离面刚体位移的影响,获得准确的全场应变。开展了两组拉伸实验来验证该方法的可行性。实验结果表明:对于均匀变形,由改进的二维 DIC 方法得到的双向应变与电测法的结果相吻合;对于非均匀变形,得到的结果与有限元法结果相一致。因此,本文提出的二维 DIC 方法具有较高的应变测量精度,是一种便捷、有效、高精度的应变测量方法。

关键词 测量; 数字图像相关; 应变场; 双反射镜成像; 应变测量精度; 离面位移

中图分类号 O348.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1212002

Enhancement of Strain Measurement Accuracy of Two-Dimensional Digital Image Correlation Based on Dual-Reflector Imaging

Zhu Feipeng*, Lu Runzhi, Bai Pengxiang, Lei Dong

College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China

Abstract Strain results obtained using common two-dimensional digital image correlation (2D-DIC) method usually have rather poor measurement accuracy owing to rigid out-of-plane displacement. This study proposes a modified 2D-DIC method based on 45° dual-reflector imaging technique to improve the strain measurement accuracy. The speckle patterns of the front and rear surfaces can be recorded in a single image using dual-reflector imaging. The effect of rigid out-of-plane displacement is automatically eliminated by taking the average strain of corresponding points from the left and right images. Two groups of tensile tests are conducted to verify the feasibility of the proposed 2D-DIC method. Experimental results show that: for uniform deformation, the biaxial results obtained using the proposed 2D-DIC method are in good agreement with those obtained using strain gauges; from the viewpoint of the nonuniform deformation, the strain fields of the proposed 2D-DIC method are in agreement with those of the finite element method. Therefore, the proposed 2D-DIC method has excellent strain measurement accuracy, and it is a convenient, effective, and highly accurate strain measurement method.

Key words measurement; digital image correlation; strain field; dual-reflector imaging; strain measurement accuracy; out-of-plane displacement

OCIS codes 120.3940; 100.2000

1 引 言

在力学研究中,应变(场)的准确测量对于确定材料力学性能具有重要作用。应变测量已从早期的接触式电测法逐渐过渡到了光学非接触式测量,以数字图像相关(DIC)方法为代表。DIC起源于20世纪80年代,目前已成为一种成熟的变形测量技术,并得到了广泛应用^[1-4]。DIC技术利用相机对物

体变形过程进行拍摄,借助相关算法得到图像子区中心点的变形参数。DIC通常分为使用单相机的二维DIC与使用双相机的三维DIC。二维DIC通常只能测量平面物体二维的面内变形,而三维DIC利用两个相机构成双目立体视觉,因此可用于测量非平面物体的三维变形。较之三维DIC,二维DIC具有实验装置简单、计算效率高的优点,故在实时变形测量^[5-6]中应用较为广泛。

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-07-27; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(11702082,51679078)、中央高校基本科研业务费专项资金(2019B16514)

* E-mail: zhufeipeng@hhu.edu.cn

然而,在二维 DIC 变形测量中,物体发生的微小离面位移也会使图像的放大倍率发生变化,进而给应变结果带来严重的测量误差。Sutton 等^[7]研究了离面刚体位移对二维 DIC 的影响,提出利用远心镜头可有效减小离面刚体位移带来的影响。针对试样变形所致的离面位移,戴相录等^[8]根据针孔成像模型,提出了一种应变修正方法,并结合橡胶压缩实验验证了其可行性。由于试样离面位移会对一点的 3 个应变分量产生一个各向同性的虚假应变,Hoult 等^[9]提出利用试样的泊松比来矫正该点水平和竖向应变的方案。Bai 等^[10-11]分别提出了一种应变矫正或补偿方法,主要思想是在待测试样上粘贴不变形的刚性薄片作为补偿块,用测得的试样应变减去补偿块上离面位移所致的虚假应变,便可消除离面位移的影响。但在更换试件时,该类方法稍显繁琐。基于结构光测量的思想,Wang 等^[12]通过投射两束线激光到被测试件表面来获得试件的离面位移,进而对离面位移引起的虚假应变进行矫正。为了提高光学引伸计的应变测量精度,朱飞鹏等^[13-14]提出了双 45°反射镜成像技术,将试样正反面的图案记录到一幅图像中,然后取试样正反面对应点位移的平均值,自动补偿掉离面刚体位移对引伸计测量结果的影响。Dong 等^[15]利用基于上述成像技术的光学引伸计,测试了碳纤维复丝的拉伸性能,得到了良好的测量结果。然而,引伸计方法通常仅适用于均匀变形场的应变测量,对于一般的非均匀应变场而言,采用该方法只能得到标距范围内的平均应变,而不能反映出试样局部的变形分布。

因此,本文将上述基于双 45°反射镜成像的自动补偿方案从光学引伸计推广至全场应变的测量中,形成了改进的二维 DIC,实现了基于二维 DIC

的高精度全场应变测量。与三维 DIC 相比,该方法仅需一个相机,在测量应变时无需进行标定,计算效率较高,是一种简便的应变测量方法。

2 测量原理

二维 DIC 利用单个相机拍摄物体表面的散斑,然后对变形前后的参考图像和目标图像子区求解相关函数的极值,得到子区中心点的水平位移和竖直位移。对位移场进行局部最小二乘拟合^[16],便可得到应变的 3 个分量。

由于使用单个相机,二维 DIC 的应变精度受离面刚体位移的影响较大。因此,提出将双 45°反射镜成像技术^[13]引入二维 DIC 当中,以减小离面刚体位移的影响,并得到了较高的全场应变测量精度。为后续表述方便,将基于双 45°反射镜成像的二维 DIC 称为“改进的二维 DIC”。图 1(a)为双 45°反射镜成像技术的示意图。试样的轴向方向沿 Y 轴(即垂直于平面 XOZ),待测面为其前后表面,且平行于相机光轴。将两块互相垂直的平面反射镜对称固定在试件两侧,并与待测面各成 45°,这样试件前后表面的镜像就能被单个相机同时拍摄到,如图 1(b)所示,将前(后)表面的像称为左(右)图像。

当试样在测量过程中发生图 1(a)所示的离面刚体位移时,左右图像正好一个靠近相机靶面,另一个远离靶面,且位移量大小相等,符号相反。根据已有分析^[13],图 1(b)中任意一对对应点 A 和 A' 的竖直(Y 方向)位移可表示为

$$\begin{cases} v_A = v_{\text{def}}^{(A)} + v_{\text{rig}}^{(A)} \\ v_{A'} = v_{\text{def}}^{(A)} - v_{\text{rig}}^{(A)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $v_{\text{def}}^{(A)}$ 为试样真实变形引起的竖直图像位移; $v_{\text{rig}}^{(A)}$ 为离面刚体位移引起的竖直图像位移。由(1)

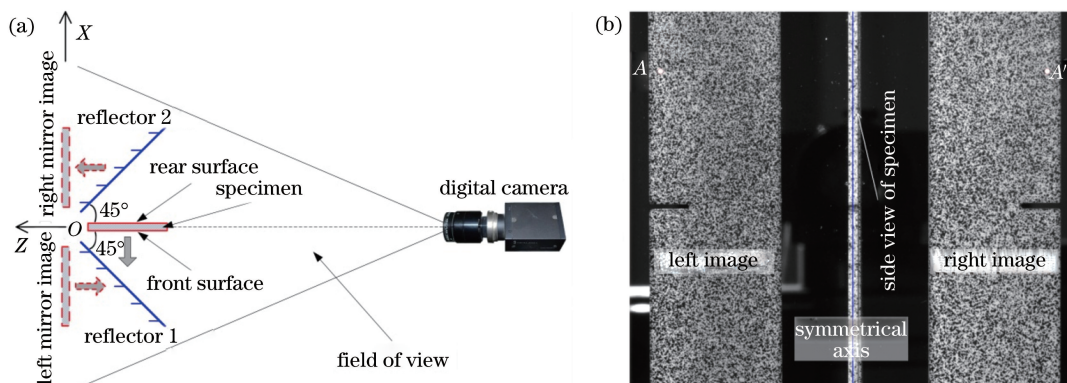


图 1 测量原理。(a)双反射镜成像示意图;(b)左右图像中对应点的选取
Fig. 1 Measurement principle. (a) Schematic of dual-reflector imaging;
(b) selection of corresponding points in left and right images

式可知,取左右图像对应点的位移均值,即可得到

$$\bar{v}_A = \frac{v_A + v_{A'}}{2} = v_{\text{def}}^{(A)}, \quad (2)$$

正好消去了刚体位移项的影响,从而可得到真实的竖直方向位移。而对于水平方向位移的处理略有不同,将在下面的计算步骤中进行说明。

在使用二维 DIC 计算时,首先需要确定左右图像对应计算点的位置,然后对左右图像中的每一对对应点的位移都采用上述处理方法,便可得到精确的全场二维位移,进而得到应变场。为此,提出如下应变场计算步骤。

1) 根据左右图像的对称特点,确定对称轴的准确位置。

2) 在右图像中手动选取计算区域,设定计算步长,由软件自动生成右图像中离散的计算点。

3) 根据步骤 1) 中对称轴的位置,对步骤 2) 中的计算点作镜像运算,便可得到左图像中对应计算点的坐标。

4) 对左右图像中的对应点,使用二维 DIC 算法得到左右图像的位移场和应变场。

值得注意的是,由于左右图像关于水平方向对称,需将左图像水平位移场 U 的结果乘以 -1 。假设右图像中水平两个点的位移分别为 U_1 和 U_2 ,则水平应变 $\epsilon_r = (U_2 - U_1)/L$,根据镜像原理,左图像中相应两点的位移分别为 $-U_2$ 和 $-U_1$,相应的水平应变 $\epsilon_l = (-U_1 + U_2)/L = \epsilon_r$ 。因此,求解水平应变场 ϵ_x 时无需对左图像的位移场乘以 -1 。

5) 取左右图像中对应点的应变平均值,便可得到精确的应变场结果,并以云图形式显示于右图像中。

3 实验过程

实验选取图 2 所示的两根不锈钢试样。1 号试样为标准拉伸试样,横截面宽度和厚度分别为 19.8 mm 和 1.35 mm,平行段长度为 96 mm。2 号试样除了在平行段中部开了一条长为 6 mm 的横缝之外,其余参数均与 1 号试样相同。在单轴拉伸时,1 号试样平行段将产生均匀应变场,而 2 号试样在横缝附近将出现显著的应力集中现象,即出现非均匀应变场。为评估测量方法的应变精度,在 1 号试样中部的正反面分别粘贴了沿横向和轴向的应变片。

实验加载设备为 Instron 3367 电子万能试验机。将试样夹持在试验机上、下夹头之间。为调整双反射镜的精确位置,采用文献[2]中介绍的直角装

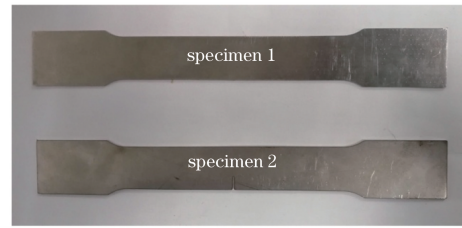


图 2 拉伸试样

Fig. 2 Tensile specimens

置和调节方法。实验中,同时利用二维 DIC 和三维 DIC 系统对试样的拉伸变形进行测量,如图 3 所示,其中左相机近似垂直于待测试样表面,构成二维 DIC 系统,左右相机一起构成了三维 DIC 系统,每个相机均由一个分辨率为 500 万像素的 PointGrey 图像传感器和焦距为 50 mm 的 Schneider 镜头组成。

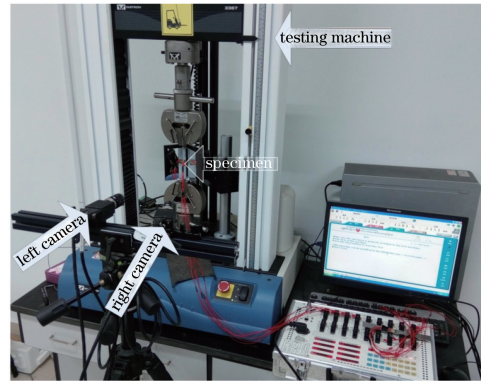


图 3 实验设备

Fig. 3 Experimental setup

1 号试样的测试实验过程如下:1)施加 0.5 kN 作为初始荷载,以消除薄试样的初弯曲,并采集一组参考图像;2)采用逐级等量加载方式,每级荷载增量为 0.5 kN,每施加一个荷载增量的同时,采集一组变形图像并记录下应变仪相应通道的读数;3)施加的荷载达到 7 kN,实验结束,以保证试件仍处于弹性阶段。

2 号试样的测试实验过程如下:1)施加 0.5 kN 作为初始荷载,采集一组参考图像;2)控制试验机加载至 2.5 kN,并采集变形图像,即荷载增量为 2 kN,保证该试样未进入屈服阶段。

4 实验结果与讨论

对于上述实验图像,根据第 2 节步骤 1)~5)得到的二维 DIC 的计算区域(AOI)如图 4 所示。三维 DIC 的计算区域选为图像右侧部分。设置二维 DIC 与三维 DIC 的计算模板为 31 pixel × 31 pixel,步长为 7 pixel,应变计算窗口为 15 × 15 个计算点。

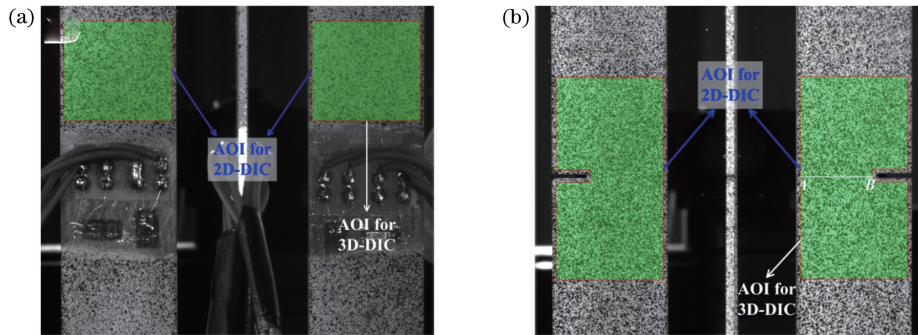


图 4 DIC 计算区域。(a) 试样 1; (b) 试样 2

Fig. 4 DIC calculation regions. (a) Specimen 1; (b) specimen 2

4.1 均匀应变场

从试样 1 的实验图像中提取出左相机的图像,并作相关运算,得到了图 5 所示的位移场结果,其中对应荷载为 7.0 kN。由于之后的分析只针对应变,因此图 5(a)左侧水平位移场 U 并未取其相反数,即并未转换到与右侧 U 相同的坐标系下。图 5(a)表明左右图像的 U 均近似呈平面分布,差别在于对 X 方向的斜率不同;图 5(b)中两者的竖直位移场 V 对 Y 方向的斜率有明显区别。究其原因是在试验机上下夹头之间有微小的相对转动,进而使得左右图像受到了试样离面刚体位移的影响。

对图 5 的位移场进行处理,得到了水平和竖直方向的应变场 ϵ_x 和 ϵ_y ,如图 6 所示。图 6(a)中试样左右图像的横向应变分布截然不同,左侧应变在

216 $\mu\epsilon$ 上下浮动,引起该浮动的原因是 DIC 全场应变测量精度约为 100 $\mu\epsilon$,而右侧应变在 -887 $\mu\epsilon$ 上下浮动,左右侧应变均与电测结果的 -339 $\mu\epsilon$ 相差甚远,也就表明实验过程中左侧图像有靠近相机的微小刚体位移,而右侧则正好相反。而上述两个值的平均值 $(216 - 887)/2 = -335.5 \mu\epsilon$,却与电测结果 -339 $\mu\epsilon$ 相差无几。图 6(b)中轴向应变的情况与横向应变类似,左侧轴向应变均值为 1730 $\mu\epsilon$,右侧轴向应变均值为 689 $\mu\epsilon$,两者的平均值为 1209.5 $\mu\epsilon$,仍然与电测结果的 1225 $\mu\epsilon$ 很接近。对相同荷载下的双相机图像进行三维 DIC 分析,得到的横向应变和轴向应变的平均值分别为 -472 $\mu\epsilon$ 和 1205 $\mu\epsilon$,即表明三维 DIC 横向应变精度远低于轴向应变。

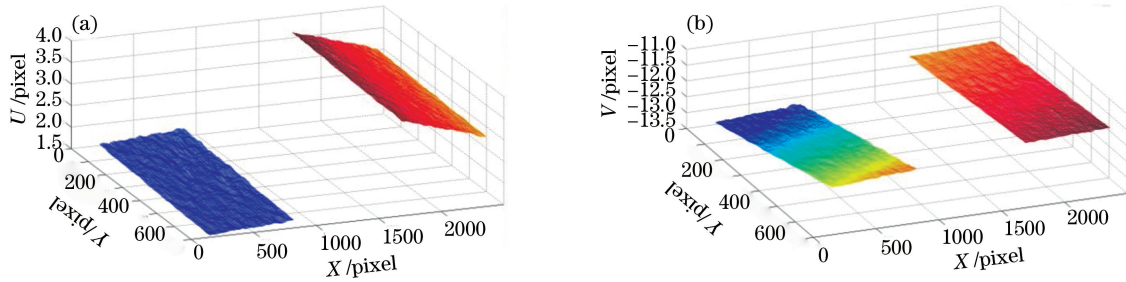


图 5 荷载为 7.0 kN 时的位移场结果。(a) U ; (b) V

Fig. 5 Displacement fields under load of 7.0 kN. (a) U ; (b) V

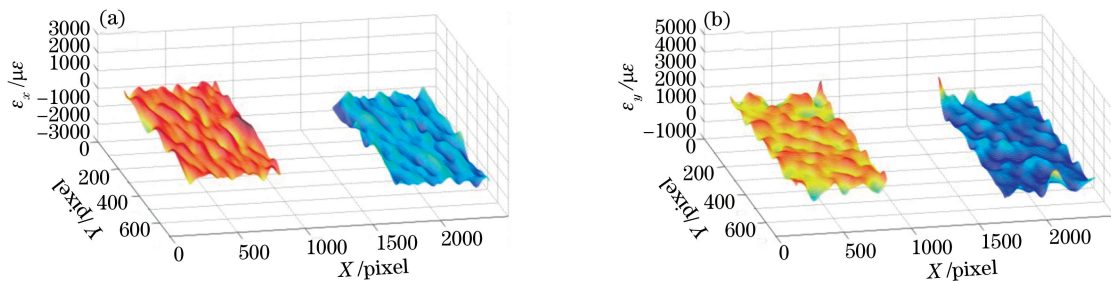


图 6 荷载为 7.0 kN 时的应变场结果。(a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

Fig. 6 Strain fields under load of 7.0 kN. (a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

对其他荷载下的图像作同样的处理,得到了改进的二维 DIC 方法与普通三维 DIC 方法求得的荷载-应变曲线,如图 7(a)所示。图 7(b)为这两种方法与电测法之间的测量误差,相应的误差统计结果如表 1 所示。由此可知,三维 DIC 方法的轴向应变

精度与电测法比较接近,而横向应变则差异显著;改进的二维 DIC 无论是轴向应变还是横向应变都与电测法非常吻合。该实验验证了改进的二维 DIC 方法对于均匀变形而言能达到较高的应变测量精度。

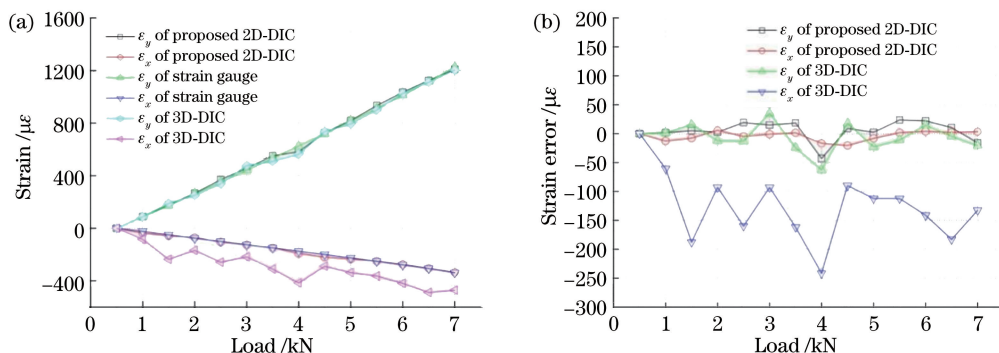


图 7 1号试样应变结果。(a)双向应变;(b)三维 DIC 方法和改进的二维 DIC 方法与电测方法之间的测量误差

Fig. 7 Strain results of specimen 1. (a) Biaxial strains; (b) measurement errors of 3D-DIC method and proposed 2D-DIC method compared with strain gauges

表 1 三维 DIC 方法和改进的二维 DIC 方法与电测方法之间的误差统计结果

Table 1 Statistics of measurement errors of 3D-DIC method and proposed 2D-DIC method compared with strain gauges

Strain	Proposed 2D-DIC		3D-DIC	
	Mean error	Standard deviation	Mean error	Standard deviation
$\epsilon_y / \mu\epsilon$	5	17	-6	24
$\epsilon_x / \mu\epsilon$	-4	8	-126	60

4.2 非均匀应变场

利用二维 DIC 方法对图 4(b)所示的试样区域进行变形计算,得到了图 8 所示的位移场。由图 8(a)的水平位移场 U 可知,左图像整体向左移动,而右图像则整体向右移动。在图 8(b)竖直位移场 V 中,左右图像均向上移动,只是移动的幅度不

同。若将左侧数据镜像到右侧,可以发现二者只相差了一个刚体位移场,而该位移场则是由试样的离面刚体位移所引起的。根据上述位移场就能得到试样水平方向和竖直方向的应变场 ϵ_x 和 ϵ_y ,如图 9 所示。由图 9 可知,无论是 ϵ_x 还是 ϵ_y ,其左右数据的分布情况大体相似,其不同之处在于离面刚体位移的存在使得左侧数据偏大,而右侧数据偏小。将应变场中的左右对应点数据作平均处理,并以云图形式显示于右图像中,便可得到图 10 所示的应变场结果。

由于本实验中的试样属于非均匀变形,缺少准确的全场应变实测结果来验证上述数据的合理性,因此,采用数值模拟即有限元(FEM)软件的分析结果作为参考。根据图 7(a)的电测结果,得到弹性模量和泊松比,输入到 ANSYS 软件中,得到图 11 所示的应变场分布图。比较图 10 与图 11 的应变结果,发现改进的二维 DIC 方法得到的应变场分布与

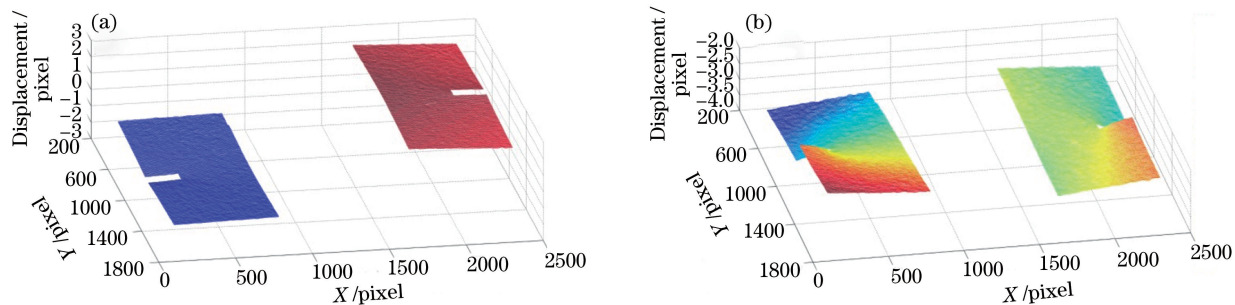


图 8 试件 2 的位移场结果。(a) U ; (b) V

Fig. 8 Displacement fields of specimen 2. (a) U ; (b) V

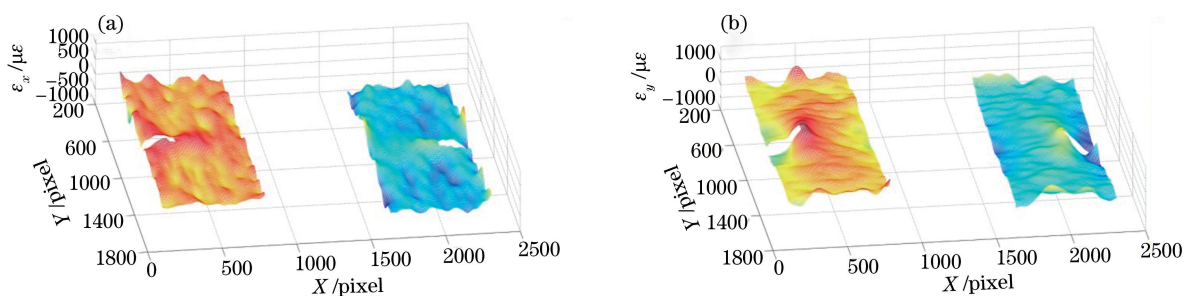


图 9 试件 2 的应变场结果。(a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

Fig. 9 Strain fields of specimen 2. (a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

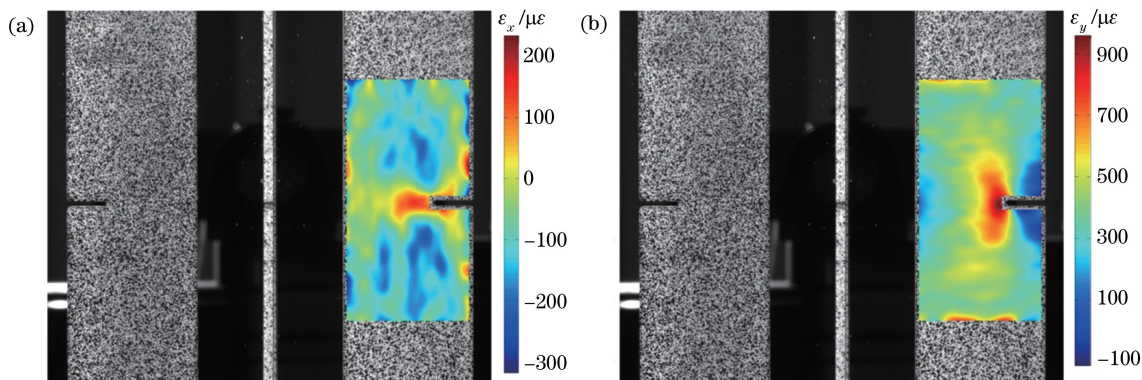


图 10 用改进的二维 DIC 方法测得的试件 2 的应变场。(a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

Fig. 10 Strain fields of specimen 2 obtained using proposed 2D-DIC. (a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

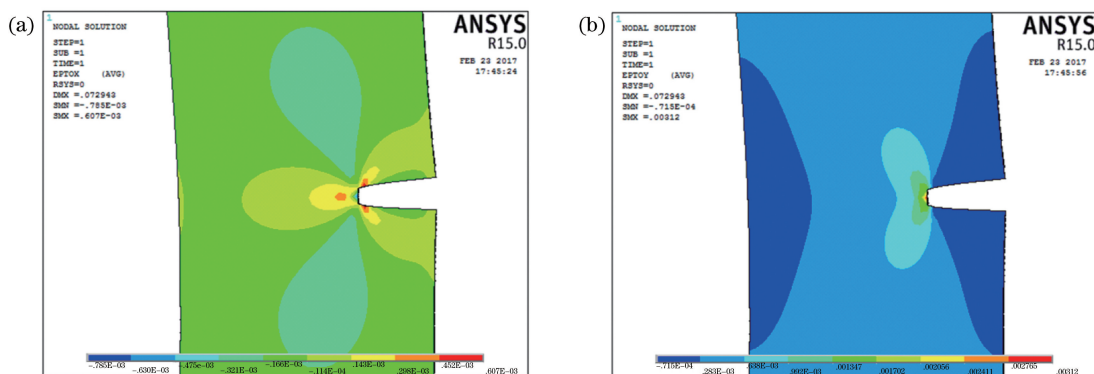


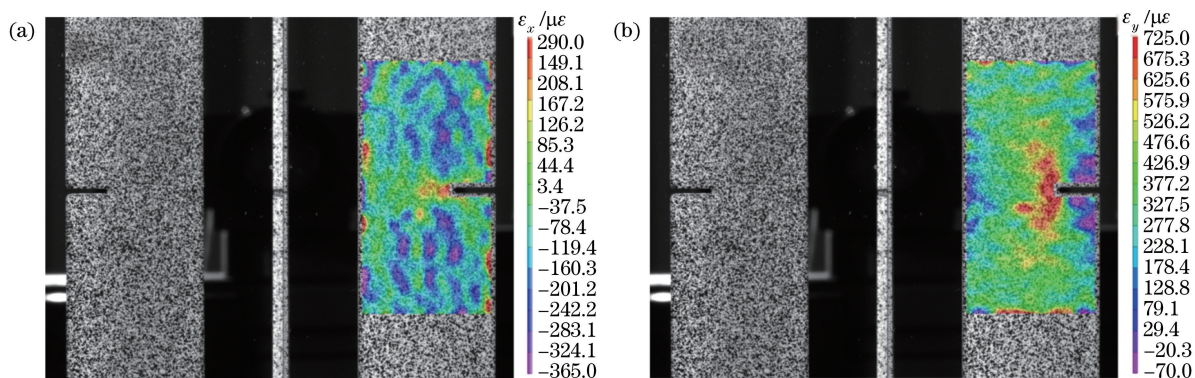
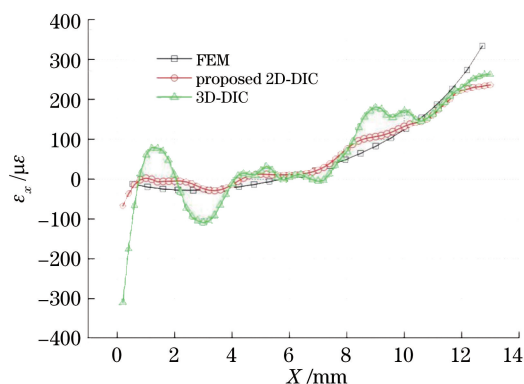
图 11 用 FEM 得到的应变场结果。(a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

Fig. 11 Strain fields obtained using FEM. (a) ϵ_x ; (b) ϵ_y

FEM 基本吻合,其差异在于横缝附近的结果有所不同。横缝边界的 DIC 子区散斑信息不足,会导致计算精度降低,因此并未计算该部分的变形。改进的二维 DIC 方法得到的 ϵ_x 场数值范围为 $[-300, 225]$, ϵ_y 场数值范围为 $[-100, 950]$, 单位为 $\mu\epsilon$, 在不考虑图 11 中横缝附近数据时,其结果大致与 FEM 的结果相符。图 12 为三维 DIC 方法得到的应变场 ϵ_x 和 ϵ_y 。为了定量比较 DIC 方法的精度,将图 4(b)中横缝左侧 AB 线上的应变 ϵ_x 提取出来,如图 13 所示,在靠近横缝处,两种 DIC 方法的应变都小于 FEM,原因在于 DIC 应变窗口为 15×15 个计

算点,具有较严重的平滑效应。比较图 10~13 可知,改进的二维 DIC 方法的应变测量精度较三维 DIC 方法要好一些。需要注意的是,在本文实验中,左相机呈垂直布置,限制了三维 DIC 方法的相机夹角(17° 左右),并在一定程度上降低了三维 DIC 方法对离面位移的灵敏度;若调整左相机以增大双相机之间的夹角,虽会增大其对离面位移的灵敏度,但左右相机的子区匹配精度会略有下降,故整体上给三维 DIC 方法应变精度带来的提升有限。

通过前面两个实验的分析可知,无论是均匀应变场还是非均匀应变场,改进的二维 DIC 方法都可

图 12 三维 DIC 方法测得的应变场结果。(a) ϵ_x ; (b) ϵ_y Fig. 12 Strain fields obtained using 3D-DIC method. (a) ϵ_x ; (b) ϵ_y 图 13 3 种方法得到的 AB 线上 ϵ_x 的分布Fig. 13 ϵ_x along line AB obtained using three methods

以得到较为准确的应变场结果,且在小角度的双相机夹角条件下,可以得到比三维 DIC 方法更高的应变精度。三维 DIC 方法在测量时,需要进行复杂的系统标定,且左右相机匹配计算量较大,而改进的二维 DIC 方法仅采用一个相机,在测量应变时无需进行标定,匹配过程较简单,是一种简便的高精度应变测量方法。在前面计算中,只考虑了左右图像在水平方向的对称特性。其实在竖直方向上,左右图像难以严格对应。通过比较图 4(b)中左右横缝的位置,发现在竖直方向上有 5 pixel 的偏差。由于试样处于小变形情形,且变形具有连续性,为方便起见,忽略该偏差造成的影响。若在划分计算点时,能考虑到这 5 pixel 的偏差,其应变测量精度应该更高。

5 结 论

本文基于双 45° 反射镜成像技术,提出了一种改进的二维 DIC 方法,通过试样正反面虚假应变的互相自补偿,减小了离面刚体位移对应变精度的影响。开展了两类试样的拉伸实验来验证该方法的可行性。对均匀变形场的双向应变测量结果表明:改进的二维 DIC 方法无论是横向应变还是轴向应变

都与电测法吻合较好,且在横向应变测量精度方面的表现要优于三维 DIC 方法(文中三维 DIC 方法双相机夹角为 17°)。对于非均匀变形,与 ANSYS 分析结果对比表明:改进的二维 DIC 方法得到的水平与竖直方向的应变场均与 FEM 的结果一致,且略好于三维 DIC 方法的结果。改进的二维 DIC 方法能够自动抵消离面刚体位移对应变场的影响,且能获得较准确的应变场测量结果;此外,该方法在测量时只需使用一台相机,是一种便捷、有效、高精度的应变测量方法。

参 考 文 献

- [1] Sun P Y, Zhu Z K, Su C Y, *et al.* Experimental characterisation of mechanical behaviour for a TA2 welded joint using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115: 161-171.
- [2] Zhu F P, Gong Y, Bai P X, *et al.* Determination of tensile stress-strain curve of brittle materials based on two-dimensional digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3): 333-342. 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于二维 DIC 的脆性材料拉伸应力—应变曲线测定[J]. *实验力学*, 2018, 33(3): 333-342.
- [3] Chen Z N, Shao X X, Wu J L, *et al.* Full-field deformation measurement of human carotid artery based on water transfer printing speckle patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312004. 陈振宁, 邵新星, 吴家林, 等. 水转印数字散斑场用于人体颈动脉全场测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312004.
- [4] Ge P X, Ye P, Li G H. Application of digital image correlation method based on genetic algorithm in micro-displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0612006. 葛朋祥, 叶沛, 李桂华. 基于遗传算法的数字图像相关法在微位移测量中的应用[J]. *光学学报*, 2018,

- 38(6): 0612006.
- [5] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19082-19093.
- [6] Wu R, Kong C, Li K, *et al.* Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement [J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(5): 833-843.
- [7] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, *et al.* The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10): 746-757.
- [8] Dai X L, Xie H M, Wang H X. Analysis of the error caused by off-plane displacement in two-dimensional digital image correlation measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1): 10-19.
戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. 实验力学, 2013, 28(1): 10-19.
- [9] Hoult N A, Andy Take W, Lee C, *et al.* Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using digital image correlation [J]. Engineering Structures, 2013, 46: 718-726.
- [10] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 28-37.
- [11] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses: implementation of a generalized compensation method[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(2): 025001.
- [12] Wang Z, Fang F, Liu B, *et al.* An experimental method for eliminating effect of rigid out-of-plane motion on 2D-DIC [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73: 137-142.
- [13] Zhu F P, Bai P X, Shi H J, *et al.* Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 065007.
- [14] Zhu F P, Gong Y, Bai P X, *et al.* Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1061-1069.
朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1061-1069.
- [15] Dong B, Tian L, Pan B. Tensile testing of carbon fiber multifilament using an advanced video extensometer assisted by dual-reflector imaging [J]. Measurement, 2019, 138: 325-331.
- [16] Pan B, Xie H M, Guo Z Q, *et al.* Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. Optical Engineering, 2007, 46(3): 033601.