

文章编号: 1001-4888(2022)05-0621-08

一种基于预变形辅助前向加性高斯牛顿法的数字图像相关方法^{*}

叶敬晨, 计宏伟

(天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 尽管数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法已经取得了显著进展,但提高 DIC 的测量精度仍然是关键问题之一,特别是在非均匀变形条件下。本文将变形分解为预变形和后变形两部分,进而将 DIC 位移求解过程分解为两个子过程:预变形估计和后变形迭代。借助预变形辅助策略将前向加性高斯牛顿(Forward Additive Gauss-Newton, FA-GN)算法推广为 pFA-GN (Pre-deformation FA-GN, pFA-GN) 算法。数值实验结果表明,本文提出的 pFA-GN 算法显著提高了 DIC 在非均匀变形条件下的测量精度。

关键词: 数字图像相关; 预变形; 非均匀变形

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-005

0 引言

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法利用子区灰度分布对变形前后图像进行配准,进而计算试样表面的全场位移和变形,具有无损、非接触、全场测量等优势,在固体力学^[1,2]、材料科学^[3,4]以及食品科学^[5]中都得到了广泛应用。提高 DIC 算法的测试精度,一直是实验力学工作者关注的研究热点之一^[6,7]。尤其是随着 DIC 的应用领域不断扩展,复杂变形的测试需求逐渐增加,进一步提高 DIC 在复杂变形测试中的精度具有重要意义。

相关运算中描述子区变形的形函数选取是 DIC 测量精度获得显著提高的关键因素。一阶形函数^[8]使用仿射变换表征变形,在小变形测量中被广泛使用,但在大变形测量中由于严重的欠匹配而容易失效^[9]。为克服欠匹配问题,二阶形函数^[10]已被广泛应用在大变形测量中,并有效提高了大变形测量精度。虽然随着阶数的增加,形函数表征变形的能力得到增强,但同时也存在更高的过匹配风险,因此需要更大的子区尺寸^[9]。高阶形函数的另一个风险是更小的收敛半径,需要更准确的初值估计。结合梯度下降的 Levenberg-Marquard 方法^[11]具有较大的收敛半径,一定程度上降低了这种风险。动态形函数选择方法能够确定合适的形函数阶数,从而抑制单一形函数表征能力有限导致的测量误差^[12]。

一种典型的 DIC 算法是使用前向加性高斯牛顿(Forward Additive Gauss-Newton, FA-GN)方法结合鲁棒的零均值归一化平方和(ZNSSD)准则^[13],由于每次迭代都需要重新计算 Hessian 矩阵及其逆,这种方法的计算效率较低。结合反向组合的高斯牛顿迭代(Inverse Compositional Gauss-Newton, IC-GN)方法^[14,15]仅需计算一次 Hessian 矩阵,是 FA-GN 方法更高效率的版本。IC-GN 与 FA-GN 具有几乎相同的测量精度,然而相比 FA-GN 方法,IC-GN 方法要求翘曲函数始终可逆,这使其结合二阶

^{*} 收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12172254)资助

通信作者: 计宏伟(1964-),男,博士,教授。主要研究领域为实验固体力学。Email: jhwjtj@126.com

形函数应用时具有一定困难^[16]。形函数本质是位移函数在局部的低阶泰勒展开,具有有限的变形表征能力。FA-GN 算法根据图像梯度选择合适的优化方向,迭代求解最优变形。本文提出使用位移场对子区进行预变形的辅助策略,推广 FA-GN 算法为 pFA-GN 算法(Pre-deformation FA-GN, pFA-GN),在不使用更高阶形函数的同时,提高了 DIC 的非均匀变形测量能力。

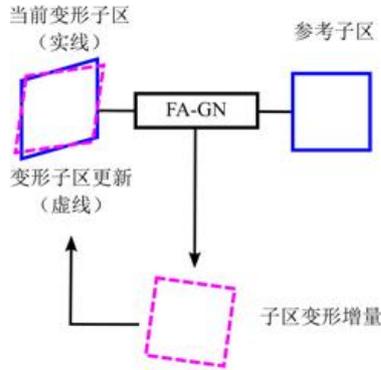


图1 FA-GN 算法计算流程图

Fig. 1 Schematic flow charts of the FA-GN algorithm

1 FA-GN 算法

图1为FA-GN算法的计算流程示意图。基于子区的DIC方法通过相关系数对变形前后子区进行匹配以计算其位移。本文采用最具代表性的零均值归一化最小平方距离(Zero-mean Normalized Sum of Squared Differences, ZNSSD)作为相关系数,其表达式为

$$C_{\text{ZNSSD}}(\Delta \mathbf{p}) = \sum_{\xi} \left\{ \frac{f(\mathbf{x}) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi; \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p})) - g_m}{\Delta g} \right\}^2 \quad (1)$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 、 $g(\mathbf{x})$ 表示参考和变形图像中 \mathbf{x} 处的灰度值; $\xi = (\Delta x, \Delta y)$ 为子区局部坐标; f_m 、 g_m 为参考和变形子区的平均灰度; Δf 和 Δg 为子区零均值二范数; $\mathbf{W}(\xi; \mathbf{p})$ 为翘曲函数; \mathbf{p} 为用于描述子区形状变化的变形矢量; $\Delta \mathbf{p}$ 为变形矢量增量。当使用不同阶数的形函数时,翘曲函数、变形矢量以及变形矢量增量具有不同的形式。使用最广泛的形函数为一阶和二阶形函数,对应的翘曲函数定义为

$$\mathbf{W}(\xi; \mathbf{p}_1) = \begin{bmatrix} u & u_x & u_y \\ v & v_x & v_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{W}(\xi; \mathbf{p}_2) = \begin{bmatrix} u & u_x & u_y & \frac{1}{2} u_{xx} & u_{xy} & \frac{1}{2} u_{yy} \\ v & v_x & v_y & \frac{1}{2} v_{xx} & v_{xy} & \frac{1}{2} v_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta x^2 \\ \Delta x \Delta y \\ \Delta y^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{p}_1 = [u \quad u_x \quad u_y \quad v \quad v_x \quad v_y]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_2 = [u \quad u_x \quad u_y \quad u_{xx} \quad u_{xy} \quad u_{yy} \quad v \quad v_x \quad v_y \quad v_{xx} \quad v_{xy} \quad v_{yy}]^T$$

在本文中,分别使用 FA-GN-1 和 FA-GN-2 表示结合一阶和二阶形函数的 FA-GN 算法。

FA-GN 算法通过优化式(1)获得亚像素变形,而相关系数关于 $\Delta \mathbf{p}$ 具有复杂的非线性关系,对子区灰度的线性化是实施 FA-GN 算法的关键之一,因此,将 $g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi; \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}))$ 在 \mathbf{p} 处泰勒展开到一阶,有

$$g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi; \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p})) = g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi; \mathbf{p})) + \nabla g \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} \quad (5)$$

式中 ∇g 为变形后图像灰度梯度。由最小二乘原理,变形矢量增量为

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{H}^{-1} \times \sum_{\xi} \left\{ \left[\nabla g \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right]^T \times \left[\frac{\Delta g}{\Delta f} (f(\mathbf{x}) - f_m) - (g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(\xi; \mathbf{p})) - g_m) \right] \right\} \quad (6)$$

式中 \mathbf{H} 为 Hessian 矩阵,具有如下形式

$$\mathbf{H} = \sum_{\xi} \left\{ \left[\nabla g \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right]^T \left[\nabla g \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right] \right\} \quad (7)$$

在得到最优的变形矢量增量 $\Delta \mathbf{p}$ 后,将其更新到变形矢量 \mathbf{p} 中

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p} \quad (8)$$

当 $\|\Delta \mathbf{p}\|_2 < 1 \times 10^{-10}$ 时, 迭代终止。

2 预变形辅助 FA-GN 算法

2.1 预变形估计

试样的真实变形由映射 $h: f \rightarrow g$ 表示, h 可以分解为两个变形的复合

$$h = h_{\text{post}} \circ h_{\text{pre}} \quad (9)$$

式中: h_{pre} 为预变形; h_{post} 称为后变形; \circ 表示变形的复合。基于该分解, DIC 的位移求解过程被分解为两个子过程: 预变形估计和后变形迭代。当预变形足够接近真实变形时, 后变形即为小变形, 而小变形的测量更容易获得高精度。

图 2 显示了变形分解的示意图。预变形将参考图像中的点 $h_{\text{pre}}^{-1}(\mathbf{x})$ 映到预变形图像 1 上的点 \mathbf{x} 处, 其灰度值通过预变形的逆映射从参考图像中获取 $f(h_{\text{pre}}^{-1}(\mathbf{x}))$ 。预变形图像 1 与变形图像之间相差的后变形为小变形, 容易计算。然而, 逆映射的计算包含较大的误差, 势必造成计算精度的损失。在实际计算时, $h_{\text{pre}}^{-1}(\mathbf{x})$ 被施加到变形图像中得到预变形图像 2, 其灰度值通过 $g(h_{\text{pre}}(\mathbf{x}))$ 获取, 避免了一次插值误差。由于预变形精度较高, h_{post} 为小变形, 此时预变形图像 2 与参考图像之间相差的变形 h_{post1} 也为小变形, 容易计算。

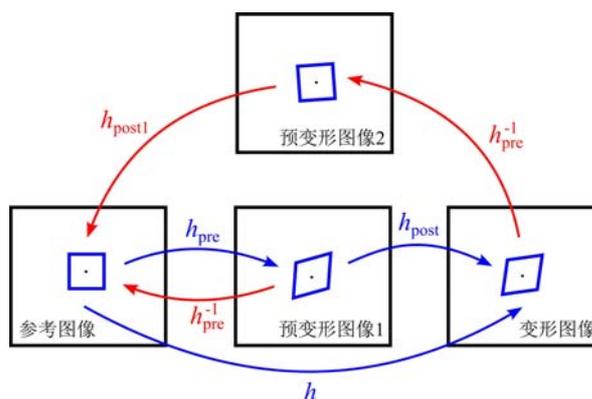


图 2 变形分解示意图

Fig. 2 Schematic charts of pre-deformation

为了得到可靠的预变形 h_{pre} , 首先使用 FA-GN 算法给出每个计算点上较为准确的位移估计, 并通过三次样条插值方法构造全场位移 u_{pre} 。通过附加位移场得到点 \mathbf{x} 处的预变形 $h_{\text{pre}}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + u_{\text{pre}}(\mathbf{x})$ 。由于 FA-GN 的精度已经较高, 预变形能够很好地近似真实变形。与形函数相比, 预变形能够更真实地反映试样的复杂变形。这使得复杂变形中无法被形函数表征的非线性成分将得以减小, 从而提高测量精度。

2.2 pFA-GN 算法

引入预变形后, 相关系数需要改写为预变形辅助的 ZNSSD (Pre-deformation ZNSSD, pZNSSD), 其定义如下

$$C_{\text{pZNSSD}}(\Delta \mathbf{p}) = \sum_{\xi} \left[\frac{f(\mathbf{x}) - f_m - g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(h_{\text{pre}}(\mathbf{x} + \xi) - h_{\text{pre}}(\mathbf{x}); \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}))}{\Delta f} - (g^{\circ} h_{\text{pre}})_m \right]^2 \quad (10)$$

子区中的点 $\mathbf{x} + \xi$ 被映射为 $h_{\text{pre}}(\mathbf{x} + \xi)$ 。翘曲函数使用子区的局部坐标表达变形, 因此需要将全局坐标 $h_{\text{pre}}(\mathbf{x} + \xi)$ 转化为局部坐标 $h_{\text{pre}}(\mathbf{x} + \xi) - h_{\text{pre}}(\mathbf{x})$ 。

与经典的 FA-GN 算法相似, 通过线性化和最小二乘原理, 可以得到变形矢量增量:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{H}^{-1} \times \sum_{\xi} \left\{ \left(\nabla (g^{\circ} h_{\text{pre}}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right)^{\text{T}} \times \left[\frac{\Delta (g^{\circ} h_{\text{pre}})}{\Delta f} (f(\mathbf{x}) - f_m) - (g(\mathbf{x} + \mathbf{W}(h_{\text{pre}}(\mathbf{x} + \xi) - h_{\text{pre}}(\mathbf{x}); \mathbf{p})) - (g^{\circ} h_{\text{pre}})_m) \right] \right\} \quad (11)$$

式中 Hessian 矩阵 \mathbf{H} 变为

$$\mathbf{H} = \sum_{\xi} \left\{ \left[\nabla (g^{\circ} h_{\text{pre}}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right]^{\text{T}} \left[\nabla (g^{\circ} h_{\text{pre}}) \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \right] \right\} \quad (12)$$

一旦得到变形矢量增量, 即可通过式(5)更新变形矢量。使用 pFA-GN-1 和 pFA-GN-2 分别表示结合一阶和二阶形函数的 pFA-GN 算法。

需要指出的是, 当预变形 h_{pre} 为恒同映射时, pZNSSD 退化为 ZNSSD, 因此, FA-GN 算法可以看作

pFA-GN 算法的一个特例,预变形的计算能够被统一在 pFA-GN 的框架下。图 3 为 pFA-GN 算法的计算流程。

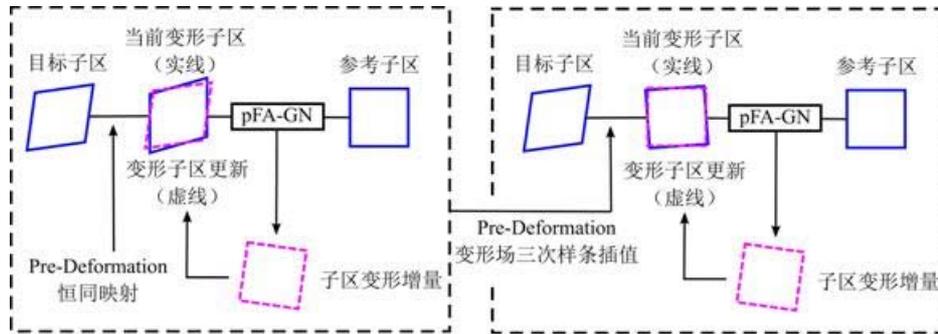


图 3 pFA-GN 算法计算流程图

Fig. 3 Schematic flow charts of the pFA-GN algorithm

3 数值模拟

为了评估 pFA-GN 算法在大变形测量中的准确性,本文通过已知实际变形的模拟散斑图像进行测试。使用由苏勇等^[17]提出的模拟散斑生成方法生成高斯散斑图像,参考图像如图 4(a)所示。散斑直径为 6pixel,散斑网格步长为 10pixel,偏移区间为 $[-6, 6]$,图像尺寸为 200pixel \times 200pixel。感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 设置为散斑图像中心 101pixel \times 101pixel 的区域,以步长为 5 均匀划分网格点,每个网格点作为计算位移的计算点。子区尺寸为 31pixel \times 31pixel 时,参考图像的自相关系数分布如图 4(b)所示。

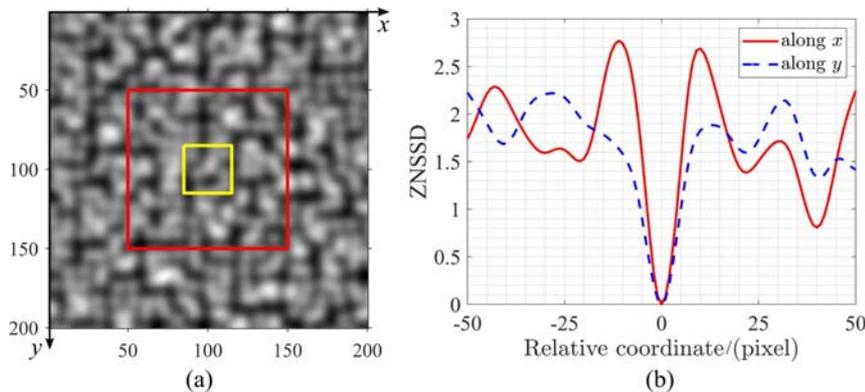


图 4 (a) 由数值方法生成的参考图像; (b) 自相关系数

Fig. 4 (a) the reference image generated by the numerical method; (b) the distribution of the self-correlation coefficient

变形图像由式(13)生成:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + a \sin(\frac{2\pi y}{100}) \\ y + a \sin(\frac{2\pi x}{100}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: a 为 0.2~2,步长为 0.2; (x', y') 是点 (x, y) 变形后的坐标。

计算误差使用绝对位移误差的平均值和标准差衡量

$$\begin{cases} d(x, y) = \sqrt{(u(x, y) - u_r(x, y))^2 + (v(x, y) - v_r(x, y))^2} \\ E_d = \frac{1}{N} \sum d(x, y) \\ S_d = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (d(x, y) - E_d)^2} \end{cases} \quad (14)$$

式中： (u, v) 为计算位移； (u_r, v_r) 为真实位移； d 为绝对位移误差； N 为计算点的个数； E_d, S_d 分别为绝对位移误差 d 的平均值与标准差。

分别采用 FA-GN-1、FA-GN-2、pFA-GN-1、pFA-GN-2 计算每个计算点的变形。在结合一阶形函数的算法中，子区大小设置为 $31\text{pixel} \times 31\text{pixel}$ 。由于二阶形函数通常需要更大的子区尺寸，因此在结合一阶形函数的算法中，子区大小设置为 $61\text{pixel} \times 61\text{pixel}$ 。在非均匀变形中，FA-GN-2 的误差显著低于 FA-GN-1，其原因是一阶形函数在非均匀变形中欠匹配问题严重，误差较大。为了充分发挥 pFA-GN 算法的优势，采用 FA-GN-2 计算预变形 h_{pre} 。图 5(a) 显示了测量误差与变形参数 a 之间的关系。在变形较小时，四种算法表现出相似的计算误差。随着非均匀变形程度的加深，pFA-GN 方法表现出更高的精度。pFA-GN-1 和 pFA-GN-2 都能够提高 FA-GN 算法的精度。pFA-GN-1 的误差几乎是 FA-GN-2 误差的一半，这是因为预变形的引入表达了无法由形函数表达的部分非线性变形成分。与 pFA-GN-1 相比，pFA-GN-2 表现出更大的误差均值和标准差，这很有可能是由于预变形与二阶形函数复合导致了较高的过匹配，使算法收敛陷入局部最优解。图 5(b) 统计了每次计算的平均迭代次数，可以看出，pFA-GN 和 FA-GN 所需的迭代次数相近。由于 pFA-GN 是基于 FA-GN 的结果进行计算的，实际的计算成本是两者的总和。图 6 显示了典型的变形图像 ($a=2$) 及其测量结果。

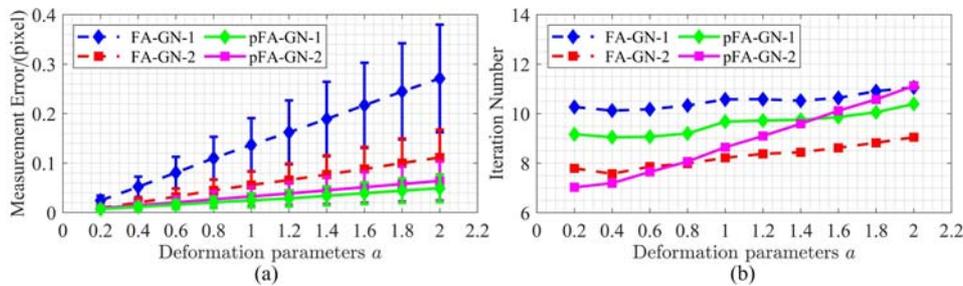


图 5 (a) 平均测量误差；(b) 平均迭代次数

Fig. 5 (a) mean measurement error; (b) mean iteration number

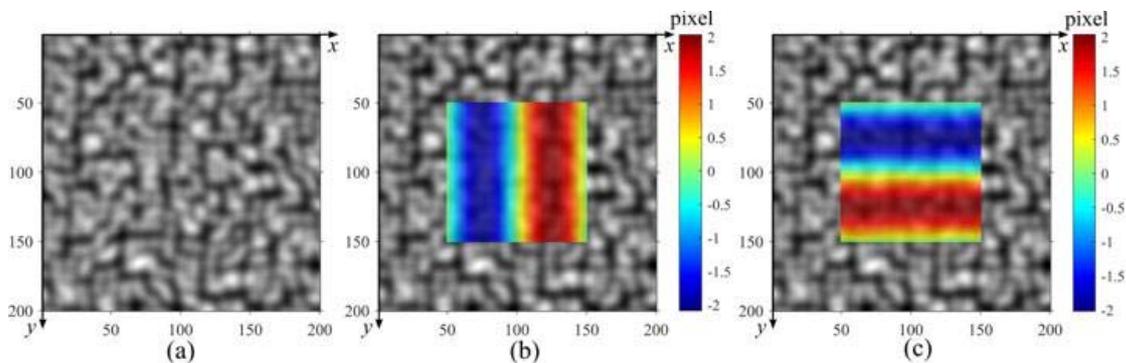


图 6 (a) 变形图像 ($a=2$)；(b) u -位移场；(c) v -位移场

Fig. 6 (a) deformation image ($a=2$)；(b) u -displacement field；(c) v -displacement field

预变形存在的偏差将被引入后续的迭代过程中，因此在小变形中，pFA-GN 的表现反而更差。为了直观显示这种情况，本文通过一组已知位移的亚像素平移实验评估 pFA-GN 在小变形中的准确性。给定的变形由式(15)表示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y + a \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中： a 为 $0 \sim 1$ ，步长为 0.1 。

使用相同的计算参数测量每个计算点的变形，并评估测量误差。图 7 显示了测量误差与变形参数 a 的关系，可见，在小变形中，pFA-GN 表现出更大的测量误差。

在复杂变形中，形函数欠匹配是测量误差的主要来源，预变形策略有效克服了这一点，其本身的误差对测量精度影响较小。在小变形中，由于不存在形函数欠匹配问题，预变形中的误差成为影响测量精

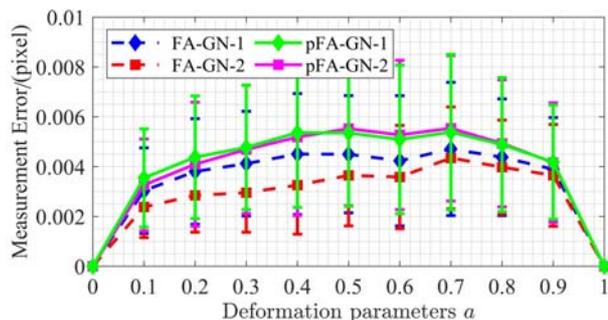


图7 平移实验中的测量误差

Fig. 7 Measurement error in translate experiment

度的主要因素,会造成误差的放大,因此本文建议仅在复杂的非均匀变形中使用 pFA-GN 方法。

4 实验验证

和数值模拟相比,真实实验会受到散斑质量不可控、噪声等不利因素的影响。为了验证本文方法在真实实验中应用的可行性,对预制裂纹的铝合金紧凑拉伸试样进行拉伸实验,试样尺寸如图 8(a)所示,厚度为 5mm。实验加载速率为 1mm/min,使用分辨率为 1024pixel \times 1024pixel 的 CCD 相机采集图像,采集频率为 10fps。分别选择载荷为 0.74kN 和 8.96kN 时对应的图像作为参考图像和变形图像,感兴趣区域选择为裂纹尖端附近的矩形区域,如图 8(b)所示。

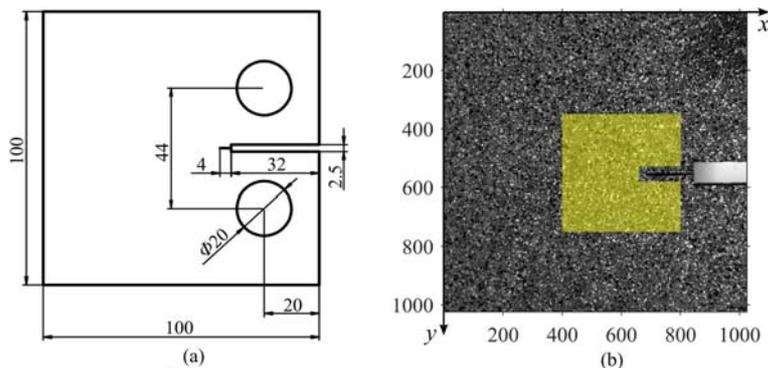
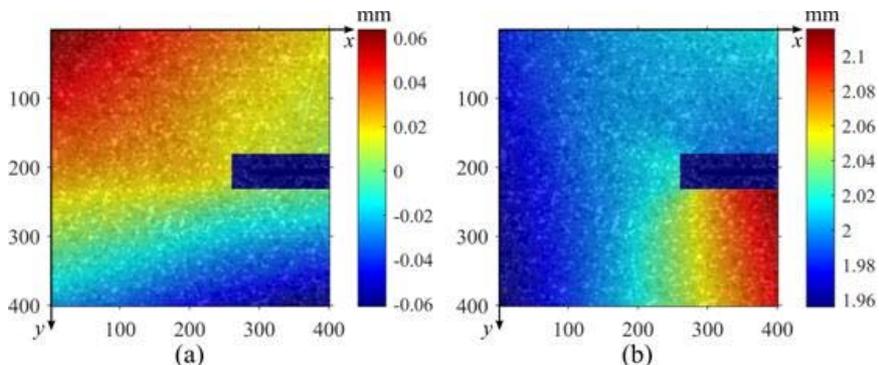


图8 (a) 预制裂纹的铝合金试样(单位:mm); (b) 参考图像与感兴趣区域(单位:pixel)

Fig. 8 (a) aluminum alloy specimen with preset crack(unit: mm); (b) reference image and the roi area(unit: pixel)

图9 裂纹尖端位移场:(a) u -位移场;(b) v -位移场Fig. 9 Crack tip displacement field: (a) u -displacement field; (b) v -displacement field

使用 FA-GN-2 得到预变形,再使用 pFA-GN-1 进行计算,在数值实验的结果中,这种方式得到的精度最高。计算参数与数值实验中的设置一致,计算结果如图 9 所示。在拉伸初期,试样存在一段明显的刚体位移,这使得 y 方向的位移总体为正。预制裂纹在拉伸作用下逐渐张开,因此裂纹上方的位移明显小于裂纹下方位移。由于加工误差,载荷并非完全垂直于裂纹,这导致了位移场并非完全对称。总

体来看,pFA-GN的计算结果与裂纹尖端位移的分布规律相一致,从而验证了本文方法在真实实验中的可行性。

5 结论

针对复杂变形测量问题,本文开发了预变形辅助的 pFA-GN 方法。预变形的引入使得形函数描述的子区变形与其真实变形的差异得到一定消除。数值实验表明,pFA-GN 方法显著提高了 DIC 在复杂变形中的测量精度。pFA-GN 方法作为 FA-GN 方法的一种推广,在进一步提高 DIC 方法的大变形测量精度方面具有潜力,有望在 DIC 中获得广泛使用。

参考文献:

- [1] Golewski G L. Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash thanks to use of Digital Image Correlation (DIC) method[J]. *Measurement*, 2019, 135:96–105.
- [2] Zhao T, Zhang W, Gu S, et al. Study on fracture mechanics of granite based on digital speckle correlation method [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 193:192–199.
- [3] Zhang X, Wang Y, Yang J, et al. Deformation analysis of ferrite/pearlite banded structure under uniaxial tension using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85:24–28.
- [4] Wang X, Ma S, Zhao Y, et al. Observation of damage evolution in polymer bonded explosives using acoustic emission and digital image correlation[J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(8):861–866.
- [5] Zhang X, Chu X, Ji H, et al. Effect of freezing rate on the onion cell deformation evaluated by digital image correlation[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(11):3125–3132.
- [6] 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(4):97–107 (PAN Bing, YU Liping, WU Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4):97–107 (in Chinese))
- [7] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):305–325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):305–325 (in Chinese))
- [8] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8):1613–1620.
- [9] Xu X, Su Y, Cai Y, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(8):1575–1590.
- [10] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4):393–400.
- [11] Chen B, Jungstedt E. Fast and large-converge-radius inverse compositional Levenberg-Marquardt algorithm for digital image correlation: principle, validation, and open-source toolbox[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151:106930.
- [12] Yang X, Chen X, Xi J. Error suppression for speckle correlation-based 3D shape measurement via dynamic shape function selection[J]. *Optics Communications*, 2022, 508:127584.
- [13] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65:73–80.
- [14] Pan B, Li K, Tong W. Fast, robust and accurate digital Image correlation calculation without redundant computations[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(7):1277–1289.
- [15] Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 71:9–19.
- [16] Bai R, Jiang H, Lei Z, et al. A novel 2nd-order shape function based digital image correlation method for large deformation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90:48–58.
- [17] Su Y, Zhang Q. Glare: a free and open-source software for generation and assessment of digital speckle pattern [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 148:106766.

A digital image correlation method based on pre-deformation forward additive gauss-newton method

YE Jingchen, JI Hongwei

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Although digital image correlation (DIC) has made significant progress, further improving the measurement accuracy of DIC is still one of the focuses, especially under non-uniform deformation. This paper decomposes the deformation into pre-deformation and post-deformation, and then the DIC displacement solution process will be decomposed into two sub-processes, pre-deformation estimation and post-deformation iteration. Forward Additive Gauss-Newton (FA-GN) algorithm is generalized as Pre-deformation FA-GN (pFA-GN) algorithm by means of pre-deformation assistance strategy. Numerical experiment results show that the proposed pFA-GN algorithm significantly improves the measurement accuracy of DIC under non-uniform deformation.

Keywords: digital image correlation; pre-deformation; non-uniform deformation