

数字体图像相关方法中的残余灰度场计算研究

潘兵^{1*}, 张轩豪¹, 王龙²¹北京航空航天大学航空科学与工程学院强度与结构完整性全国重点实验室, 北京 100191;²北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076

摘要 残余灰度场是变形前后数字体图像中对应体素点的灰度之差。在基于有限单元的全局数字体图像相关(DVC)方法中,残余灰度场作为计算区域各体素点匹配质量的目标函数,可直接计算获得,并可用于材料内部损伤演化或裂纹扩展的精细表征。然而,当前广泛使用的基于图像子体块的局部DVC只能获得计算区域内各离散计算点的位移、应变和相关系数信息,无法直接计算区域内各体素点的残余灰度。相较于相关系数和变形信息,残余灰度场可实现逐体素的匹配质量评价,在内部损伤或裂纹扩展的可视化观测和准确定位方面具有显著优势。为能在局部DVC中获得残余灰度场信息,提出一种简单有效的残余灰度场计算方法。该方法基于三维Delaunay四面体剖分算法,并利用有限元框架对局部DVC离散计算结果进行稠密插值,以获取逐体素连续位移场,并将其用于变形体图像校正。模拟和真实实验结果表明,基于局部DVC测量结果后处理计算获得的残余灰度场不仅可以实现精准的损伤定位,还能观测到裂纹形貌以及界面脱黏行为。所提方法弥补了当前局部DVC在精细化匹配质量评价方面的不足,有望拓展该方法在材料和结构内部损伤观测和定位中的应用。

关键词 三维图像处理; 数字体图像相关方法; 残余灰度场; 内部损伤观测与定位

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230987

1 引言

数字体图像相关(DVC)方法^[1-3]是一种可测量物体内部三维全场变形的先进实验力学测试技术,该方法通过比较由数字体成像设备[如X射线CT(computed tomography)]记录的被测对象在不同状态下的两组数字体图像来获取其内部三维全场位移和应变。根据图像匹配策略的不同,已有的DVC算法分为局部DVC和全局DVC。局部DVC通过图像子体块匹配实现离散位移场测量,是二维数字图像相关方法的三维拓展^[4]。经过众多学者20多年对其核心算法^[5-7]、算法细节和关键参数选择^[8-10]的深入研究和持续改进,局部DVC已经具备较高的计算精准度和效率。与此同时,部分研究者将有限元方法与DVC方法相结合,发展了基于有限元的全局DVC方法^[11]。全局DVC可以保证全场位移的连续性,但由于其算法实现复杂、计算量大且在普通场景下精度没有特别优势^[12],目前局部DVC方法仍作为主流DVC算法,并广泛用于学术研究及商业DVC软件中^[3]。

局部DVC方法利用互相关算法跟踪感兴趣区域(VOI)中各离散计算点的位移以获取全场位移。为此,首先要以每个计算点为中心建立参考子体块

(subvolume),并在变形体图像中搜索与其相似性最大的目标子体块,以获得参考子体块中心点(即计算点)的位移矢量。其中,局部DVC计算所获得的相关系数反映了参考子体块与目标变形子体块的匹配质量,对于取值范围为 $[-1, 1]$ 的零均值归一化互相关(ZNCC)系数而言,其值越大,匹配质量越高。然而,相关系数反映的是整个子体块而非单个体素点的匹配质量,因此相关系数存在类似于盒形滤波的模糊效应^[13]。当利用ZNCC系数分布来观察材料内部损伤时,尽管损伤会导致附近计算点的匹配质量变差,但由于模糊效应的存在,ZNCC系数无法精准揭示其出现位置。在基于有限元的全局DVC方法中,常将灰度差平方和(SSD)作为评价变形前后VOI内所有体素点相似性的目标函数,对其进行优化后可直接获得所有点的位移和灰度之差,即残余灰度场,该残余灰度场可直接用于评价各体素点的匹配质量。通常,材料内部损伤会造成变形前后对应体素点间较大的灰度变化,因此较高的残余灰度可以反映出损伤发生位置^[14]。相较于相关系数场,残余灰度场作为一种逐体素的匹配质量评价指标,可显现体素级空间分辨率的灰度差异,因而能实现更加精准的损伤观察和定位。

在全局DVC中,残余灰度场已成功应用于裂缝

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-08-21; 录用日期: 2023-10-23; 网络首发日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(11925202)

通信作者: *panb@buaa.edu.cn

面^[15-16]以及界面脱黏^[17]等内部损伤的检测。与全局 DVC 相比,局部 DVC 显然缺少一种能实现内部损伤可视化观测和准确定位的逐体素、精细化的匹配质量评价指标,因此在局部 DVC 方法中实现残余灰度场计算对于弥补其在精细化匹配质量评价方面的不足、拓展其应用功能来说毫无疑问是有价值的。

残余灰度场通过参考体图像与经过位移校正的变形体图像灰度相减计算得到,其计算的关键在于利用逐体素的连续位移场校正变形体图像。在全局 DVC 中,所采用的有限元框架可保证全场位移的连续性,此外,通过结合节点位移和单元形状函数可插值计算得到每个体素点的位移。但局部 DVC 是基于相互独立的离散点进行相关计算的,并非像全局 DVC 那样基于有限元网格组织的节点,其所测量的位移场实质上是离散计算点的位移,且并没有任何位移连续性约束。因此,由局部 DVC 测得的离散位移结果无法直接用于计算残余灰度场。最近,Chateau 等^[18]发展了一种基于局部 DVC 的图像相减法,利用参考体图像与校正后的变形体图像作差计算相减图像,用于检测轻质混凝土中的微裂纹。相减图像与残余灰度场在本质上类似,只是实现方式略有不同,它利用一种局部仿射变换算法来估计逐体素位移场,用以校正变形体图像。然而由于缺乏考虑局部连续性,该近似方法估计的逐体素位移场在子体块边缘可能会出现位移不连续。这种位移不连续同样会导致相减图像的灰度升高,从而造成不准确的内部损伤定位。

本文针对当前局部 DVC 在匹配质量精细化评价方面的不足,提出了一种简单有效的残余灰度场计算方法。该方法的核心思想是利用基于有限元网格的稠密插值算法对局部 DVC 得到的稀疏位移场进行插值,以获得逐体素的连续位移场,随后利用三次 B 样条插值方法对变形体图像进行精准校正。此外,考虑到体成像过程中体图像不可避免的灰度线性变化,在计算残余灰度场时还考虑了各体素点灰度的线性校正。最后,通过 I 型裂纹数值模拟实验和球墨铸铁真实拉伸实验证明了所提残余灰度场计算方法的有效性以及其

在内部损伤观测和定位方面的可行性。

2 DVC 中的残余灰度场计算基本原理

所提残余灰度场计算方法实质上是对局部 DVC 测量结果的一种后处理方法。接下来,首先简述局部 DVC 算法的基本原理;随后,详细介绍局部 DVC 中残余灰度场的计算方法以及获取逐体素 DVC 数据的稠密插值方法。为便于描述,后文中的 DVC 都指局部 DVC。

2.1 DVC 基本原理

如图 1 所示,在 DVC 方法实现过程中,首先在参考体图像中选取感兴趣计算区域,并按照设定的计算步长将其划分为虚拟网格,均匀分布的网格点为离散计算点。为准确测量各计算点的三维位移矢量,以计算点 $x_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 为中心,选择合适尺寸的立方体参考子体块作为位移跟踪的对象,并按照某一相似性准则在变形体图像中寻找具有最大灰度相似度的目标子体块,其中心点为 $x'_0 = (x'_0, y'_0, z'_0)$,变形前后中心点位置变化即为该计算点的位移矢量 $d(x_0)$ 。

为定量评价参考子体块和目标子体块的灰度相似性,常采用对目标子体块灰度线性变化不敏感的零均值归一化最小平方距离相关函数(ZNSSD),表示为

$$C_{\text{ZNSSD}}(\boldsymbol{p}) = \sum_{(x_i, y_i, z_i) \in \xi} \left\{ \frac{[f(x_i, y_i, z_i) - \bar{f}]}{\sqrt{\sum_{\xi} [f(x_i, y_i, z_i) - \bar{f}]^2}} - \frac{[g(x'_i, y'_i, z'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{\xi} [g(x'_i, y'_i, z'_i) - \bar{g}]^2}} \right\}^2, \quad (1)$$

式中: ξ 表示以计算点 (x_0, y_0, z_0) 为中心的立方体参考体图像子体块; $f(x_i, y_i, z_i)$ 表示位于参考子体块内部的第 i 个体素点 (x_i, y_i, z_i) 的灰度值,其在变形图像子体块中的对应体素点 (x'_i, y'_i, z'_i) 的灰度值表示为 $g(x'_i, y'_i, z'_i)$; \bar{f} 和 \bar{g} 分别表示参考体图像子体块和变形

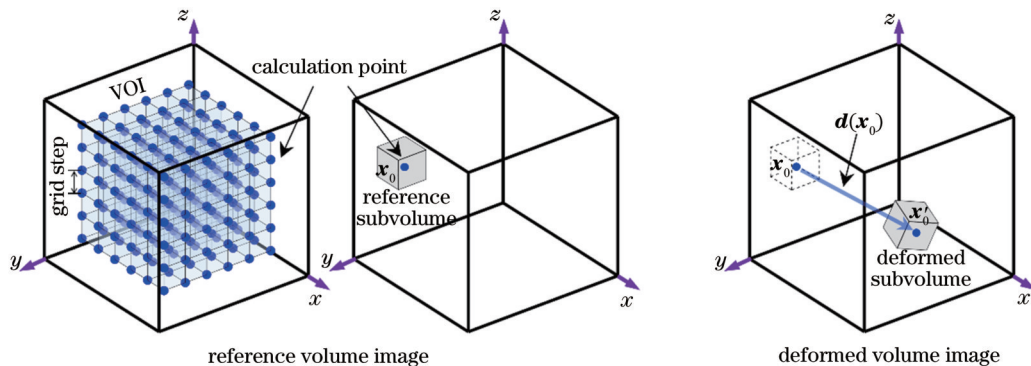


图 1 DVC 基本原理

Fig. 1 Basic principle of DVC

体图像子体块的灰度平均值； $p = (u, u_x, u_y, u_z, v, v_x, v_y, v_z, w, w_x, w_y, w_z)$ ，表示待求的变形参数矢量，其中， u, v, w 是目标图像子体块中心在 x, y, z 方向上的位移， $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$ 是该子体块的位移梯度。

为描述目标子体块相对于参考子体块的位置和形状变化，需利用形函数来描述目标子体块内的局部变形。常用的一阶位移形函数定义为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中： $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 表示体素点 (x_i, y_i, z_i) 在以参考体图像子体块中心点 (x_0, y_0, z_0) 为原点的局部坐标系中的局部坐标。

式(1)为变形参数矢量的非线性函数，需要利用一种初值估计算法和非线性迭代优化算法，如三维反向组合高斯-牛顿(3D IC-GN)算法^[7]，对其进行迭代优化，从而获得各计算点的三维变形矢量 p 。有关 DVC 算法的详细信息可参考文献[1, 3, 19]，此处不作赘述。

2.2 考虑体图像灰度线性变化的残余灰度场计算

残余灰度场是参考体图像 $f(x, y, z)$ 和全场校正后的变形体图像 $g(x', y', z')$ 中对应体素点之间灰度差的绝对值，其数学定义为

$$r(x, y, z) = |f(x, y, z) - g(x', y', z')|. \quad (3)$$

由于体成像过程中变形后体图像中各体素点的灰度不可避免地会出现变化，残余灰度场的计算需要考虑并校正目标体图像灰度变化的影响。进一步考虑体图像灰度线性变化后的残余灰度场表示为

$$r(x, y, z) = |f(x, y, z) - [a(x, y, z) \times g(x', y', z') + b(x, y, z)]|, \quad (4)$$

式中： $a(x, y, z)$ 和 $b(x, y, z)$ 分别是用于校正体图像各体素点对比度和亮度的线性校正系数。

考虑到计算效率，实际 DVC 计算中的计算步长通常设置为大于 1。DVC 获得的离散计算点位移矢量 $d(x_0, y_0, z_0)$ 通常是对全场位移的稀疏抽样估计，而非计算参考体图像中 VOI 内的所有体素点。因此，需要进行稠密插值以获得 VOI 中逐体素的连续位移场 $d(x, y, z)$ 。之后的全场变形校正实际上就是利用逐体素的位移场确定对应体素点在变形体图像中的位置并估计其灰度。由于变形后的对应体素点通常位于变形体图像中的亚体素位置，因此还需要进行灰度插值。

另外，利用 3D IC-GN 算法对 ZNSSD 进行优化后，计算点 (x_0, y_0, z_0) 的灰度变化校正系数。该系数可通过对目标图像子体块和参考图像子体块的灰度进行线性回归^[20] 计算得到，具体表示为

$$\begin{cases} a(x_0, y_0, z_0) = \frac{\sum_{\xi} [f(x_i, y_i, z_i) - \bar{f}] \cdot [g(x'_i, y'_i, z'_i) - \bar{g}]}{\sum_{\xi} [g(x'_i, y'_i, z'_i) - \bar{g}]^2}, \\ b(x_0, y_0, z_0) = \bar{f} - a(x_0, y_0, z_0) \bar{g} \end{cases}, \quad (5)$$

式中， $g(x'_i, y'_i, z'_i)$ 和 \bar{g} 可在每一点的 DVC 迭代优化后计算得到，因此，校正系数的计算可嵌入到 DVC 程序中以提高计算效率。同样， $a(x_0, y_0, z_0)$ 和 $b(x_0, y_0, z_0)$ 也

是对全场灰度变化的稀疏抽样估计，各体素点的灰度变化校正系数 $a(x, y, z)$ 和 $b(x, y, z)$ 也需要进行稠密插值来获得。残余灰度场的计算流程如图 2 所示。

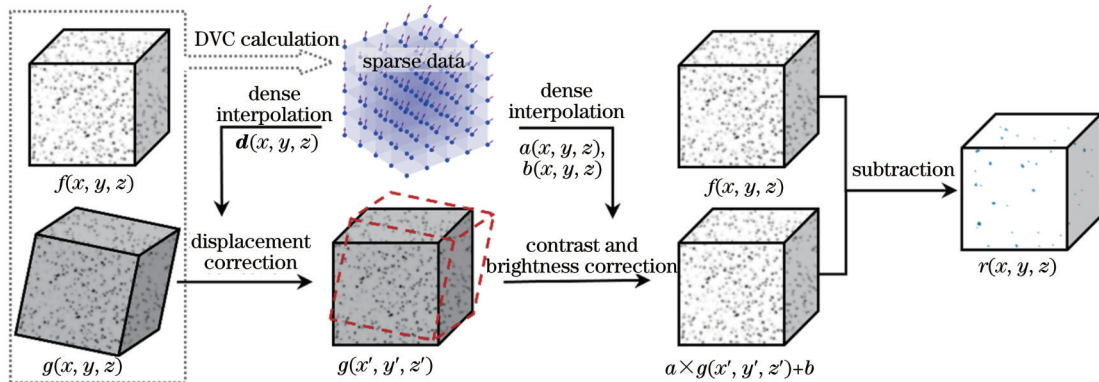


图 2 残余灰度场计算流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the gray level residual field calculation process

2.3 逐体素数据获取

基于 DVC 计算的稀疏离散数据(包括位移矢量和灰度校正系数),提出基于有限元网格的稠密插值方法,来计算 VOI 内每个体素点的位移 $d(x, y, z)$ 以及灰度校正系数 $a(x, y, z)$ 和 $b(x, y, z)$ 。该插值方法首先利用三维 Delaunay 四面体剖分算法^[21]连接离散计算点,生成有限元网格,然后利用四面体单元形函数插值计算出位于四面体单元内的体素点数据。由于采用了有限元网格框架,因此全场位移的连续性得到了保证。此外,常规 DVC 方法无法处理不连续区域(如,裂纹和孔洞^[22]),为了避免在这些区域中因错误的测量结果导致的插值偏差,只选择具有较高 ZNCC 系数(本文设置为大于 0.90)的计算点参与稠密插值计算。值得一提的是,三维 Delaunay 四面体剖分算法能够使非均匀分布的点生成四面体单元网格,因此,即使去除了具有低相关系数的计算点,所用插值方法依旧可以准确估计逐体素的连续数据场。

基于三维 Delaunay 四面体剖分算法的插值方法的实现包括网格化和插值两部分,其流程如图 3 所示。假设没有坏点的简单情况,图 3(a)中 8 个相邻计算点通过三维 Delaunay 四面体剖分算法连接,生成包含 6 个四面体单元的有限元网格;图 3(b)则展示了四面体单元形函数的插值原理。DVC 中的计算点被视为有限元网格中的四面体单元节点,因而四面体单元节点数据已知,结合四面体单元形函数便可插值得到单元内部体素点的数据。四面体单元形函数表示为

$$U_p = \sum_{i=1}^3 \frac{V_i}{V} U_i, \quad (6)$$

式中: U_p 表示待插值体素点 P 的数据值; U_i 表示四面体单元节点 S_i 的数据值; V_i 表示由体素点 P 和与节点 S_i 相对的平面所组成的四面体的体积(如, $V_2 = V_{P-S_1S_3S_4}$); V 表示整个四面体单元 $V_{S_1-S_2S_3S_4}$ 的体积。由于体素点之间的插值计算是相互独立的,因此该插值方法可以并行化执行,以提高计算效率。

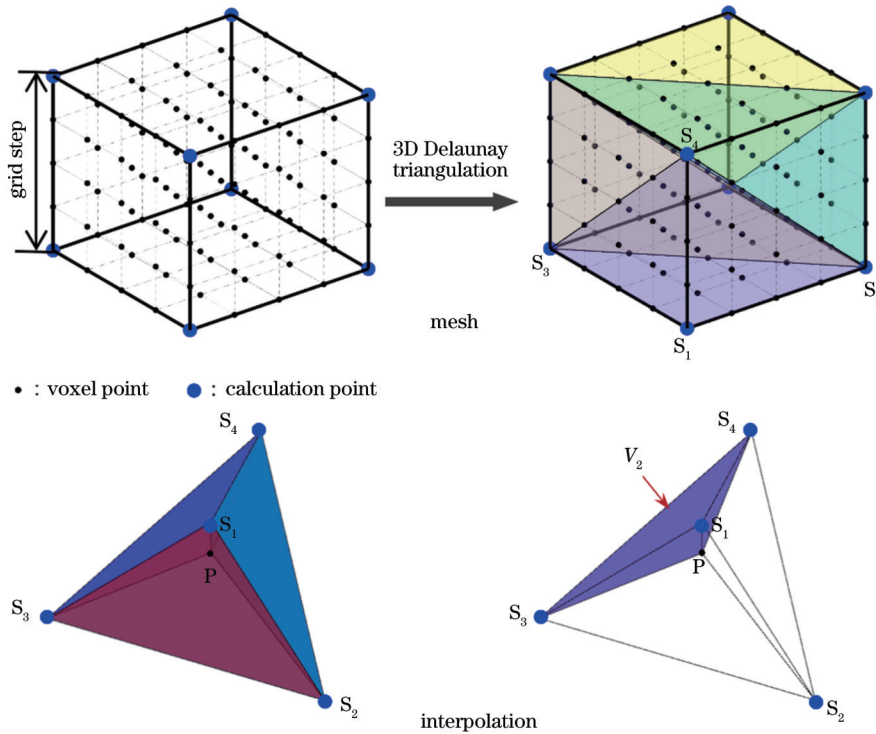


图 3 基于三维 Delaunay 四面体剖分算法的数据插值示意图

Fig. 3 Schematic diagram of data interpolation based on 3D Delaunay triangulation algorithm

在获取到参考体图像 VOI 内每个体素点的位移和灰度校正系数后,便可以计算全场校正后的变形体图像 $g(x', y', z')$ 。由于目标体素点 (x', y', z') 在变形后通常位于变形体图像中的亚体素位置,因此在计算基于 DVC 的残余灰度场时仍需要进行灰度插值。利用内存消耗更少、插值精度更高的三次 B 样条插值算法^[19, 23]来估计 $g(x', y', z')$ 。首先,在变形体图像中以待插值体素点 (x', y', z') 为中心构建一个大小为

$4 \text{ voxel} \times 4 \text{ voxel} \times 4 \text{ voxel}$ 的局部插值块,如图 4 所示。假设局部插值块内所有体素点满足:

$$g(x, y, z) = \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{lmn} (x - [x'])^l (y - [y'])^m (z - [z'])^n, \quad (7)$$

式中, $[\cdot]$ 为向下取整符号, (x, y, z) 为局部插值块内体素点在变形体图像中的图像坐标, α 为插值系数,分别对应不同的 l, m, n , 共计有 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 个。插值系数

可通过将已知的局部插值块中 64 个整体素点灰度值和坐标代入式(7),建立线性方程组联立求解得到^[24]。最后,将 (x', y', z') 代入式(7)即可计算出 $g(x', y', z')$ 。

3 实验验证

为了验证所提残余灰度场计算方法的可行性及其在内部损伤观测和定位中的有效性,分别进行 I 型裂纹模拟实验和球墨铸铁拉伸真实实验。所使用的 DVC 算法见参考文献[25],利用 3D IC-GN 算法与三次 B 样

条插值方法对 ZNSSD 进行迭代优化以实现体图像子体块间的亚体素配准。在模拟和真实实验中,DVC 计算步长和子体块尺寸分别设置为 5 voxel 和 31 voxel \times 31 voxel \times 31 voxel。应变计算采用三维逐点最小二乘拟合法^[26],应变计算窗口尺寸设为 11 \times 11 \times 11 个点。Von-mises 应变是一种基于应力的等效应变^[27],可以更好地描述复杂应力下材料内部的应变状态,主要用于判断材料是否发生塑性变形或被破坏。在获得各方向应变后,计算得到 von-mises 应变,计算公式表示为

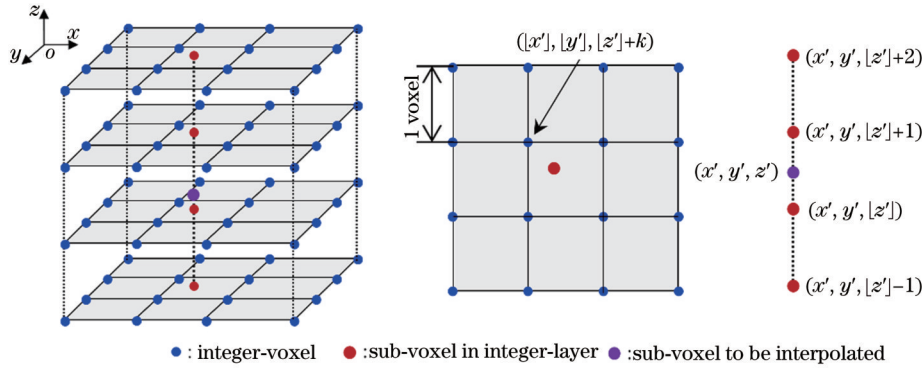


图 4 三次 B 样条插值实现示意图(k 可取 $-1, 0, 1, 2$)

Fig. 4 Schematic illustration of the implementation of tricubic interpolation (k can be $-1, 0, 1, 2$)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{3} \sqrt{2 \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right]}, \quad (8)$$

式中, $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ 表示空间中计算点在各个方向的应变分量, ε 表示正应变, γ 表示切应变。需要说明的是,模拟和真实实验结果图中显示的坐标皆为体图像全局坐标。

3.1 数值模拟 I 型裂纹实验

首先,生成大小为 200 voxel \times 200 voxel \times

200 voxel 的模拟散斑体图像作为参考体图像 $f(x, y, z)$,如图 5(a)所示;随后,对其施加 I 型裂纹位移场(裂纹方向为 0)以及自定义的不均匀灰度变化,生成变形体图像 $g(x, y, z)$,如图 5(b)所示。所施加的理论 I 型裂纹位移场和变形体图像生成公式表示为

$$\begin{cases} u = \frac{K_I}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \mu) [(2\kappa - 1) \cos(\theta/2) - \cos(3\theta/2)] \\ v = \frac{K_I}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (1 + \mu) [(2\kappa + 1) \sin(\theta/2) - \sin(3\theta/2)] \\ w = 0 \\ g(x, y, z) = 0.8 \times f(x + u, y + v, z + w) + |\sin(x - 100)\pi/100| \end{cases}, \quad (9)$$

式中: K_I 表示 I 型应力强度因子; E 和 μ 分别表示弹性模量和泊松比; (r, θ, z) 是以裂纹尖端为原点建立的圆柱坐标系下的坐标。将体图像每层切片图的中心设为裂纹尖端并设 $K_I = 25 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{voxel}}$ 、 $E = 68.9 \text{ GPa}$ 、 $\mu = 0.3$ 。另外,假设模拟体图像处于平面应变状态,取 $\kappa = 3 - 4\mu$ 。图 5(c)所示的差值图是通过参考体图像和变形体图像直接相减获得的,其平均灰度为 32.17。可以看出,差值图中存在大量的重叠伪影,无

法准确地对内部损伤进行观测和定位,因此必须对位移场和灰度变化进行全局校正。

图 6 是模拟 I 型裂纹实验中的 DVC 测量结果。从图 6(a)可以看出,由于 DVC 计算使用的连续形函数无法描述裂纹处的不连续变形,在裂纹附近的 v 位移场存在明显的测量误差,因此通过裂纹张开方向的位移突变无法实现准确的裂纹定位。图 6(b)是 DVC 计算得到的 ZNCC 系数场。可以看出,尽管裂纹附近的 ZNCC 系数明显低于其他区域,但由于存在模糊效应,ZNCC

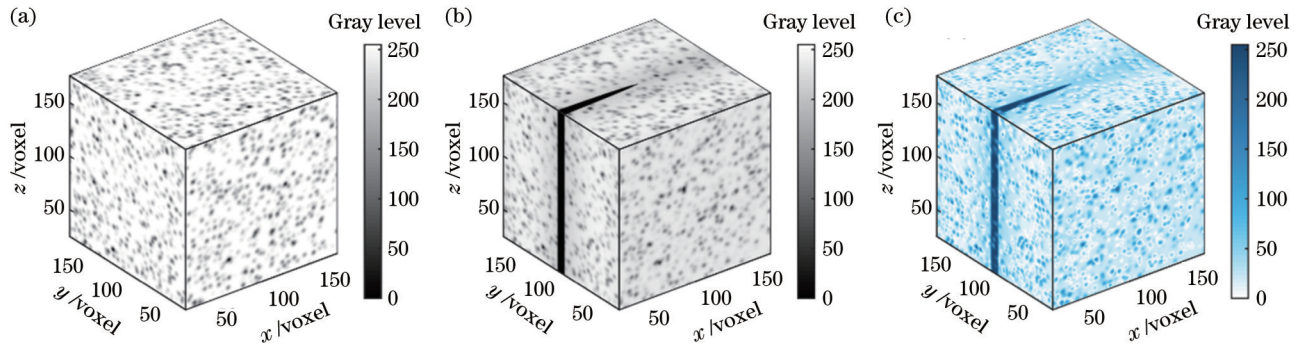


图 5 200 voxel \times 200 voxel \times 200 voxel 的模拟体图像。(a)参考体图像;(b)变形体图像;(c)参考与变形体图像之间的差值图
Fig. 5 Simulated volume images of 200 voxel \times 200 voxel \times 200 voxel. (a) Reference volume image; (b) deformed volume image; (c) differential image between reference and deformed volume images

系数场只能反映出裂纹发生的大致位置。此外,位于裂纹附近的计算点具有较高的 von-mises 应变,如图 6

(c)所示。然而,受到错误 DVC 计算结果的影响,von-mises 应变场同样不能揭示裂纹的精确位置和形态。

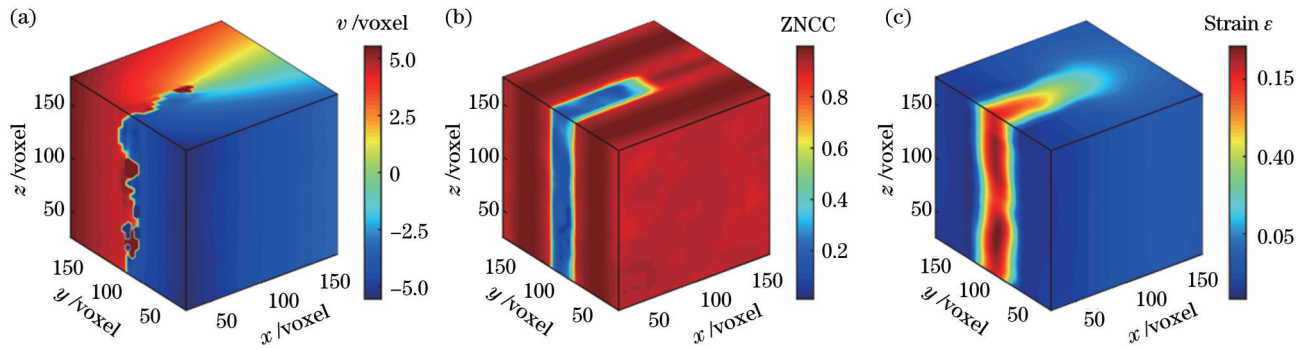


图 6 模拟实验中局部 DVC 的测量结果。(a) v 位移场;(b)ZNCC 系数场;(c) von-mises 应变场
Fig. 6 Measurement results by local DVC in simulation experiment. (a) v displacement field; (b) ZNCC coefficient field; (c) von-mises strain field

图 7(a)、(b)分别为灰度线性校正前后的基于局部 DVC 的残余灰度场,图 7(c)为经过阈值处理后的校正后的残余灰度场。与校正后的残余灰度场相比,未校正的残余灰度场在远离裂纹的区域仍然具有较高的灰度水平。未校正的残余灰度场平均灰度为 22.48,校正后平均灰度降至 7.83。从图 7(d)灰度直方图中也可以看出,校正后的残余灰度场整体灰度水平明显降低,这对通过阈值处理后识别出准确的损伤位置有所帮助。因此,在计算残余灰度场时有必要进行对比度和亮度校正。如图 7(c)所示,其中仅显示了残余灰度高于 100 的体素点,可清晰观测到裂纹平面,且裂纹面位置非常接近预设值($y=100$ voxel)。模拟实验结果表明,相较于 ZNCC 系数场,残余灰度场可以更精细地评价 DVC 的匹配质量,并且能够实现更加精确的裂纹观测和定位。

3.2 球墨铸铁真实拉伸实验

为进一步验证残余灰度场在内部损伤观测和定位中的实用性和优越性,选取 Amira Avizo 软件参考示例库中的一组球墨铸铁体图像进行了真实验证实验。球墨铸铁拉伸体图像获取过程详见参考文献[28]。

图 8(a)为在参考体图像中选取的用于 DVC 计算的 VOI,尺寸为 100 voxel \times 100 voxel \times 410 voxel。从体图像中可以清晰地观察到球墨铸铁的微观结构,其中,铁素体-珠光体基体呈浅色,石墨球呈深色。为了更好地展示变形前后体图像的灰度变化,图 8(b)展示了与 VOI 相同区域的变形体图像。可以看到,经过拉伸后体图像中处于试样上端的深色区域明显扩大,这主要是由于拉伸后基体中产生了裂纹,并且基体和石墨球之间发生了界面脱黏。图 8(c)为参考与变形体图像直接相减获得的差值图,其平均灰度为 20.61。与模拟实验结果类似,由于变形体图像在相减之前没有经过全场位移校正,差值图在石墨球周围出现大量的重叠伪影,无法准确地反映内部损伤情况。图 9(a)、(b)分别为真实实验中 DVC 测量得到的 ZNCC 系数场和 von-mises 应变场。与其他区域相比,损伤附近的 ZNCC 系数和 von-mises 应变存在显著的差异,但通过 ZNCC 系数场和 von-mises 应变场只能确定球墨铸铁试样拉伸后基体断裂的大概位置,难以实现高精度的损伤定位以及可视化观测。图 9(c)则是真实实验中计算得到的残余灰度场。可以看到,在经过全场位

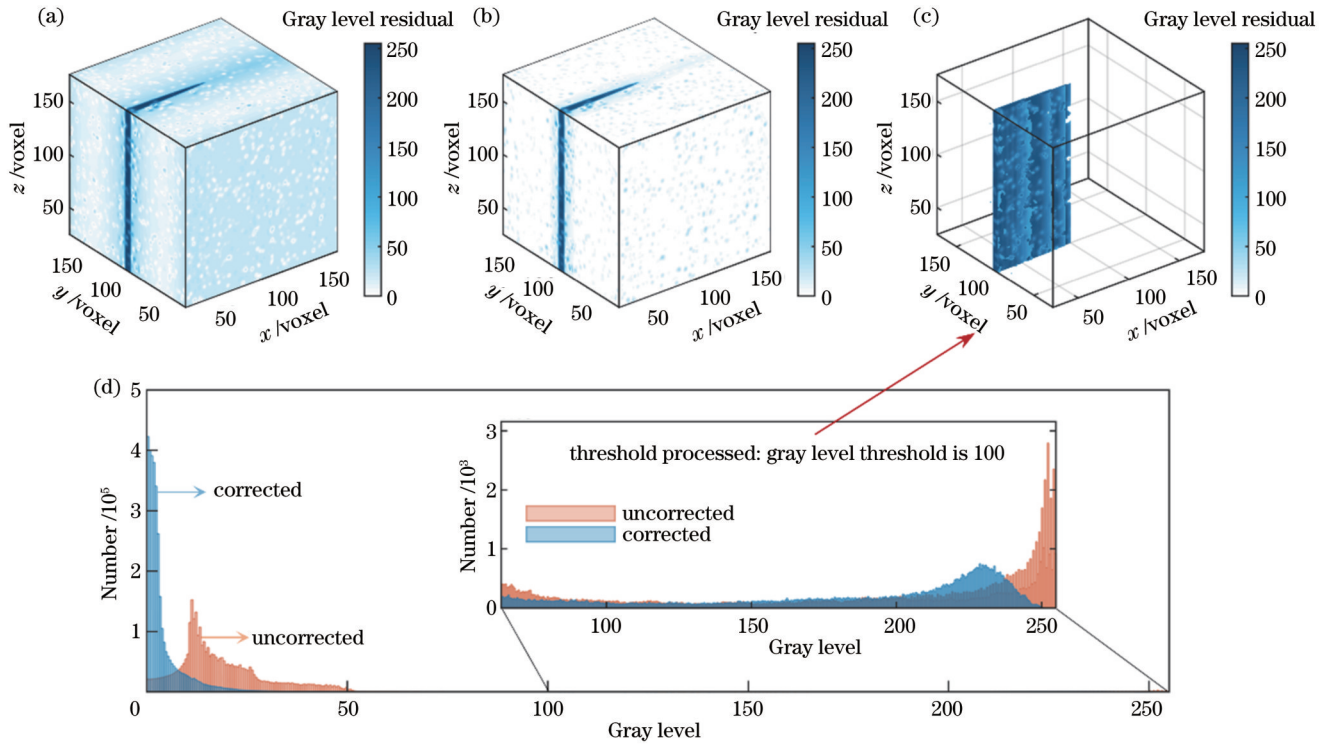


图 7 残余灰度场及其灰度直方图。(a)未校正;(b)校正后;(c)阈值处理后;(d)灰度直方图

Fig. 7 Gray level residual fields and grayscale histogram. (a) Uncorrected; (b) corrected; (c) threshold processed; (d) grayscale histogram

移校正后,残余灰度场中损伤以外区域的重叠伪影几乎完全消失,同时残余灰度也保持在较低水平,平均灰度降至 8.18,这进一步表明全场位移校正变形体图像

的必要性。此外,与ZNCC系数场和 von-mises 应变场相比,残余灰度场中灰度较高的区域可以更精细地揭示出损伤位置以及形貌。

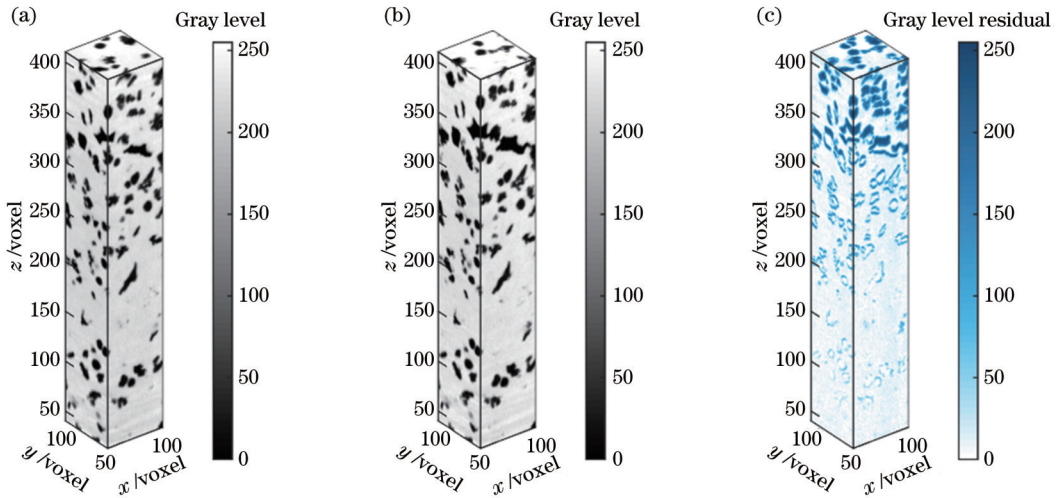


图 8 真实实验结果。(a)参考体图像;(b)变形体图像;(c)参考和变形体图像之间的差值图

Fig. 8 Real test results. (a) Reference volume image; (b) deformed volume image; (c) differential image between the two volume images

图 10(a)、(b)分别为残余灰度场不同切片处的结果。可以看到,残余灰度场不仅能显示出裂纹形态和方向($y=40$ voxel),还可以反映出拉伸后石墨球和基体之间出现的脱黏行为($y=85$ voxel)。为了进一步突出显示损伤,对残余灰度场切片图进行了后处理,将切

片图像中灰度低于 20 的体素点显示为白色。从后处理切片图可以清晰地看出,基体的断裂以及基体与石墨球的脱黏行为主要发生在试样上端,这可能是由于样品的上端存在初始制造缺陷。图 10(c)则是球墨铸铁体图像内部损伤的三维视图,其中,体图像经过了阈

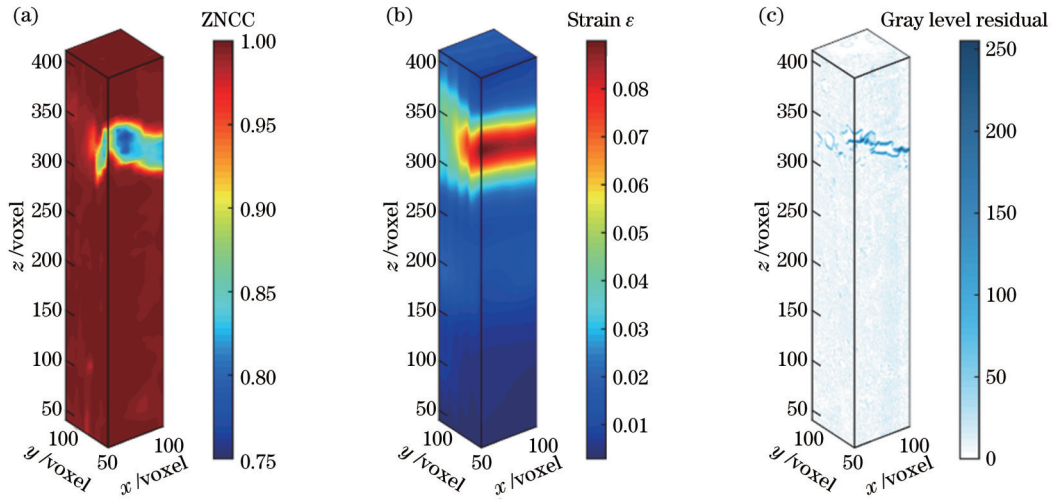


图9 真实实验中局部DVC测试结果。(a)ZNCC系数场;(b)von-mises应变场;(c)残余灰度场

Fig. 9 Results obtained by local DVC in real test. (a) ZNCC coefficient field; (b) von-mises strain field; (c) gray level residual field

值处理(只显示石墨球)。从图10可看到,裂纹和脱黏行为主要集中在石墨球附近,这是由于石墨球和基体黏接界面强度较低,更有利于内部损伤的产生及扩展。需要注意的是,由于全场校正中使用的插值方法会稍

微扩大损伤区域,因此残余灰度场只能反映损伤的近似形貌特征。尽管如此,研究人员可以利用残余灰度场获取到内部损伤位置以及形貌等信息,这有助于人们进一步理解球墨铸铁的断裂力学行为。

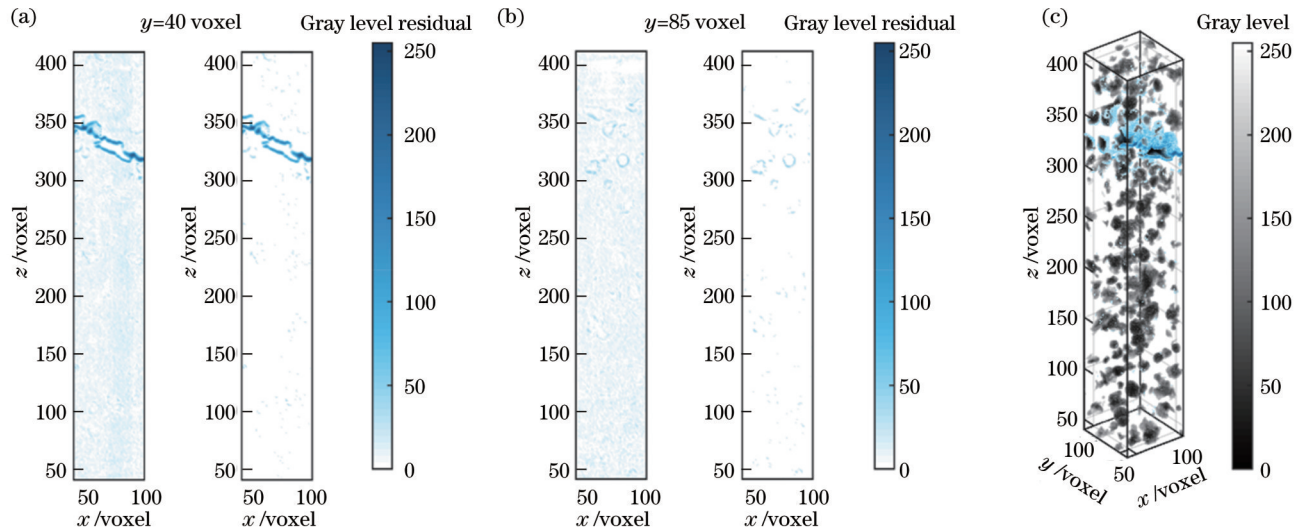


图10 残余灰度场不同位置切片图和球墨铸铁体图像内部损伤三维视图。(a)y=40 voxel切片图;(b)y=85 voxel切片图(左边为原始切片图,右边为后处理后的切片图);(c)三维视图(蓝色为损伤区域,黑色为石墨球)

Fig. 10 Slice maps of different positions of residual gray field and 3D view of the damage location within the nodular graphite cast iron volume image. (a) $y=40$ voxel slice map; (b) $y=85$ voxel slice map (the left is the original slice map, and the right is the post-processing slice map); (c) 3D view (the damage region is blue and the nodular graphite is dark)

4 结 论

提出了一种基于局部DVC计算结果后处理的简单易实现且准确可靠的残余灰度场计算方法。该方法基于三维Delaunay四面体剖分算法,利用有限元框架对局部DVC离散计算结果进行稠密插值,以获取逐体素连续位移场校正变形体图像。此外,计算过程中还考虑了目标体图像灰度线性变化的影响。该残余灰度场计算方法弥补了当前局部DVC在匹配质量精细化

评价方面的不足,可以实现逐体素的DVC匹配质量评价。残余灰度场不仅能够准确地反映内部损伤的位置,而且可以实现内部裂纹形貌和界面脱黏行为的可视化观测,有望在材料和结构内部损伤的可视化观测和准确定位方面获得更多应用。

参 考 文 献

[1] Bay B K. Methods and applications of digital volume correlation [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,

- 2008, 43(8): 745-760.
- [2] 潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(16): 1671-1681.
- Pan B, Wang B. Research progress in digital volume correlation method[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(16): 1671-1681.
- [3] Buljac A, Jailin C, Mendoza A, et al. Digital volume correlation: review of progress and challenges[J]. Experimental Mechanics, 2018, 58(5): 661-708.
- [4] Bay B K, Smith T S, Fyhrle D P, et al. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(3): 217-226.
- [5] 邹翔, 潘兵, 王延珺, 等. 高斯预滤波对数字体图像相关测量的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1512002.
- Zou X, Pan B, Wang Y J, et al. Effect of Gaussian prefiltering on digital volume correlation measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1512002.
- [6] 樊爽, 郭玉荣. 基于逐点移动最小二乘拟合的数字图像相关测量[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(6): 0612001.
- Fan S, Guo Y R. Digital image correlation measurement based on pointwise moving least-square fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(6): 0612001.
- [7] Pan B, Wang B, Wu D F, et al. An efficient and accurate 3D displacements tracking strategy for digital volume correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58: 126-135.
- [8] Wang B, Pan B. Self-adaptive digital volume correlation for unknown deformation fields[J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(2): 149-162.
- [9] 李馨, 赵加清, 张征明, 等. 基于数字图像相关的自适应应变场计算[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2312002.
- Li X, Zhao J Q, Zhang Z M, et al. Self-adaptive strain field calculation based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2312002.
- [10] 邹翔, 张轩豪, 王延珺, 等. DVC 中内部散斑质量评价及计算体素点的优化选择[J]. 力学学报, 2021, 53(7): 1971-1980.
- Zou X, Zhang X H, Wang Y J, et al. Internal speckle pattern quality assessment and optimal selection of voxel points for digital volume correlation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(7): 1971-1980.
- [11] Roux S, Hild F, Viot P, et al. Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(8): 1253-1265.
- [12] Holmes J, Sommacal S, Das R, et al. Digital image and volume correlation for deformation and damage characterisation of fibre-reinforced composites: a review[J]. Composite Structures, 2023, 315: 116994.
- [13] Chi Y X, Zhao W, Pan B. Gray level residual field: an effective metric for pixelwise matching quality evaluation in local digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(7): 075018.
- [14] Ana V, Zvonimir T, Benjamin S, et al. Application of different imaging techniques for the characterization of damage in fiber reinforced polymer[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 150: 106576.
- [15] Réthoré J, Limodin N, Buffière J Y, et al. Three-dimensional analysis of fatigue crack propagation using X-ray tomography, digital volume correlation and extended finite element simulations[J]. Procedia IUTAM, 2012, 4: 151-158.
- [16] Vargas R, Canto R B, Smaniotto B, et al. Calibration of cohesive parameters for a castable refractory using 4D tomographic data and realistic crack path from in situ wedge splitting test[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(2): 676-691.
- [17] Buljac A, Helfen L, Hild F, et al. Effect of void arrangement on ductile damage mechanisms in nodular graphite cast iron: in situ 3D measurements[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 192: 242-261.
- [18] Chateau C, Nguyen T T, Bornert M, et al. DVC-based image subtraction to detect microcracking in lightweight concrete[J]. Strain, 2018, 54(5): e12276.
- [19] Gates M, Lambros J, Heath M T. Towards high performance digital volume correlation[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(4): 491-507.
- [20] Schreier H, Orteu J J, Sutton M A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. Boston: Springer US, 2009.
- [21] Cignoni P, Montani C, Perego R, et al. Parallel 3D delaunay triangulation[J]. Computer Graphics Forum, 1993, 12(3): 129-142.
- [22] Han J, Pan B. A novel method for measuring discontinuous deformation in digital image correlation based on partition and dividing strategy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204: 185-197.
- [23] Luu L, Wang Z Y, Vo M, et al. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3070-3072.
- [24] Lekien F, Marsden J. Tricubic interpolation in three dimensions[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 63(3): 455-471.
- [25] Wang B, Pan B. Incremental digital volume correlation method with nearest subvolume offset: an accurate and simple approach for large deformation measurement[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 116: 80-88.
- [26] Pan B, Wu D F, Wang Z Y. Internal displacement and strain measurement using digital volume correlation: a least-squares framework[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(4): 045002.
- [27] Shrivastava S, Ghosh C, Jonas J J. A comparison of the von Mises and Hencky equivalent strains for use in simple shear experiments[J]. Philosophical Magazine, 2012, 92(7): 779-786.
- [28] Tomičević Z, Kodvanj J, Hild F. Characterization of the nonlinear behavior of nodular graphite cast iron via inverse identification-analysis of uniaxial tests[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2016, 59: 140-154.

Study on Gray Level Residual Field Calculation in Digital Volume Correlation

Pan Bing^{1*}, Zhang Xuanhao¹, Wang Long²

¹*National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

²*Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China*

Abstract

Objective Gray level residual (GLR) field refers to the intensity differences between corresponding voxel points in the digital volume images acquired before and after deformation. Typically, internal damage in materials induces substantial variations in grayscale values between corresponding voxel points. Therefore, the GLR field helps to reveal the damage location. In the finite element-based global digital volume correlation (DVC) method, the GLR field, as the matching quality evaluation criteria, can be readily calculated and has been employed to characterize the evolution of internal cracks. However, the widely used subvolume-based local DVC, which can output displacement, strain, and correlation coefficient at discrete calculation points, cannot obtain the GLR directly. Compared with correlation coefficient and deformation information, the GLR field achieves voxelwise matching quality evaluation, thus demonstrating superior performance in visualizing internal damage. Therefore, accurate GLR calculation in local DVC is undoubtedly valuable in compensating for its shortcomings in fine-matching quality evaluation and expanding its applications in internal damage observation and localization.

Methods The GLR field is obtained by subtracting the reference volume image from the deformed volume image after full-field correction. The key of its calculation is to utilize the continuous voxelwise data, including contrast and brightness correction coefficients and displacement, to correct the deformed volume image. In this work, a dense interpolation algorithm based on finite element mesh is adopted to estimate the voxelwise data within the volume of interest (VOI). 3D Delaunay triangulation algorithm is first utilized to generate tetrahedron element mesh from the discrete calculation points, and then the data of voxel points inside each tetrahedron element can be determined with the shape function of finite element. After acquiring the voxel-wise data of VOI within the reference volume image, the corrected deformed volume image can be reconstructed. Given that the corresponding voxel points in the deformed volume image normally fall into the subvoxel positions, a subvoxel intensity interpolation scheme is required during the calculation of correlation residual in local DVC. In this work, the advanced cubic B-spline interpolation method is adopted to estimate the grayscale of the corrected deformed volume image. In addition, a simulated mode I crack test and a tensile test of nodular cast iron are carried out to verify the feasibility of the GLR field based on local DVC and the reliability and robustness in damage observation and detection.

Results and Discussions In simulated mode I crack test, the results show that the uncorrected GLR field still keeps a higher grayscale even in the region away from the crack compared with the corrected GLR field (Fig. 7), which degrades the damage observation and location. Therefore, contrast and brightness correction are necessary during the calculation of the GLR field. The crack plane can be detected clearly from the GLR field after threshold processing, and the position of the crack plane is very close to the preset value (Fig. 7). The proposed GLR based on local DVC effectively eliminates the influence of contrast and brightness changes and achieves precise crack location. Additionally, more information about the damage can be acquired from the GLR field. The crack morphology and orientation can be determined from the slice image at $y=40$ voxel in the real test. Besides, the debonding between the nodular graphite and matrix can also be detected roughly from the GLR field (Fig. 10). It should be noted that the GLR field after post-processing can only reflect the approximate morphology of damages and fails to reflect the opening of crack and debonding accurately since the interpolation used in displacement correlation may enlarge the region with damage. Despite all this, the location and morphology of damages extracted from the GLR field are helpful in understanding the fracture mechanics properties of nodular graphite cast iron.

Conclusions A simple and practical method for GLR field calculation based on post-processing of local DVC measurements is proposed. The method addresses the limitations of existing local DVC in fine-matching quality evaluation. Compared with correlation coefficient and deformation information, the GLR field not only accurately reflects the location of internal damage but also facilitates visual observation of internal crack morphology and interface debonding behavior. It holds the potential for broader applications in visualizing and precisely locating internal damage within materials and structures.

Key words three-dimensional image processing; digital volume correlation; gray level residual field; internal damage observation and localization