

基于冗余应变信息的逐点抑噪算法

涂文戈*, 黄祖桂, 郭玉荣

湖南大学土木工程学院建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082

摘要 在数字图像相关方法中,光噪声和电子设备噪声等因素会影响应变场的计算精度。基于单点的冗余应变信息提出利用概率密度函数或者构造指数权重函数,通过加权求和逐点抑制应变场中的噪声。将该方法运用于逐点最小二乘法识别了模拟数字散斑图像仿真实验,带孔板拉伸实验和带裂缝的钢筋混凝土柱的受弯实验的应变场。结果表明:相较于经典的逐点最小二乘法,在均匀变形情况下,本文方法能够有效提高应变场精度;当两个方法获得相同精度的应变场时,本文方法的计算速度提高了 65% 以上;在裂缝附近,本文方法能够获得更可靠的应变值,适用范围更广;相较于基于正则化平滑的有限单元应变方法,本文方法的计算精度更高,而且计算速度更快。

关键词 测量; 数字图像相关; 应变场; 权重函数; 抑噪

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2412001

Pointwise Noise Suppression Algorithm Based on Redundancy Strain Information

Tu Wenge*, Huang Zugui, Guo Yurong

Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, Ministry of Education, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract Factors such as optical noise and electronic device noise can affect the accuracy of the strain field in the digital image correlation method. This paper introduces an algorithm based on single-point redundant strain information. This algorithm suppresses noise in the strain field through weighted summation using a probability density function or constructing an exponential weight function. In the pointwise least squares method, this proposed algorithm is used to identify the strain field of the computed-simulated speckle images test, the tensile test of a plate with one hole, and the bending test of a reinforced concrete column with cracks. The results show that in the case of homogeneous deformation, compared with the classical pointwise least squares algorithm, the accuracy of the strain field calculated by the proposed method has been effectively improved; while both methods achieve the same precision, the calculation speed of the proposed method by more than 65%. Moreover, the proposed method can obtain more reliable strain values in the region near the crack, giving it a broader range of application. Furthermore, compared the regularization-aided finite element strain calculation method, the proposed method has greater accuracy and a faster calculation speed.

Key words measurement; digital image correlation; strain field; weighting function; noise suppression

OCIS codes 120.3940; 100.2000; 120.6150

1 引言

由 Yamaguchi^[1]和 Peters 等^[2]在 20 世纪 80 年

代初提出的数字图像相关(DIC)方法能够有效获得构件表面的位移场和应变场等变形性能。该方法具有全场测量、使用便捷、无损检测等优势,被广泛地

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-10; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51878259)

通信作者: *wgtu@hnu.edu.cn

应用于机械、土木、材料等领域^[3-6]。

对于构件表面的变形情况,学者们十分关注与材料的力学性能(如应力状态、泊松比等)密切相关的应变测量,但是通过 DIC 方法获得的位移场中含有光噪声、测量设备的电子噪声、计算算法等因素引起的误差,如果直接采用对位移微分的方式获取应变,这些误差会被恶性放大,造成虚假应变,从而使应变计算结果不准确^[6]。经典的牛顿-拉普森(N-R)^[7]方法可以在求解位移场时直接得到相应的应变场,但是文献^[7]中指出只有当应变近似大于 1% 时,其计算精度才合理。因此,对于小变形构件,该方法得到的应变场不适合作为构件表面变形性能的评判标准。另外,一些学者提出对位移场进行后处理获取高精度应变场的方法,例如局部 Hermite (LH) 方法^[8],该方法能获得较高精度的应变结果,但是,由于二维 Hermite 形函数构造较为复杂,因此在实际测量中,该方法的适用性不强^[9]。除此之外,有限元法(FEM)^[10]也常用于应变计算,但该方法对于网格划分要求严格,计算结果依赖于网格划分质量。而经典的逐点最小二乘法(PLS)^[4,11-12]是通过在局部区域拟合较多的计算点的位移信息求解有效可靠的应变。该方法假设局部区域内的应变为常量,将离散的位移数据拟合成双线性方程从而获得该局部区域内的各计算点的应变值;该方法由于具有易于实现,复杂度低、计算效率高、可以忽视局部区域内的无效数据等优越特性,因此被相关科研人员广泛使用于应变场计算,比如流行的、已经得到有效验证的 DIC 开源软件 ncorr (<http://www.ncorr.com>)^[13-14]就是采用该方法计算应变场。

目前,对应变场进行抑噪处理以提高计算精度的研究较少。Pan 等^[15]引入了正则化惩罚函数对牛顿-拉普森方法获取到的应变场进行抑噪处理,使其应变场的精度大幅度提高。同时,晏班夫等^[16]利用该抑噪方法提出基于正则化平滑的有限单元应变计算方法(RFE)。

本文基于单点冗余应变信息利用误差概率密度函数或者构造指数权重函数,采用加权求和的方法对应变误差进行抑制,并将该抑噪方法运用在经典的 PLS 算法中。应用该方法对模拟数字散斑图像仿真实验进行应变场识别,并讨论了该方法的计算参数和提出的两种抑噪方法的适用条件;采用带孔板拉伸实验,对比分析了经典的 PLS 算法和本文方法在不同应变计算窗口尺寸下的计算结果;对带裂缝的钢筋混凝土柱的受弯实验应用 PLS 算法和构

造指数权重函数抑噪的本文方法计算应变场,讨论了两种方法的可靠性和适用性;根据三个实验的计算结果,比较了经典的 PLS 算法和本文方法在获得同等精度应变场时的计算效率。另外,在仿真和带孔板实验中,对比分析了本文方法与 RFE 算法的应变场计算结果和计算速度。

2 数字图像相关法基本原理

DIC 方法一般包含三个步骤:1) 在构件表面制作优质的随机散斑;2) 拍摄构件变形前后的图像;3) 利用这些图像的灰度信息计算感兴趣区域(ROD)内的变形信息。

DIC 方法原理图如图 1 所示,其基本原理为:采用相机拍摄构件表面在变形前后的照片,然后计算感兴趣区域内各感兴趣点(POI)的变形位移矢量,从而获得该区域的位移场。通常情况下,变形前的图像被称为“参考图像”,变形后的图像被称为“变形图像”。在参考图像中以待求点 (x, y) 为中心建立参考子区,在变形图像中通过相关函数搜索与之匹配的、中心位置坐标为 (x^*, y^*) 的变形子区,采用抗干扰能力较强的归一化最小平方距离(ZNSSD)函数^[17]对变形前后的子区进行相关匹配程度评价,如下式所示。

$$C_{f,g}(\mathbf{p}) = \sum_{(i,j) \in S} \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(x_i, y_j) - f_m]^2}} - \frac{g(x_i^*, y_j^*) - g_m}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [g(x_i^*, y_j^*) - g_m]^2}} \right]^2, \quad (1)$$

式中: $f(x_i, y_i)$ 是参考子区中的点 (x_i, y_j) 的灰度值; $g(x_i^*, y_j^*)$ 是变形子区中的点 (x_i^*, y_j^*) 的灰度值; S 代表子区内所有点组成的集合; f_m 和 g_m 分别是参考图像子区和变形图像子区内的灰度平均值。

$$\begin{cases} f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(x_i, y_j)}{n(S)} \\ g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(x_i^*, y_j^*)}{n(S)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $n(S)$ 是集合 S 内点的总数量。

对于参考子区中的点 (x_i, y_j) 及其在变形子区中的对应点 (x_i^*, y_j^*) 具有如下关系。

$$\begin{cases} x_i^* = x_i + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y_j^* = y_j + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases}, \quad (3)$$

式中: u 和 v 分别是参考子区中心点在水平和垂直方向的位移值; u_x, u_y, v_x 和 v_y 分别是四个位移梯

度; Δx 和 Δy 分别是点 (x_i, y_j) 到参考子区中心点在水平和垂直方向上的相对距离。

(1) 式中 \mathbf{p} 是变形参数矢量, 一般情况下, 使用一阶形函数即可满足要求, 即 $\mathbf{p} = [u, v, u_x, u_y, v_x, v_y]^T$ 。目前, 对于 \mathbf{p} 中各参数的精确定义主要采用的方法有 FA-NR 算法^[7] 和反向组合高斯牛顿

(IC-GN)算法^[18]。相对于 FA-NR 算法, IC-GN 算法在保证计算精度与稳健性的前提下, 避免了冗余计算, 计算速度更快, 耗时更少^[16]。因此, 本文采用 IC-GN 算法迭代更新变形参数, 当相邻两次迭代的变位差值满足收敛条件时(本文迭代终止条件设置为 10^{-5}), 即可最终确定 \mathbf{p} 中的各变形参数。

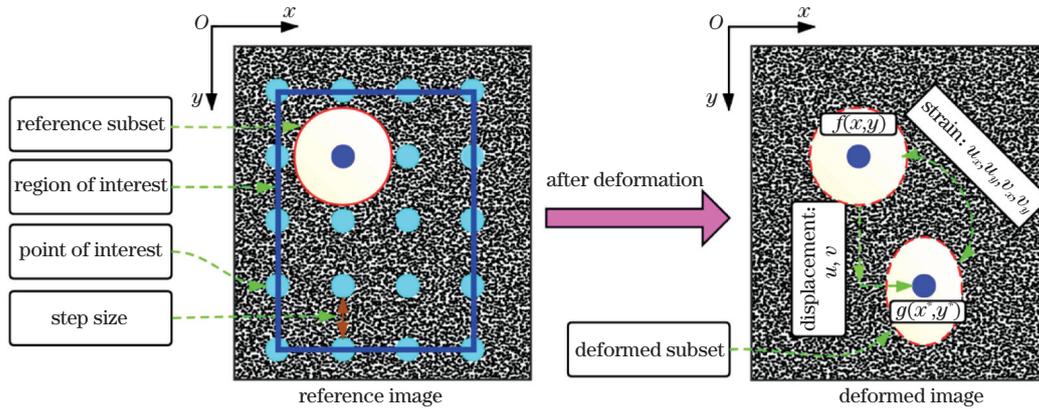


图 1 DIC 方法示意图

Fig. 1 Schematic of DIC method

3 冗余应变信息逐点抑噪算法

当采用逐点最小二乘法、Hermite 插值法、B 样条插值法等计算应变时, 某一点(设为 P 点)会与周围不同的点组成不同的计算窗口或者单元等, 因此 P 点通过不同的窗口或者单元得到多个应变值。假设 P 点通过上述应变计算方法得到的多个应变值组成集合 Ω 。

$$\Omega = \{\epsilon_k\}; k = 1, \dots, M, \quad (4)$$

式中: ϵ_k 是 P 点第 k 个应变计算值; M 为 P 点的应变计算值总数。

通过上述方法获得的计算应变值是真实应变值和应变总误差值的叠加, 可表示为

$$\epsilon = \epsilon^{(t)} + \epsilon^{(n)}, \quad (5)$$

式中: ϵ 、 $\epsilon^{(t)}$ 和 $\epsilon^{(n)}$ 分别是计算应变、真实应变和应变总误差。应变总误差包含外界干扰因素, 图像采集仪器和算法误差等引起的应变误差。

假设 P 点的应变总误差的概率密度分布函数为 ρ , 则 P 点抑制误差后的应变值可表示为

$$\epsilon^{(s)} = \frac{1}{\chi} \int_{\Omega} \rho_k \epsilon_k dk = \epsilon^{(t)} + \frac{1}{\chi} \int_{\Omega} \rho_k \epsilon_k^{(n)} dk, \quad (6)$$

$$\chi = \int_{\Omega} \rho_k dk, \quad (7)$$

式中: $\epsilon^{(s)}$ 是 P 点抑制误差后的应变值; χ 为归一化函数; ρ_k 是 P 点第 k 个应变计算值 ϵ_k 对应的概率密度分布函数值, 当 P 点的应变值集合 Ω 中数据较

多时可以通过拟合的方式获取得到。

当集合 Ω 中数据较少使得通过拟合的方式获取到的概率密度分布函数 ρ 与真实概率分布函数相差较大而导致抑噪后的应变误差反而增大, 或者对计算效率有要求时, 可以通过构造指数权重函数替代(6)式和(7)式。

定义 P 点的参考应变为 ϵ_r , ϵ_r 可以是集合 Ω 内所有数据的平均值, 也可以是依据应变算法的先验经验获得的最优解, 如 PLS 算法选取以 P 点为应变计算窗口中心点时计算得到的应变值。采用 P 点第 k 个应变计算值 ϵ_k 依次减去参考应变 ϵ_r 得到两者之间的应变误差差值, 即有:

$$\Delta \epsilon_k = \epsilon_k - \epsilon_r = \epsilon_k^{(n)} - \epsilon_r^{(n)}, (k = 1, 2, 3, \dots, M). \quad (8)$$

P 点第 k 个应变计算值 ϵ_k 的权重计算公式为

$$\chi = \sum_{j=1}^M \exp\left(-\frac{|\Delta \epsilon_j|}{\sum_{i=1}^M |\Delta \epsilon_i|}\right), \quad (9)$$

$$\rho_k = \frac{1}{\chi} \exp\left(-\frac{|\Delta \epsilon_k|}{\sum_{i=1}^M |\Delta \epsilon_i|}\right). \quad (10)$$

则 P 点抑制误差后的应变值为

$$\epsilon^{(s)} = \sum_{k=1}^M \rho_k \epsilon_k = \sum_{k=1}^M \rho_k \epsilon_k^{(t)} + \sum_{k=1}^M \rho_k \epsilon_k^{(n)}. \quad (11)$$

因为 $\sum_{k=1}^M \rho_k = 1$, 所以(11)式可以写为

$$\epsilon^{(s)} = \epsilon^{(t)} + \sum_{k=1}^M \rho_k \epsilon_k^{(n)}. \quad (12)$$

式中:等号右边第一项为该点的真实应变值项,第二项为应变误差抑制项。在感兴趣区域内对上述应变

计算方法得到的应变场通过(8)~(12)式逐点进行误差抑制以获得最终的应变场。本文方法的计算流程图如图 2 所示。

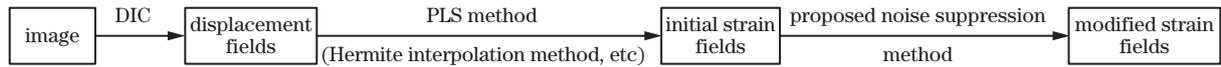


图 2 本文方法计算流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed method

4 仿真及实例应用

本文利用经典的 PLS 算法的单点冗余应变信息来验证所提抑噪方法的可行性与可靠性。经典的 PLS 算法原理图如图 3 所示,此时应变窗口尺寸为 3×3 (POI),当分别以 P 点和 Q 点为中心建立应变

计算窗口时,均可计算出 P 点的应变值。同理,当 P 点在应变计算窗口的其他位置参与位移拟合过程时,也可得到对应的应变值。因此 P 点的应变计算结果一共有 9 个。实际上,当应变窗口尺寸为 $m \times m$ (POI)时, P 点至多获得 m^2 个应变计算结果,是冗余的。



图 3 经典的 PLS 算法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of classical PLS algorithm

根据经典的 PLS 算法在计算应变时假定局部区域内应变值为常量这一特性,本文方法的计算步骤为:1) 采用经典的 PLS 算法计算出原始的应变场;2) 采用所提抑噪方法逐点抑制原始应变场中的噪声获得最终的应变场。

4.1 模拟数字散斑图像实验

在真实实验过程中,由于光照、温度等各种因素干扰,很难得到构件表面真实的应变场,因此通过计算模拟数字散斑图像对算法性能进行验证分析。数字散斑图像如图 4(a)所示,图像尺寸为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$,散斑大小为 3 pixel ,散斑密度为 85% ,变异率为 99% 。通过反向映射法^[19]对源图像施加水平变化的位移场,分两类施加:1) 均匀变形,在水平方向上施加 $2000 \mu\epsilon$ 的拉伸变形;2) 不均匀变形,在水平方向上按 $U(x, y) = 0.2 \cos(2\pi x/300)$ 施加变形。同时,为了模拟在实际采集图像时因为外界干扰等因素对图像整体产生的噪声,对参考图像和变形图像施加均值为零、标准差为 4% 的高斯噪声。选取参考图像中 $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ 的矩形区域为感兴趣区域,设置 DIC 参数:子区半径为 30 pixel ,感兴趣点阵间距取

2 pixel 。在均匀变形和不均匀变形两种情况下,感兴趣区域的位移场计算结果分别如图 4(b)和图 4(c)所示。两者的绝对误差均在 0.035 pixel 以内,与施加的理论变形吻合较好。

为了对应变计算方法的性能进行定量评估,采用均方根误差对计算得到的应变场进行评判,即

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon^{(c)} - \epsilon^{(t)})^2}{N}}, \quad (13)$$

式中: $\epsilon^{(c)}$ 是感兴趣点的计算应变值; N 是参与计算的感兴趣点的总数量。

图 5(a)和图 5(b)分别是 PLS 算法和本文方法在均匀变形和不均匀变形两种情况下应变窗口宽度与均方根误差的关系曲线图,具体数值见表 1 和表 2。其中图 5 中“proposed method-ewf”代表本文方法采用(8)~(12)式(构造指数权重函数)进行抑噪,“proposed method-pdf”代表本文方法采用(6)式和(7)式(利用误差的概率密度函数)进行抑噪。在均匀变形情况下,通过图 5(a)和表 1 可以看出,应变计算窗口越大,三个方法计算得到的应变场的均方根误差越小。另外,通过本文提出的抑噪算法对应

变场中的误差进行抑制后,应变场的均方根误差均有所降低,这表明本文提出的抑噪方法是可靠和有效的。除此之外,RFE 算法按照文献[16]中的建议,平滑参数取 10,在均匀变形下,该算法获取到的应变场的均方根误差为 $169 \mu\epsilon$,比 PLS 算法和本文

方法在应变窗口为 21 POI 时的计算误差大 25% 以上。图 6(a)、(c)、(e)、(g) 分别是上述四个方法在均匀变形下获取到的应变场,可以清晰看到,本文方法获得的应变场数据波动最小,更趋近于真实值,计算效果最好。

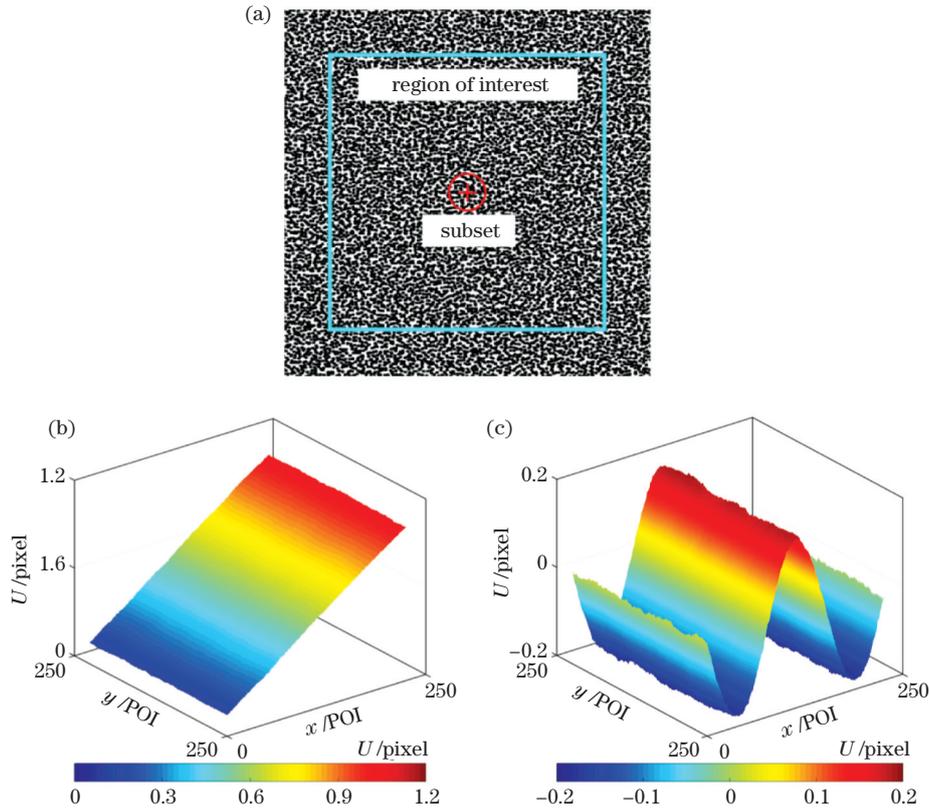


图 4 模拟数字散斑图像变形测试。(a)模拟数字散斑参考图像;(b)感兴趣区域内均匀变形计算位移场;(c)感兴趣区域内不均匀变形计算位移场

Fig. 4 Deformation test of computed-simulated speckle images. (a) A reference computed-simulated speckle image; (b) calculation result of the displacement field for homogeneous deformation in the ROI; (c) calculation result of the displacement field for inhomogeneous deformation in the ROI

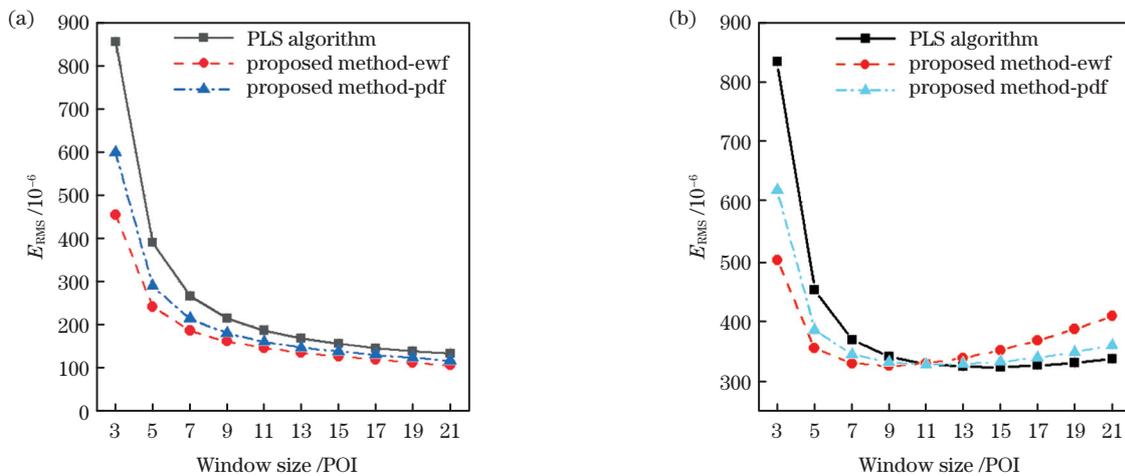


图 5 三个方法的应变场均方根误差对比。(a)均匀变形;(b)不均匀变形

Fig. 5 Comparison of root-mean-square error of strain fields calculated by three methods.

(a) Homogeneous deformation; (b) inhomogeneous deformation

表 1 均匀变形下三个方法的应变场均方根误差对比

Table 1 Comparison of root-mean-square error of strain fields calculated by the three methods under homogeneous deformation

Window size /POI	Classical PLS algorithm / 10^{-6}	Proposed method-ewf / 10^{-6}	Decrease rate /%	Proposed method-pdf / 10^{-6}	Decrease rate /%
3	856	456	46.73	600	29.91
5	392	243	38.01	291	25.77
7	268	188	29.85	215	19.78
9	216	163	24.54	182	15.74
11	188	148	21.28	162	13.83
13	170	137	19.41	149	12.35
15	158	128	18.99	140	11.39
17	148	121	18.24	132	10.81
19	141	114	19.15	125	11.35
21	135	108	20.00	119	11.85

表 2 不均匀变形下三个方法的应变场均方根误差对比

Table 2 Comparison of root-mean-square error of strain fields calculated by the three methods under inhomogeneous deformation

Window size /POI	Classical PLS algorithm / 10^{-6}	Proposed method-ewf / 10^{-6}	Decrease rate /%	Proposed method-pdf / 10^{-6}	Decrease rate /%
3	834	504	39.57	620	25.66
5	454	356	21.59	387	14.76
7	370	331	10.54	346	6.49
9	342	327	4.39	333	2.63
11	330	331	-0.30	329	0.30
13	326	340	-4.29	330	-1.23
15	325	353	-8.62	334	-2.77
17	328	369	-12.50	341	-3.96
19	332	388	-16.87	350	-5.42
21	339	410	-20.94	361	-6.49

在不均匀变形下,由图 5(b)可知,随着应变窗口宽度增大,三个方法的均方根误差均出现了先降后增的变化趋势。其中,经典的 PLS 算法、构造指数权重函数抑噪的本文方法以及利用误差概率密度函数抑噪的本文方法分别在应变窗口宽度为 15 POI、9 POI 和 11 POI 时计算得到的应变场的均方根误差最小,且三者的均方根误差几乎相等;而 RFE 算法的均方根误差为 $349 \mu\epsilon$,均高于上述三个方法的计算误差。图 6(b)、(d)、(f)、(h)分别是四个方法在不均匀变形下的应变场最优计算结果。本文方法与经典 PLS 算法的计算结果十分接近,这表明本文方法能在更小的应变窗口下获得最优应变场。而 RFE 算法的计算结果在应变峰值区域存在少量的噪声。

另外,由图 5、表 1 及表 2 可知,相较于误差概

率密度函数,在均匀变形下,构造指数权重函数的抑噪效果更好;在不均匀变形下,当(4)式的集合 Ω 中应变值数量小于 121 时,构造指数权重函数的抑噪效果更好,反之,利用概率密度函数的抑噪效果更好。在两种变形情况下,采用误差概率密度函数的抑噪效果略微较差的原因是应变误差不仅由随机误差组成,还包含有计算算法等带来的有偏误差。后文对比了本文提出的两种方法获得同等精度的应变场时的计算速度,构造指数权重函数进行抑噪比利用概率密度函数进行抑噪的计算速度快 50%以上,这是因为利用误差概率密度函数进行抑噪时需要逐点拟合对应的误差概率密度函数,因此较为费时。本文建议选用构造指数权重函数的方法对应变场进行逐点抑噪。

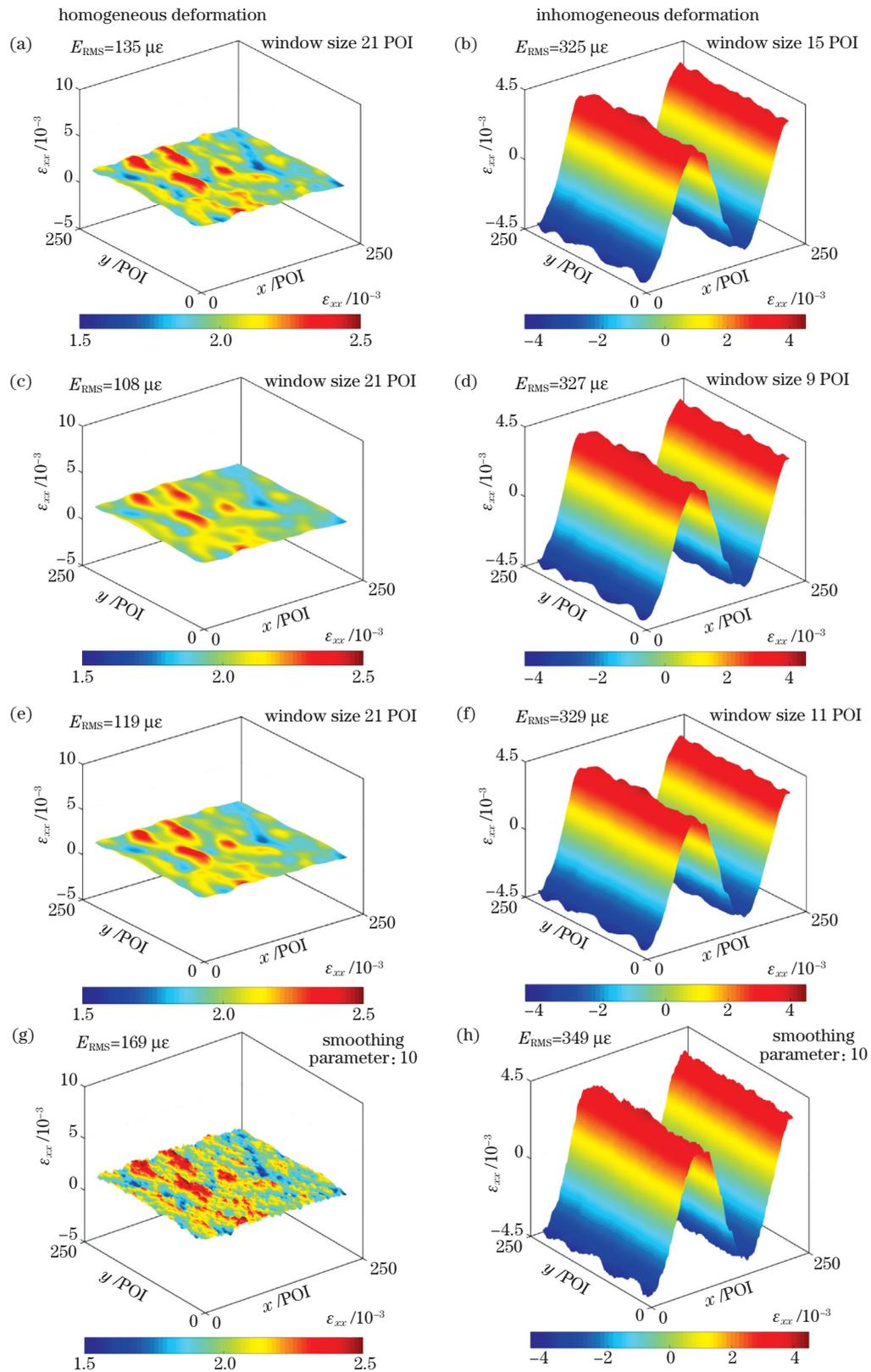


图 6 四个方法在均匀变形和不均匀变形下的应变场计算结果。(a)(b)经典 PLS 算法；
(c)(d)指数权重函数抑噪的本文方法；(e)(f)概率密度函数抑噪的本文方法；(g)(h)RFE 算法

Fig. 6 Calculation results of strain fields of four methods under homogeneous deformation and inhomogeneous deformation. (a)(b) Classical PLS algorithm; (c)(d) proposed method-ewf; (e)(f) proposed method-pdf; (g)(h) RFE algorithm

4.2 带孔板拉伸实验

选取国际实验力学协会开源数据“sample12”带孔板拉伸实验的第 4 张变形图像作为分析对象^[13]。采用经典 PLS 方法、本文提出的两种方法与 RFE

算法识别了水平应变场(ϵ_{xx})、剪切应变场(γ_{xy})和竖向应变场(ϵ_{yy})，等高线每级均取 $300 \mu\epsilon$ ，计算结果分别如图 7(a)、(b)、(c)和(d)所示。图 7 的计算结果表明，在同等应变窗口宽度下，相较于经典的

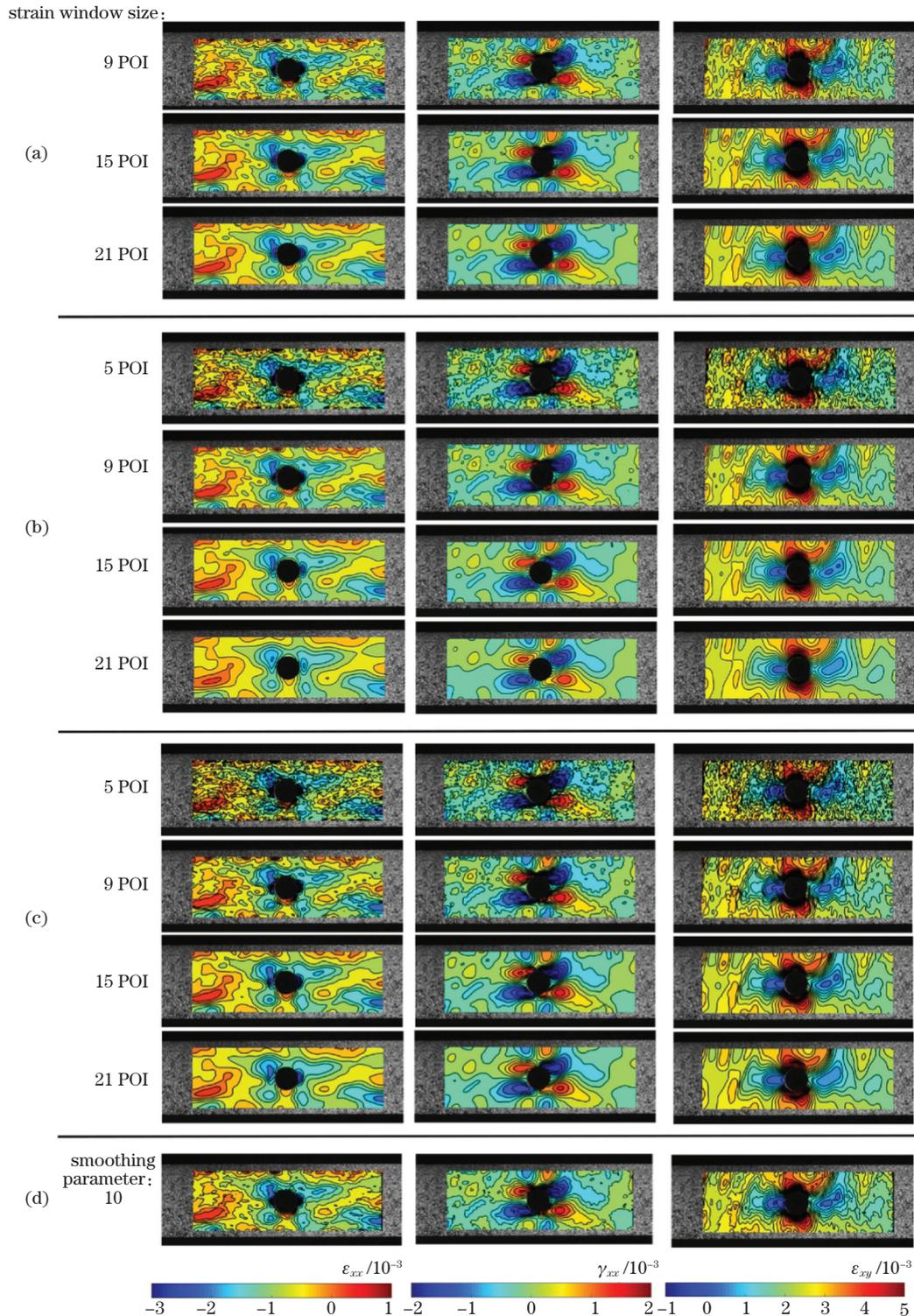


图 7 带孔板应变场计算结果。(a)经典 PLS 算法；(b)构造指数权重函数抑噪的本文方法；

(c)利用误差概率密度函数抑噪的本文方法；(d) RFE 算法

Fig. 7 Calculation results of strain field of a plate with one hole. (a) Classical PLS algorithm; (b) proposed method-ewf; (c) proposed method-pdf; (d) RFE algorithm

PLS 算法, 本文方法计算得到的应变场更加光滑。而 RFE 算法与本文方法在应变窗口尺寸为 9 POI 时的计算结果较为接近。

图 8 是 PLS 算法和构造指数权重函数抑噪的本文方法与 RFE 算法在对应内插图箭头细线处的应变曲线对比, 由于本文提出的两种方法的应变场计算结果较为接近, 限于篇幅, 因此本文只展示图 7 中部分应变场的局部计算结果对比。其中, 图例中“PLS”和“PM(e)”分别表示经典 PLS 算法和构造指数权重函数抑噪的本文方法, 数字代表应变窗口宽度; RFE 后的数字代表该方法的平滑参数。图 8(a)~(c) 的曲线

显示, 当应变窗口尺寸为 9×9 (POI) 时, 经典的 PLS 算法计算得到的应变结果存在明显的波动, 而构造指数权重函数抑噪的本文方法的应变计算结果则相对光滑。除此之外, PLS-15 和 PM(e)-9 两条曲线之间的相对误差绝对值的平均值分别为 2.06%、2.62% 和 0.53%, 两者吻合较好, 具有几乎相同的计算精度; 而 PM(e)-9 和 RFE-10 两条曲线之间的相对误差绝对值的平均值分别为 9.53%、4.52% 和 0.82%, 这说明在竖向应变(拉伸方向)计算上, RFE 算法和本文方法计算精度近似相同, 在水平应变(与拉伸垂直方向)计算上仍有接近 10% 的差距。

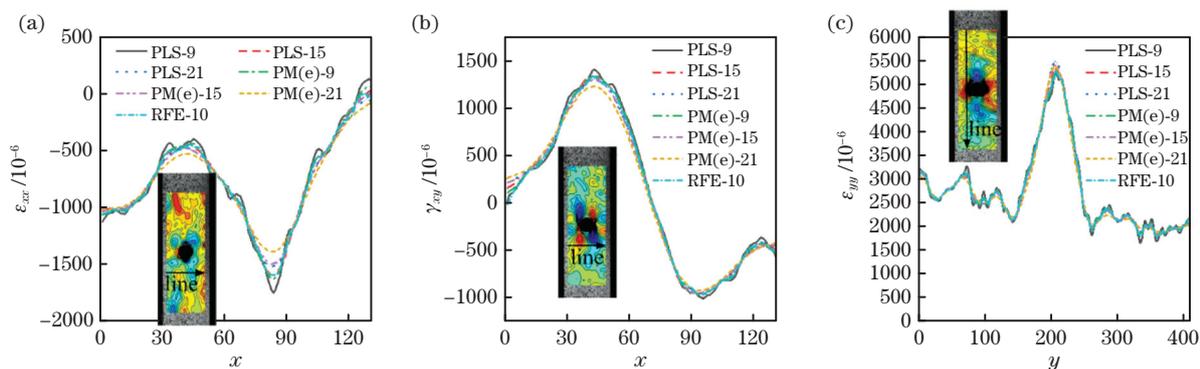


图 8 内插图中对应箭头处的应变对比。(a) 水平应变; (b) 剪切应变; (c) 竖向应变 [插图: 从左到右分别为构造指数权重函数抑噪的本文方法在应变窗口尺寸为 9×9 (POI) 时的水平应变场、剪切应变场和竖向应变场]

Fig. 8 Comparison of strain mapped on line located in corresponding sub-image. (a) Horizontal strain; (b) shear strain; (c) vertical strain [inset: horizontal strain field, shear strain field, and vertical strain field calculated by proposed method-ewf with strain window size of 9×9 (POI), from left to right]

4.3 钢筋混凝土柱受弯实验

本课题组设计了一根足尺钢筋混凝土柱进行变轴力拟静力实验。足尺柱的尺寸为 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 3700 \text{ mm}$, 按照 7 层 3 跨框架结构在 EL centro 波作用下底层轴力变化幅度最大的中柱的双向地震时程分析结果进行实验。

徐向阳等^[20]指出采用颗粒大小均匀的散斑场能够提高 DIC 的测试精度。因此, 在本次实验中, 采用激光雕刻散斑颗粒直径为 2 mm 的随机散斑场模板, 将其转印到钢筋混凝土柱表面。韩依颖等^[21]指出在 DIC 方法中, 裂缝开展的实质是图像灰度值和位移发生突变。因此, 本文在计算程序中设置两个阈值: 1) 某点与相邻点发生 0.5 pixel 的位移突变; 2) 某点的相关系数低于 90%。当位移场中某感兴趣点满足以上任一条件时, 则认为该点为无效点, 予以剔除, 不参与后续的应变计算。

取钢筋混凝土柱开裂后的一张变形图像作为分析对象, 此时柱承受的轴力为 1120 kN (向下为正), 水平位移为 -26.5 mm (向左为正), 侧向力为

0 kN。为了获得更多裂缝边缘处的变形信息, DIC 计算参数设置如下: 子区半径取 25 pixel, 感兴趣点阵间隔为 10 pixel。计算结果如图 9 所示, 图 9(a) 和图 9(b) 分别为经典 PLS 算法 [应变窗口尺寸: 15×15 (POI)] 和构造指数权重函数抑噪的本文方法 [应变窗口尺寸: 9×9 (POI)] 的竖向应变场计算结果; 图 9(c) 为内插图箭头细线处两者的竖向应变对比详图, 限于篇幅问题, 此处不再展示利用误差概率密度函数抑噪的本文方法和 RFE 算法的应变场计算结果。

由图 9(a) 和图 9(b) 的局部放大图中可以清晰看到, 在裂缝附近区域处, 经典 PLS 算法的应变计算窗口宽度较大, 越过裂缝计入了非连续位移而导致应变计算结果严重失真, 裂缝边缘处的应变值基本超过 $10000 \mu\epsilon$, 而构造指数权重函数抑噪的本文方法有效地规避了这一缺点。图 9(c) 也表明, 在裂缝附近区域, 采用经典的 PLS 算法计算得到的拉应变最大值已经超过了 $25000 \mu\epsilon$, 这对于具有脆性性能的混凝土材料来说是十分不可靠的。而在对应位置, 构造指数

权重函数抑噪的本文方法的拉应变计算结果在 $500 \mu\epsilon$ 以内,与混凝土极限拉应变在同一数量级,更符合混凝土结构工程实践结果,其原因在于:1)构造指数权重函数抑噪的本文方法因为应变窗口宽度较

小而避免包含裂缝使其计入不连续位移的信息,从而大大降低了这种应变值失真情况的发生;2)当某点有应变值失真情况产生时,该失真应变值在指数权重函数中占据的权重较低,得到了一定的抑制。

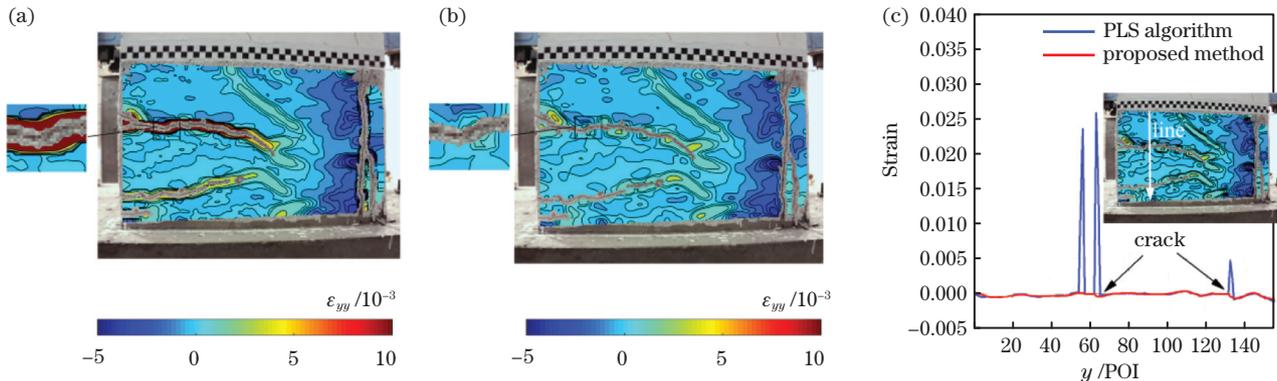


图 9 钢筋混凝土柱竖向应变场计算结果。(a)经典 PLS 算法计算结果[应变窗口尺寸: 15×15 (POI)];(b)构造指数权重函数抑噪的本文方法的计算结果[应变窗口尺寸: 9×9 (POI)];(c)内插图箭头处的两种方法的应变计算结果对比[插图:构造指数权重函数抑噪的本文方法在应变窗口尺寸为 9×9 (POI)时计算得到的竖向应变场]

Fig. 9 Results of vertical strain field of reinforced concrete column. (a) Vertical strain field calculated by classical PLS algorithm [strain window size: 15×15 (POI)]; (b) vertical strain field calculated by proposed method-ewf [strain window size: 9×9 (POI)]; (c) comparison of strain mapped on line located in corresponding sub-image of the two methods [inset: vertical strain field calculated by proposed method-ewf with strain window size of 9×9 (POI)]

4.4 计算速度比较

对经典 PLS 算法和本文方法获取到近似同等精度应变场时的计算速度进行比较。在模拟数字散斑实验中,根据表 1 和表 2,在均匀变形情况下,经典 PLS 算法、构造指数权重函数抑噪的本文方法和利用误差概率密度函数抑噪的本文方法的应变窗口尺寸分别选取 17×17 、 11×11 和 13×13 (POI);在不均匀变形情况下,三个方法的应变窗口尺寸分别选取为 15×15 、 9×9 和 11×11 (POI)。在带孔板拉伸实验和钢筋混凝土柱受弯实验中,经典 PLS 算法和构造指数权重函数抑噪的本文方法的应变窗口尺

寸分别选取为 15×15 和 9×9 (POI)。用于应变场计算的电脑配置如下:CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-8700,内存为 8 GB。计算速度结果见表 3,数值表示单位时间(1 s)内应变计算完成的计算点个数。相较于经典的 PLS 算法,构造指数权重函数抑噪的本文方法的计算速度提高了 65% 以上,这表明该方法在保证应变场计算精度的前提下,提高了计算效率。在数字散斑图像仿真和带孔板拉伸实验中,RFE 算法在平滑参数为 10 时的计算速度平均值为 4733.20 points/s,比本文方法在获得相同精度应变场时的计算速度慢。

表 3 三个方法的计算速度

Table 3 Computational speed of three methods

Test name	Deformation type	Classical PLS algorithm	Proposed method-ewf	Proposed method-pdf
Computer-speckle images	Homogeneous deformation	5147.68	8614.12	5471.46
	Inhomogeneous deformation	7160.32	12298.38	7242.64
Plate with one hole	—	7185.96	12090.94	—
Reinforced concrete column	—	6278.07	10728.89	—

5 结 论

本文基于单点的冗余应变信息提出利用概率密度函数或者构造指数权重函数,通过加权求和逐点抑制应变场中的噪声,以本文提出的抑噪方法应用

到逐点最小二乘法中为例,并通过了仿真和实例验证。本文方法能够通过更小的应变计算窗口获得与经典的逐点最小二乘法同等精度的应变场,因此计算效率大幅度提升;其次,本文方法的应变计算窗口尺寸更小,因此能够适应更复杂的变形情况(例如裂

缝附近),获得与工程实践更接近的应变值,计算结果更可靠;相较于基于正则化平滑的有限单元应变方法,本文方法的计算精度更高,而且计算速度更快。综上所述,本文提出的抑噪方法能够明显改善逐点最小二乘法等应变计算方法的精度、效率和适用范围等性能,是有效可行的。

参 考 文 献

- [1] Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1981, 28(10): 1359-1376.
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427-431.
- [3] Su Y, Zhang Q C, Wu X P. Progress in digital image correlation method[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(9): 29-53.
苏勇, 张青川, 伍小平. 数字图像相关技术的一些进展[J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 2018, 48(9): 29-53.
- [4] Wang F, Zhao L, Wu X D, et al. Measurement and analysis of concrete deformation field based on CT and digital image correlation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 200401.
王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 200401.
- [5] Wang X X, Jin Z Q, Jiang Y D, et al. Analysis of stress in concrete induced by corrosion of reinforcing bar based on DIC and strain test [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(16): 2690-2696.
王潇舷, 金祖权, 姜玉丹, 等. 基于 DIC 与应变测试的混凝土中钢筋锈蚀应力分析[J]. *材料导报*, 2019, 33(16): 2690-2696.
- [6] Shao X X, Chen Z N, Dai Y T, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3): 305-325.
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.
- [7] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 261-267.
- [8] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. Local Hermite (LH) method: an accurate and robust smooth technique for high-gradient strain reconstruction in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 26-38.
- [9] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. A practical and effective regularized polynomial smoothing (RPS) method for high-gradient strain field measurement in digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 215-226.
- [10] Yoneyama S, Koyanagi J, Arikawa S. Measurement of discontinuous displacement/strain using mesh-based digital image correlation[J]. *Advanced Composite Materials*, 2016, 25(4): 329-343.
- [11] Pan B, Asundi A, Xie H M, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7/8): 865-874.
- [12] Wu R, Liu Y, Zhou J M, et al. Full-field strain measurement of rotating object using digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312005.
吴荣, 刘依, 周建民, 等. 数字图像相关在旋转物体全场应变测量中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312005.
- [13] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation Matlab software [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(6): 1105-1122.
- [14] Kumar S L, Aravind H B, Hossiney N. Digital image correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program[J]. *Results in Engineering*, 2019, 4: 100061.
- [15] Pan B, Yuan J Y, Xia Y. Strain field denoising for digital image correlation using a regularized cost-function [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 9-17.
- [16] Yan B F, Li D R, Xu G Y, et al. Structural deformation test based on fast digital image correlation and regularization smoothing techniques [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 193-205.
晏班夫, 李得睿, 徐观亚, 等. 基于快速 DIC 与正则化平滑技术的结构形变测试[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 193-205.
- [17] Zhu T T, Fu Z N, Zhang M, et al. Initial value estimation of digital image correlation method in deformation measurement based on feature matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181012.
朱天天, 付中男, 张梅, 等. 基于特征匹配的数字图像相关法在变形测量中的初值估计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181012.
- [18] 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.
- [19] Mao J G, Zhang P Z, Shen H, et al. Reverse mapping for generating simulated deformed speckle patterns[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(12): 2433-2439.
毛建国, 张佩泽, 沈岷, 等. 基于反向映射法逆向描述数字散斑变形的的方法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(12): 2433-2439.
- [20] Xu X Y, Chen Z N, Huang Z, et al. Fabrication and application of digital speckle pattern in full-field measurement of deformed large concrete beams[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(5): 896-902.
徐向阳, 陈振宁, 黄正, 等. 大型混凝土梁全场变形测量中数字散斑场的制作和应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5): 896-902.
- [21] Han Y Y, Liu N S, Cai Y C. Application of digital image correlation (DIC) method in experimental research on compression damage of concrete [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015, 37(S2): 51-55.
韩依颖, 刘乃盛, 蔡永昌. 基于 DIC 方法的混凝土压缩试件裂纹识别 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37(S2): 51-55.