

基于数字图像相关的自适应应变场计算

李馨, 赵加清*, 张征明, 王海涛, 孙立斌, 吴莘馨

清华大学核能与新能源技术研究院先进核能技术协同创新中心, 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 针对基于数字图像相关(DIC)技术测量非均匀变形的应变方法需人为选择参数且精度受参数选择影响较大的问题, 基于对偏最小二乘(PLS)方法和正则多项式平滑(RPS)方法的误差分析, 提出了一种基于 DIC 的自适应应变场计算方法。该方法通过搜索给定参数范围内的最小总误差参数组合, 用最佳参数得到精度较高的应变场, 且测量结果受变形场类型的影响较小。模拟实验结果表明, 本方法的计算精度接近最佳参数下的 PLS 方法, 有效解决了 PLS 和 RPS 方法的最优参数选择问题。

关键词 测量与计量; 数字图像相关; 应变场; 自适应算法

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2312002

Self-Adaptive Strain Field Calculation Based on Digital Image Correlation

Li Xin, Zhao Jiaqing*, Zhang Zhengming, Wang Haitao, Sun Libin, Wu Xinxin

Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Advanced Nuclear Energy Technology, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract For measurement methods of heterogeneous deformation strain with digital image correlation (DIC) technology, the accuracy of the reconstructed strain is greatly affected by the manually selected parameters. Through error analysis of the partial least squares (PLS) method and the regularized polynomial smoothing (RPS) method, a DIC-based self-adaptive strain field calculation method is proposed in this paper to solve this problem. The method searches for the parameter combination with the minimum total error within the given parameter range and uses the optimal parameters to obtain a strain field with higher accuracy. The measurement result is slightly affected by the type of the deformation field. The simulation experiment results show that the calculation accuracy of the method is close to that of the PLS method at the optimal parameters. This research effectively solves the problem of selecting the optimal parameters of PLS and RPS methods.

Key words measurement and metrology; digital image correlation; strain field; self-adaptive algorithm

OCIS codes 120.6150; 100.2000; 150.1135

1 引言

数字图像相关(DIC)是一种测量物体表面全场变形的非接触式测量方法^[1-2]。一般通过拟合 DIC 位移场并对位移场进行微分获得应变场, 也可用 DIC 直接求解计算^[3-4]。由于 DIC 位移场含有噪

声, 应变场也会受到噪声的污染。为了获得精确的应变场, 降低位移场的噪声是非常必要的。若 DIC 位移场有较大的偏差(Bias)或系统误差, 应变场也会产生明显的偏差, 且无法通过应变场计算方法消除。目前, 工程实验^[5-7]中的难题主要集中在高梯度应变场(HSF)的测量方面。HSF 的特点是在小范

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-14; 录用日期: 2021-06-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51705279)、国家科技重大专项(ZX069)、清华大学自主科研计划

通信作者: *jqzhao@mail.tsinghua.edu.cn

围内变化剧烈,导致平滑技术中的核函数阶次可能与应变阶次不匹配,进一步导致了应变计算过程中的系统误差。

平滑技术可分为全局平滑方法和局部平滑方法两类,全局平滑方法包括薄板样条平滑(TPSS)方法^[8-9]和基于有限元的平滑方法,如改进的 Hermite 单元平滑法(IHFESM)^[10]和快速 Hermite 单元法(FHEM)^[11]。TPSS 用广义交叉验证方式从 DIC 位移场中估计最优位移场和应变场。IHFESM 和 FHEM 引入 Tikhonov 正则化,能有效平滑复杂的 DIC 位移场并重构应变场,且受噪声的影响较小。但全局平滑方法的原理繁杂且不易理解,计算量大,对硬件的要求较高。局部平滑方法中应用最广泛的是偏最小二乘(PLS)法^[12-13],PLS 操作简单但易受噪声^[14]、平滑窗口和核函数的影响。Wattrisse 等^[15]提出了一种基于最小二乘近似的局部逼近技术,但具有与 PLS 相同的问题。针对 HSF, Li 等^[16]基于 FHEM 提出了一种局部 Hermite(LH)方法,在提高应变场精度的同时减少了窗口选择对测量结果的影响,但 LH 的实现过程比较复杂。为了解决该问题,正则多项式平滑(RPS)方法^[17]用与 PLS 相同的核函数并引入了 LH 中的 Tikhonov 正则化,相比 LH 方法,RPS 方法更容易实现,且测量结果受窗口的影响较小,精度更高。

上述平滑技术均需人为选择参数,且各类方法的精度始终受参数选择的影响。为解决参数选择问题,本文借鉴自适应 DIC 的相关研究^[18],分析了二阶 PLS(核函数为二阶多项式的 PLS)和二阶 RPS(核函数为二阶多项式的 RPS)在应变计算过程中产生的随机误差和系统误差,并提出了一种自适应应变场计算方法。该方法通过逐点搜索给定参数范围内的最小总误差判定该点的最佳参数组合,进而通过平滑位移计算应变,并通过两组模拟实验对该方法进行了验证。实验中假定应变的随机误差来源于 DIC 位移场噪声,系统误差为平滑算法核函数阶次与变形阶次的不匹配误差。

2 基本原理

2.1 PLS 和 RPS 的原理及误差分析

二阶 PLS 利用二阶多项式逐点拟合 DIC 位移场,并根据拟合后的多项式系数进行应变计算,原理为 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 。其中, \mathbf{x} 为待求的变形分量, \mathbf{b} 为 DIC 位移场, \mathbf{A} 为与二阶核函数和平滑窗口大小相关的矩阵。在平滑窗口内部形成一个以窗口中

心为原点的局部坐标系,窗口的横向与纵向坐标范围均为 $[-m, m]$ 。RPS^[17]是结合 PLS 和 LH 优点提出的应变计算方法,采用与 PLS 相同的核函数,利用 Tikhonov 正则化减少 DIC 位移场噪声的干扰,同时降低窗口大小对应变测量精度的影响。RPS 的原理为 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$,其中, \mathbf{S} 为 Tikhonov 正则化中的正则矩阵^[16-17], λ 为正则因子,当 $\lambda = 0$ 时,RPS 退化为 PLS。

在最小二乘方程 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ 中,DIC 的位移场 \mathbf{b} 可表示为 $\mathbf{b} = \mathbf{b}_{\text{theory}} + \mathbf{b}_{\text{error}}$,其中, $\mathbf{b}_{\text{theory}}$ 为真实位移值, $\mathbf{b}_{\text{error}}$ 为位移误差; \mathbf{x} 可表示为 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\text{theory}} + \mathbf{x}_{\text{error}}$,其中, $\mathbf{x}_{\text{theory}}$ 为变形的真实解, $\mathbf{x}_{\text{error}}$ 为变形误差。PLS 和 RPS 计算应变的过程中,产生的误差可分为系统误差(偏差)以及随机误差。在应变重构过程中,若 DIC 位移场的偏差较大,则无法获得精确的应变场。因此,本方法不考虑 DIC 位移场偏差引起的应变系统误差,仅考虑 DIC 位移场噪声以及核函数阶次与真实变形阶次不匹配引起的应变误差。假设 $\mathbf{b}_{\text{error}}$ 为随机误差且在每个平滑窗口内是独立的零均值高斯白噪声,标准差为 σ 。该假设在真实 DIC 测量中很难实现,但可通过多种方式逼近,如运用高阶灰度插值函数和形函数、适当的子区^[19-21]、精度更高的测量系统^[22]。因此,先用 DIC 选择恰当的形函数或插值函数计算位移,使位移场偏差最小,再用本方法计算应变。

应变的系统误差由低阶核函数与高阶次变形之间的不匹配引起^[18,23],推导误差时以 x 方向为主,可将其拓展至 y 方向。对于二阶 PLS 方法,根据 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$,得到

$$\begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & D_2 & 0 & D_2 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_2 & 0 & 0 & 0 \\ D_2 & 0 & 0 & D_4 & 0 & D_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_3 & 0 \\ D_2 & 0 & 0 & D_3 & 0 & D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2(x, y) \\ u_{2x}(x, y) \\ u_{2y}(x, y) \\ u_{2xx}(x, y) \\ u_{2xy}(x, y) \\ u_{2yy}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i,j} u_2(x+i, y+j) \\ \sum_{i,j} i u_2(x+i, y+j) \\ \sum_{i,j} j u_2(x+i, y+j) \\ \sum_{i,j} i^2 u_2(x+i, y+j) \\ \sum_{i,j} i j u_2(x+i, y+j) \\ \sum_{i,j} j^2 u_2(x+i, y+j) \end{bmatrix}$$

式中, $D_1 = \sum_{i,j=-m}^m 1$, $D_2 = \sum_{i,j=-m}^m i^2$, $D_3 = \sum_{i,j=-m}^m i^2 j^2$, $D_4 = \sum_{i,j=-m}^m i^4$, m 为半窗口的大小。对于二阶 RPS 方法, 有矩阵方程 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S}) \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$, 其中, \mathbf{S} 为对角矩阵, 且 $\text{diag}(\mathbf{S}) = [0, D_1, D_1, 4D_2, 2D_2, 4D_2]$ 。根据(1)式求解二阶 RPS 的矩阵方程后, 对 $P_i (i=1, \dots, 6)$ 进行 3 阶泰勒展开, 得到二阶 RPS 的应变 $u_{2x}(x, y)$ 为

$$u_{2x}(x, y) = \frac{1}{D_2 + \lambda D_1} \times \left[D_2 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{6} \left(D_4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 3D_3 \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \right) \right] u(x, y), \quad (2)$$

二阶 RPS 的应变系统误差 $e_s = u_{2x}(x, y) - \frac{\partial}{\partial x} u_2(x, y)$, 也可表示为

$$e_s = \frac{1}{D_2 + \lambda D_1} \times \left[-\lambda D_1 \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{6} \left(D_4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 3D_3 \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \right) \right] u(x, y), \quad (3)$$

其中, 各位移的梯度可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \sim [-1 \quad 1] \\ \frac{\partial^3}{\partial x^3} \sim [-1 \quad 3 \quad -3 \quad 1] \\ \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \sim \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 2 & -2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (4)$$

式中, 符号 \sim 后表示偏分算子。需要注意的是, DIC 位移场的随机误差会明显影响(4)式计算位移梯度的精度。因此需要尽可能获得高精度、低噪声的 DIC 位移场。应变的随机误差来源于 DIC 位移场的 $\mathbf{b}_{\text{error}}$ 和应变方法本身^[23-24]。基于对 $\mathbf{b}_{\text{error}}$ 的假设, 得到 $\mathbf{b}_{\text{error}}$ 的协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 。其中, σ 为 DIC 位移场的随机误差^[24], \mathbf{I} 为单位矩阵。则 RPS 方法变形误差 $\mathbf{x}_{\text{error}}$ 的方差矩阵可表示为

$$\text{Var}(\mathbf{x}_{\text{error}}) = \sigma^2 \text{diag}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S})^{-1}]. \quad (5)$$

(5)式中的方差矩阵为对角矩阵, 应变的随机误差(标准差)为 $\text{Var}(\mathbf{x}_{\text{error}})_{2,2}$ 的算术平方根。根据文献^[23]的方式推导方差矩阵, 得到二阶 RPS 方法的应变随机误差为

$$\sigma_r = \frac{\sigma \sqrt{3f}}{(2m+1) \sqrt{m(m+1)}}, \quad (6)$$

式中, $f = \text{diag}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_2 \times \text{diag}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{S})^{-1}]_2$, 下标 2 表示对角线上的第 2 个元素。(3)式和(6)式中, 当 $\lambda = 0$ 时, RPS 退化为 PLS, 可分别获得二阶 PLS 计算应变时产生的系统误差与随机误差。

基于二阶 RPS 方法的应变误差, 得到应变的总误差 e_t 为

$$e_t = \sqrt{(e_s)^2 + (\sigma_r)^2}. \quad (7)$$

可以发现, 应变总误差 e_t 随不同参数的变化而变化, 如半窗口大小 m 和正则因子 λ 。

2.2 自适应应变场的计算方法

对于 DIC 位移场上的每个点, 均有一组随参数变化的应变总误差值。通过寻找最小的 e_t 确定最佳的半窗口大小和正则因子, 并用该参数组合计算对应点的位移和应变。基于该思想, 提出了一种自适应应变场的计算方法, 具体步骤如下。

1) 计算 DIC 位移场的随机误差 σ_r ^[24]: 用(4)式计算位移梯度, 选定一组半窗口范围, 计算 $D_i, i=1, \dots, 4$, 选定一组 λ 值计算随机误差 σ_r 。

2) 计算 DIC 位移场上每个感兴趣点(POI)的系统误差 e_s : 先基于相同参数组合的随机误差 σ_r 和系统误差 e_s , 获得总误差 e_t ; 然后搜索一系列总误差 e_t 中的最小值, 获取最小值对应的半窗口 m 和正则因子 λ 。

3) 用步骤 2) 中确定的半窗口 m 和正则因子 λ 计算当前感兴趣点的位移和应变。

4) 重复步骤 2) 和步骤 3), 直到自适应应变场计算方法完成全场扫描。

3 实验结果与分析

为了验证自适应应变场计算方法的有效性 with 精度, 进行了两组模拟实验和形状记忆合金(SMA)真实实验。模拟实验的变形图像基于理论位移和参考散斑图, 并使用 7 阶 B 样条插值函数产生。8 位深度散斑图的分辨率为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$, 在所有散斑图像上添加 1%、2% 和 3% 的高斯白噪声(方差分别为 2.55 bit、5.10 bit 和 7.65 bit)。DIC 参数: 步长为 1, 子区大小为 $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$, 形函数阶次为 2 阶。用自适应应变场计算方法(SSA)、不同窗口大小的 PLS 方法和 RPS 方法分别计算应变场, 窗口范围为 7~31(奇数)。根据文献^[14]将正则因子 λ 设定为 $[10^{-9}, 10^{3.5}]$ 范围内的 20 个点(包括 0), λ 的值为 $10^c, c$ 为 $[-9, 3.5]$ 范围内等距分布的数值。

3.1 实验 1

实验 1 使用复杂变形场以及不同噪声水平验证 SSA 的优越性。复杂变形场的理论位移 $v = \rho \sin(\theta)$, $u=0$, 其中, $\rho = \frac{10^{-10}}{2} \times (x^2 + y^2)^2$, $\theta = 8 \times \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$, 坐标范围 $(x, y) \in [1, 400]$ 。理论位移

v 和位移梯度 v_x, v_y 如图 1 所示。图 2(a)、图 2(b) 为含有 1% 噪声的散斑图, 图 2(c) 为该组散斑图的 DIC 位移场 v , 图 2(d)、图 2(e) 为含有 2% 和 3% 噪声的 DIC 位移场 v 。图 3 为不同噪声情况下, 三种应变求解方法拟合的应变场与理论应变场的均方根误差 (E_{RMS})。

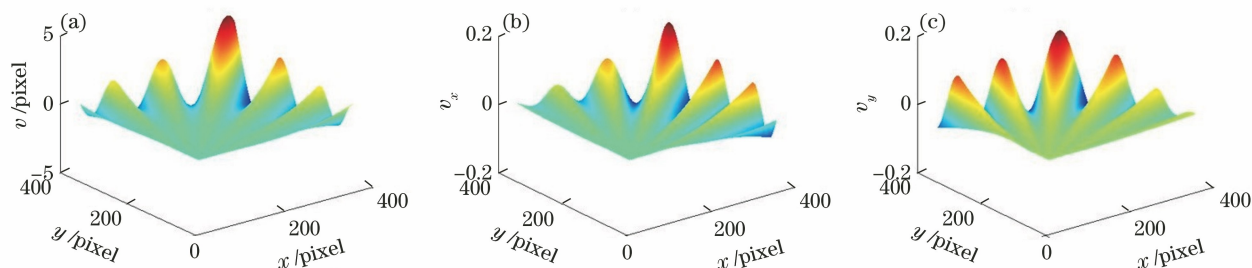


图 1 实验 1 的结果。(a)理论位移场 v ; (b)理论应变场 v_x ; (c)理论应变场 v_y

Fig. 1 Results of the experiment 1. (a) Theoretical displacement v ; (b) theoretical strain field v_x ; (c) theoretical strain field v_y

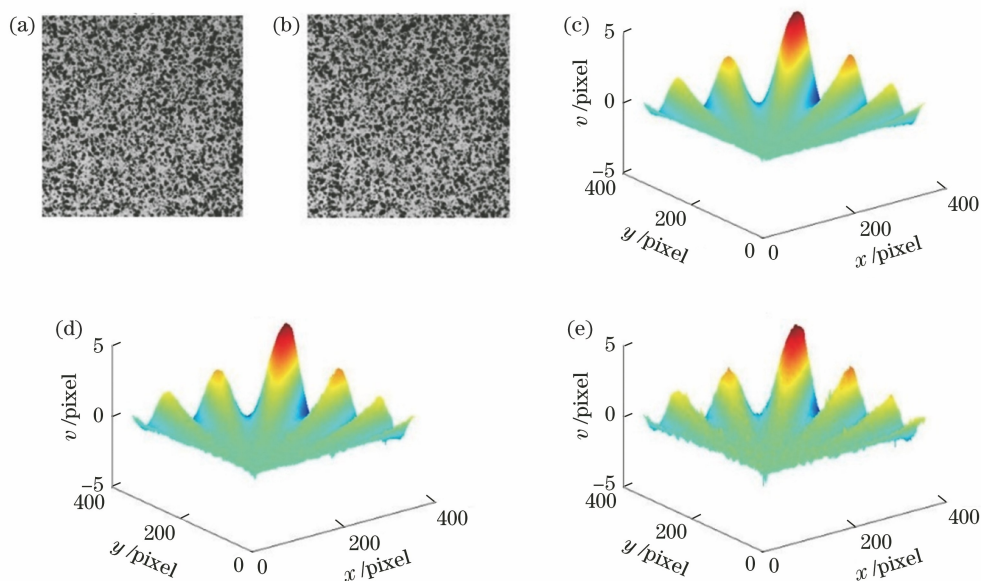


图 2 不同噪声水平下的位移场。(a)含 1% 噪声的参考图像; (b)含 1% 噪声的变形图像; (c)含 1% 噪声的 DIC 位移场 v ; (d)含 2% 噪声的 DIC 位移场 v ; (e)含 3% 噪声的 DIC 位移场 v

Fig. 2 Displacement field under different noise levels. (a) Reference image with 1% noise; (b) deformed image with 1% noise; (c) DIC displacement field v with 1% noise; (d) DIC displacement field v with 2% noise; (e) DIC displacement field v with 3% noise

从图 3 可以发现, PLS 和 RPS 对应的最佳窗口和 E_{RMS} 均随噪声的增大不断增大。在 1% 噪声情况下, PLS 和 RPS 的最佳窗口分别为 17 和 19, E_{RMS} 值为 0.0017, SSA 的 E_{RMS} 值为 0.0019 (v_y) 和 0.0020 (v_x); 在 2% 噪声情况下, PLS 和 RPS 的最佳窗口分别为 21 和 23, E_{RMS} 值为 0.0025, SSA 的 E_{RMS} 值均为 0.0028; 在 3% 噪声情况下, PLS 和

RPS 的最佳窗口均为 25, E_{RMS} 值均为 0.0031, SSA 的 E_{RMS} 值为 0.0039 (v_y) 和 0.0037 (v_x)。当噪声水平为 1% 和 2% 时, SSA 可以重构出与最佳窗口精度相似的应变场, 这表明该方法在 1% 和 2% 的噪声情况下可以准确搜索出给定参数范围内的最佳参数并计算出高精度的应变场。当噪声水平为 3% 时, 在窗口范围 21~31 内, PLS 和 RPS 的应变场精

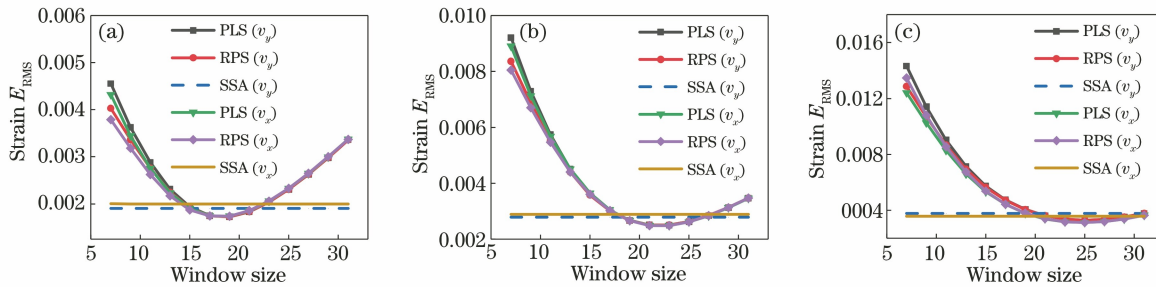


图 3 三种方法计算的应变场 E_{RMS} 。(a)噪声为 1%；(b)噪声为 2%；(c)噪声为 3%

Fig. 3 E_{RMS} of strain field calculated by three methods. (a) Noise is 1%; (b) noise is 2%; (c) noise is 3%

度变化不大,这表明在该范围内应变场精度对窗口变化不敏感。虽然 SSA 的 E_{RMS} 值与 PLS 最佳窗口对应的 E_{RMS} 值略有差距,但对于使用小窗口(如 7~15)的 PLS 而言,SSA 的应变场计算结果也是较为精确的。对比不同噪声下不同方法的计算结果发现,只有 DIC 位移场的精度足够高,才能获得准确的应变场。当 DIC 位移场的精度较高时,应变场的精度对于 PLS 和 RPS 窗口的敏感度也较高,因此在实际应用中难以确定最佳窗口。而 SSA 可搜索给定参数范围内的最佳参数,重建高精度应变场。在小窗口情况下,RPS 的精度比 PLS 高,但窗口增大后,RPS 的精度与 PLS 类似,原因是正则化对于二阶核函数的作用较小且对小窗口数据点少的病态问题修正作用更大^[15]。

表 1 为三种方法的计算时长,计算环境:系统为 Window 10, Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @ 3.30 GHz, 64 位操作系统,软件为 MatlabR2012a。可以发现,PLS 方法的耗时较短,而 RPS 方法的耗时较长,SSA 的耗时则居于两者中间。这表明在使用二阶核函数的情况下,正则化对计算精度的影响较小,因此可忽略正则因子 λ 的取值范围,将其设置为 0。

表 1 三种方法的计算时间

Table 1 Calculation time of three methods unit: s

Method	Window size				
	7	11	15	19	21
PLS	4.54	5.90	7.93	10.49	13.81
RPS	12.87	72.25	100.46	183.93	330.19
SSA	21.03				

3.2 实验 2

实验 2 使用两个不同波数的 sin 型位移场验证 SSA 在平缓变形场和剧烈变形场的灵敏度。理论位移分别为 $u_1 = \sin(2\pi x/400)$ 和 $u_2 = \sin(6\pi x/400)$, v_1 和 v_2 均为 0,坐标范围 $(x, y) \in [1, 400]$ 。散斑图的噪声和 DIC 的参数设置与实验 1 一致。

由实验 1 可知,在二阶核函数情况下正则化的作用较小,因此将实验 2 中自适应应变场计算方法的 λ 设为 0,只与 PLS 方法进行对比。图 4(a)、图 4(b)为 u_1 变形的含 1% 噪声散斑图,图 4(c)为该组散斑图的 DIC 位移场 u 。图 4(d)、图 4(e)为 u_2 变形的含 1% 噪声散斑图,图 4(f)为该组散斑图的 DIC 位移场 u 。

图 5 为不同噪声水平下,两组变形的拟合应变场与理论应变场的 E_{RMS} 值。可以发现,用二阶 PLS 拟合 DIC 位移场时,不同变形方法对应的最佳窗口也不同。当变形比较平缓时,窗口越大,PLS 重构的应变场越精确,且 SSA 能获得精度接近 PLS 最佳窗口下的应变场,如图 5(a)中的 u_1 位移场。当变形比较剧烈时,在不同噪声水平情况下,PLS 计算结果的最佳窗口均不同。SSA 重构的应变场 E_{RMS} 值均略大于 PLS 最佳窗口的 E_{RMS} 值。但相比 PLS 在整个窗口范围(7~31)下的 E_{RMS} 值,SSA 的计算精度高于使用大窗口 PLS 的精度,如图 5(b)中的 u_2 位移场。因此,对于不同的变形场及噪声水平,SSA 能够较为准确地获得高精度应变场。值得一提的是,实验 2 中 SSA 的 λ 设置为 0,但其计算耗时与实验 1 几乎一致。

3.3 实验 3

实验 3 用 SMA 拉伸实验验证 SSA 的适应性。NiTi SMA 薄带在单轴拉伸时,应力会诱发马氏体相变,从而引起应变局部化和不稳定性,这也是该材料的突出特点。图 6(a)、图 6(b)为实验散斑图,散斑图定义的 ROI 共有 84999 个数据点,图 6(c)为 DIC 位移场。对 DIC 位移场使用 SSA 和不同窗口大小的 PLS(PLS-N, N 为窗口尺寸)重构应变场,其中,SSA 的参数设置与实验 1 相同。需要指出的是,在实际实验中,真实应变场和真实变形模式是未知的,无法准确确定 PLS 计算该变形场的最佳窗口。由实验 1 和实验 2 可知,在高应变梯度的变形

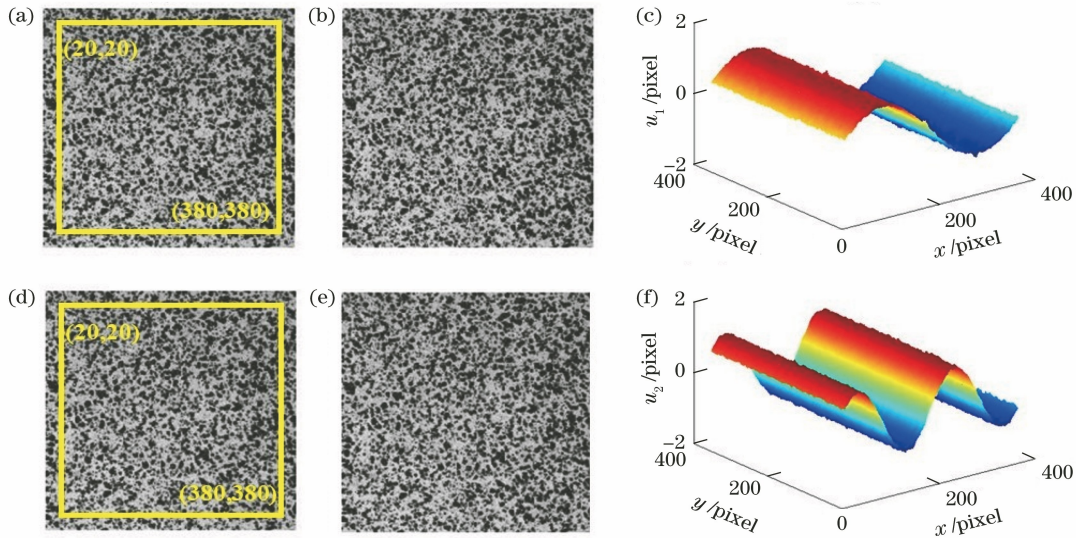


图 4 参考图像、变形图像和 DIC 位移场。(a)参考图像(u_1);(b)变形图像(u_1);(c) DIC 位移场(u_1);
(d)参考图像(u_2);(e)变形图像(u_2);(f) DIC 位移场(u_2)

Fig. 4 Reference image, deformed image and DIC displacement. u_1 deformation: (a) Reference image(u_1); (b) deformed image (u_1); (c) DIC displacement (u_1); (d) reference image (u_2); (e) deformed image (u_2); (f) DIC displacement (u_2)

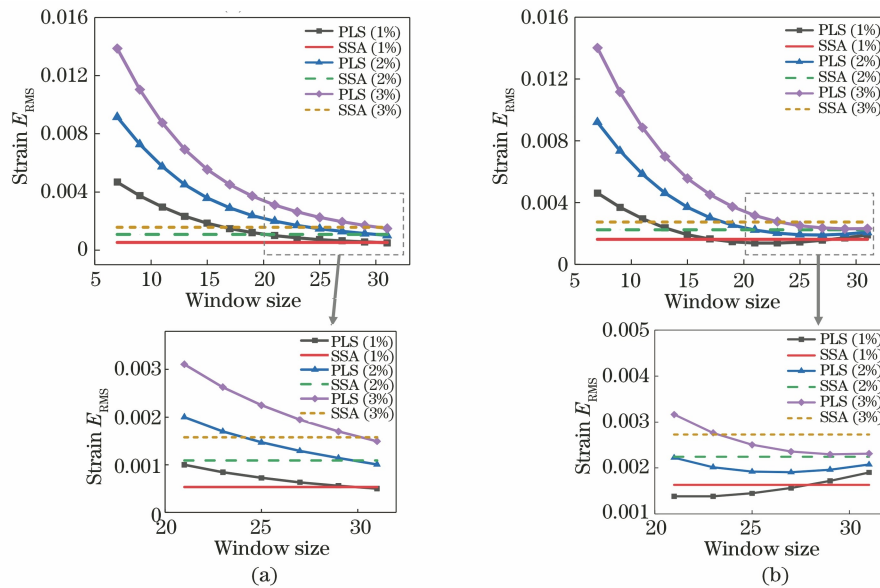


图 5 不同位移场和噪声情况下 PLS 方法和 SSA 的 E_{RMS} 。(a) u_1 变形;(b) u_2 变形

Fig. 5 E_{RMS} of PLS method and SSA under different displacement fields and noise conditions. (a) u_1 deformation; (b) u_2 deformation

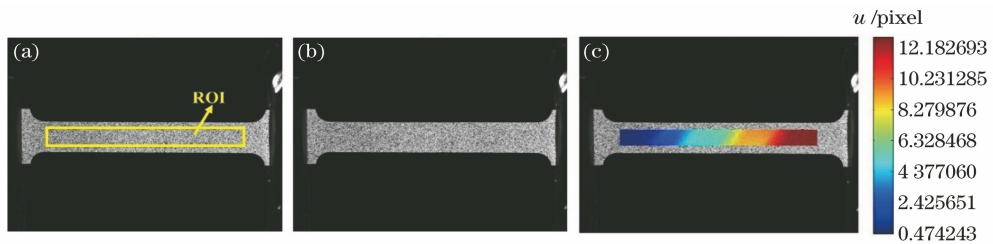


图 6 SMA 实验。(a)参考图像;(b)变形图像;(c) DIC 位移场

Fig. 6 SMA experiment. (a) Reference image; (b) deformed image; (c) DIC displacement

场情况下, PLS 的最佳窗口在 21~31 之间。图 7 为不同窗口下 PLS 方法和 SSA 方法计算的应变值。可以发现, 在高应变梯度变形场情况下, SSA 与 PLS 方法计算的应变值曲线更光滑, 噪声更小; 且 SSA 计算的应变值曲线与 PLS-19、PLS-25、PLS-31 方法计算的应变值曲线接近, 这表明 SSA 可以给出符合 SMA 材料相变特性的应变场, 验证了该方法的适用性。

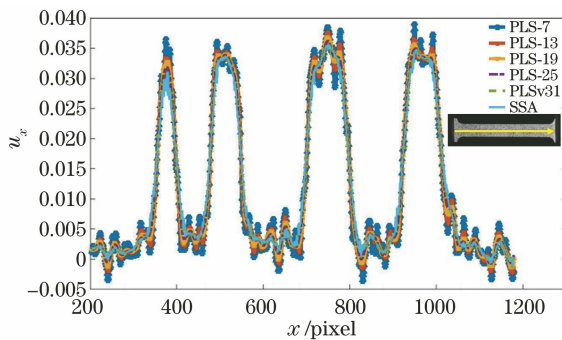


图 7 PLS 方法和 SSA 计算的应变值

Fig. 7 Strain values calculated by PLS method and SSA

4 结 论

针对传统应变方法需要人为选择参数且精度受参数选择影响的问题, 提出了一种自适应应变场计算方法。该方法基于对 PLS 和 RPS 方法随机误差与系统误差的理论分析, 通过搜索给定参数范围内的最小总误差确定对应的最佳参数组合, 并用最佳参数组合重构高精度的应变场。通过两组模拟实验对比了 SSA、PLS 和 RPS 方法在不同噪声水平和不同变形场情况下的计算精度。结果表明, SSA 可以给出对应参数范围内最佳组合的高精度应变场。最后, 在 SMA 单轴拉伸实验中验证了 SSA 的实用性。

参 考 文 献

- [1] Sutton M A, Wolters W J, Peters W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method [J]. *Image and Vision Computing*, 1983, 1(3): 133-139.
- [2] Jones E M C, Iadicola M A. A good practices guide for digital image correlation [EB/OL]. (2019-08-10) [2021-04-02]. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1.cn>.
Jones E M C, Iadicola M A. 数字图像相关可靠实践指南 [EB/OL]. (2019-08-10) [2021-04-02]. <https://doi.org/10.32720/idics/gpg.ed1.cn>.
- [3] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0312001.
王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量 [J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0312001.
- [4] 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.
- [5] Ashrafi M, Tuttle M E. High strain gradient measurements in notched laminated composite panels by digital image correlation [M]//Tandon G. *Composite, hybrid, and multifunctional materials, volume 4. Conference proceedings of the society for experimental mechanics series*. Cham: Springer, 2015: 75-81.
- [6] Hwang S F, Wu W J. Deformation measurement around a high strain-gradient region using a digital image correlation method [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(10): 3169-3175.
- [7] Lagattu F, Brillaud J, Lafarie-Frenot M C. High strain gradient measurements by using digital image correlation technique [J]. *Materials Characterization*, 2004, 53(1): 17-28.
- [8] Craven P, Wahba G. Smoothing noisy data with spline functions [J]. *Numerische Mathematik*, 1978, 31(4): 377-403.
- [9] Wang C C, Deng J M, Ateshian G A, et al. An automated approach for direct measurement of two-dimensional strain distributions within articular cartilage under unconfined compression [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2002, 124(5): 557-567.
- [10] Zhao J Q, Zeng P, Pan B, et al. Improved Hermite finite element smoothing method for full-field strain measurement over arbitrary region of interest in digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(11): 1662-1671.
- [11] Zhao J Q, Song Y, Wu X X. Fast Hermite element method for smoothing and differentiating noisy displacement field in digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 68: 25-34.
- [12] 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.
- [13] Pan B, Xie H M. Full-field strain measurement based

- on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1980-1986.
- 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量 [J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1980-1986.
- [14] Lehoucq R B, Reu P L, Turner D Z. A novel class of strain measures for digital image correlation [J]. *Strain*, 2015, 51(4): 265-275.
- [15] Wattrisse B, Chrysochoos A, Muracciole J M, et al. Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(1): 29-39.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Wang B, Pan B. Self-adaptive digital volume correlation for unknown deformation fields [J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(2): 149-162.
- [19] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [20] Bing P. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001.
- [21] Li K Q, Zhu D, Tong X X. Digital speckle correlation method based on improved curved surface fitting method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051001.
- 李凯强, 朱丹, 佟新鑫. 基于改进曲面拟合法的数字散斑相关方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051001.
- [22] Yan J, Ye N, Li T C, et al. Research and implementation of industrial photogrammetry without coded points [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1015002.
- 严俊, 叶南, 李廷成, 等. 无编码点的工业摄影测量技术的研究及实现 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1015002.
- [23] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. Random error in strain calculation using regularized polynomial smoothing (RPS) and point-wise least squares (PLS) in digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106590.
- [24] Wang B, Pan B. Random errors in digital image correlation due to matched or overmatched shape functions [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 1717-1727.