

数字图像相关法中一种动态应变子区选择算法

王莹**, 沈岷*, 夏瀚笙, 刘敦强

南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016

摘要 数字图像相关法测量具有非接触式、全场测量、结构简单等优点而得到广泛研究和应用。传统的应变场计算方法以位移场局部最小二乘拟合过程为核心,使用全场统一的子区大小进行计算。在非均匀变形测量过程中,这种计算方式存在较大的算法误差。较大的应变子区会使局部的变形梯度平滑,而较小的应变子区不能对位移场误差进行有效地抑制。因此,根据位移场局部梯度强度提出了一种位移场修正和动态选择应变计算子区大小的方法,并且模拟生成散斑图像进行仿真。结果表明:所提方法有效降低了数字图像相关法在非均匀变形测量过程中的计算误差,同时系统精度也得到提升。基于位移场局部梯度强度的动态子区选择算法原理简单,计算准确度高。

关键词 图像处理; 数字图像相关; 非均匀变形; 动态子区; 位移场; 应变场

中图分类号 O348.1; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091001

An Dynamic Strain Subset Selection Algorithm in Digital Image Correlation Method

Wang Ying**, Shen Huan*, Xia Hansheng, Liu Dunqiang

College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Digital image correlation method is widely studied and applied due to its advantages, such as non-contact, whole measurement, and simple structure. The traditional calculation method of strain fields takes the local least squares fitting process of the displacement field as the core, and uses the unified subset size of the whole field to be calculated. However, there is a biggish algorithm error in the process of heterogeneous deformation measurement. Larger strain subset size will smooth local deformation gradient, while smaller strain subset size cannot effectively reduce the displacement field error. Therefore, according to the local gradient intensity of the displacement field, a novel algorithm is proposed to correct displacement fields and dynamic select the strain for calculating the subset size, and simulate the results of the speckle images. The results show that the proposed method effectively reduces the calculation error of the digital image correlation method in heterogeneous deformation, and while the system precision is improved. The dynamic subset selection algorithm based on the local gradient intensity of the displacement fields has a simple principle and high calculation accuracy.

Key words image processing; digital image correlation; heterogeneous deformation; dynamic subset; displacement fields; strain fields

OCIS codes 100.2000; 120.3940; 120.6150

1 引言

数字图像相关法(DIC)是一种先进的现代光测力学方法,具有非接触式、全场应变和自然光源等优点^[1]。DIC已经应用于许多领域,比如材料特性表达、温度变形、断裂分析、微电子可靠性评估以及立

体匹配等^[2-4]。基于DIC的应用可以分为均匀变形测量和非均匀变形测量,其中非均匀变形测量应用是最普遍、最重要的^[5]。在DIC中位移场计算子区和应变场计算子区大小的选择是关键问题,已有不同的方法和参数可用于子区的大小的选择。Sun等^[6]提出了子区熵的概念,探究子区大小对变形测

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 航空科学基金(20170923001)

* E-mail: huan_shen@nuaa.edu.cn; ** E-mail: ywang060@163.com

量精度的影响,而子区大小的选择与图像质量和子区位移函数有关,并认为可通过子区熵来评价子区图像的质量。Pan 等^[7-8]从散斑图像灰度梯度方面出发,提出了位移场误差平方和(SSD)和图像子区灰度梯度平方和(SSSIG)参数,对子区内部散斑图的质量进行评价进而决定选择子区的大小,另外,由Hassan 等^[9]定义的参数灰度变化率,其求解方法和目的类似于SSSIG。其他的如巴特沃斯窗口和高斯窗口^[10-11],二者涉及到的是空间领域,在子区大小自适应选择方面,都带有权重零正则化偏差平方和。上述参数和方法均用于在全局或者局部灰度梯度情况下动态地选择相关子区,但是利用全局图像优化子区的大小比较困难,由于散斑分布的随机性,在不同的图像区域散斑图案是不同的,因此为了得到较高的测量精度,必须在图像上不同的区域选取不同的子区大小。而某些基于局部图像区域方法的使用会受散斑大小和密度的限制,在实际中,想要生成一幅斑点的大小、间距和密度等都符合要求的随机散斑图,几乎是不可能的。

本文通过使用DIC方法处理计算得到的带有误差的位移场,以修正位移场,同时为应变计算窗口

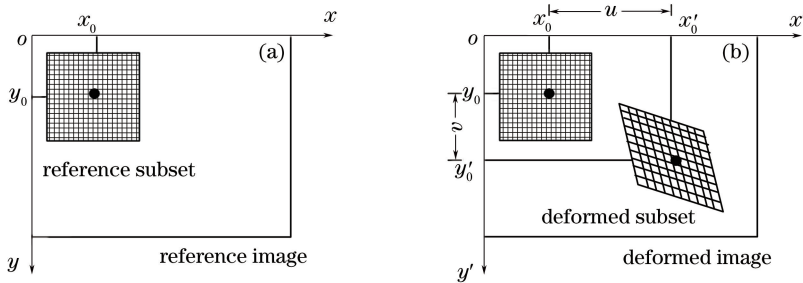


图1 变形前后图像子区示意图

Fig. 1 Schematic of image subset before and after deformation

2.2 局部非均匀变形梯度强度参数

DIC本质上是基于图像灰度特征的匹配与跟踪过程,通常包含整像素位移的初值估计和亚像素位移的迭代计算两个过程,对应于此,分别采用了尺度不变特征转换(SIFT)算法^[15]和牛顿-拉普森(NR)算法^[16]。通过整像素位移的初值估计,可以极大地缩小位移求解空间的范围,从而加快整个计算过程。在小变形小转角且图像散斑特征良好的情况下直接使用模版卷积算法,获得相关性的峰值位置,即位移初值;在含有大变形或者大转角情况下使用基于尺度不变特征SIFT的初值估计方法,其优点是提取的特征描述子具有尺度不变特性,同时抗旋转、减小光照和噪声的影响^[17]。而NR迭代算法求解相关函

大小的选取提供依据,以此提高应变场的测量精度。尤其在非均匀应变领域,本文方法均优于之前的灰度梯度和空间领域情况^[12-14]。

2 理论与算法

2.1 DIC基本原理

数字图像相关法通过处理被测对象表面变形前后的数字图像,直接获取位移和应变信息。通常将变形前的图像称为变形前图像或参考图像,变形后图像称为变形后图像或目标图像。在变形前图像中以某一待测点为中心,取大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的参考图像子区,在变形后图像中以某一像素点为 (x_0, y_0) 中心选取同样大小的目标图像子区,利用选定的相关函数按照一定的搜索方式进行相关性计算,寻找到与参考图像子区相关性最大的以 (x'_0, y'_0) 为中心的目标图像子区,进而确定参考图像子区的位移。由于变形后的目标图像子区中心位置不仅会发生变化,而且还可能会产生形变,因此,通过“形函数”将图像子区坐标点 (x_0, y_0) 和 (x'_0, y'_0) 联系起来。将参考图像子区和目标图像子区称为相关子区,如图1所示。

数极值是目前数字图像相关法采用的主流方法。传统的应变场计算方法以位移场局部最小二乘拟合^[18]过程为核心,使用全场统一的子区大小进行计算,而固定的子区大小在非均匀变形测量过程有一定的局限性。

在应变计算子区内,非均匀变形引起的局部位移场非均匀性远大于局部位移场自身误差。如图2所示,底面表示网格节点坐标,垂向表示对应节点的位移,子区四周的曲线表示局部位移场的非均匀性,子区边缘的齿状抖动表示局部位移场自身的误差。

在应变子区内,要利用DIC得到可靠、准确的应变计算结果,以及提高应变测量精度,就需要提高

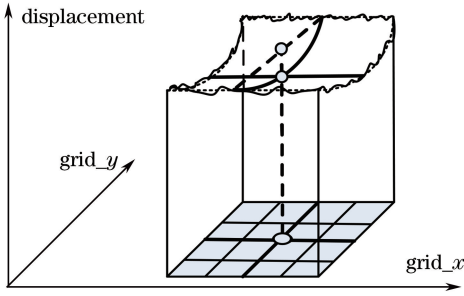


图2 局部位移场误差与非线性关系示意图

Fig. 2 Schematic of local displacement fields error and non-linear relationship

位移场的测量精度并根据实际变形情况选择合适的应变计算窗口^[18]。根据在图像相关子区中,小变形梯度情况下形函数描述变形准确,而大变形梯度情况下,形函数描述变形存在较大误差^[9,18,20],因此,在位移梯度变化大的区域内,需要较小的子区以保证描述子区变形的准确性,在位移梯度变化小的区域内,选择较大的子区抑制随机噪声误差。据上所述,定义了一个描述局部非均匀变形梯度强度的参数 λ ,即在某一方向上,计算位移场中一个局部区域(称之为应变计算窗口)内的各个位移点与网格中间点对应位移点的梯度之和,进而根据窗口大小计算出参数 λ 。1) $\lambda_x(r)$ 和 $\lambda_y(r)$ 用于修正非均匀位移场误差;2) $\lambda(r)$ 作为动态选择应变计算子区大小的依据。求解公式定义为

$$\lambda_x(r) = \frac{\sum_{\Omega_x} d_x}{2(2r+1)^2}, \quad (1)$$

$$\lambda_y(r) = \frac{\sum_{\Omega_y} d_y}{2(2r+1)^2}, \quad (2)$$

$$\lambda(r) = |\lambda_x(r)| + |\lambda_y(r)|, \quad (3)$$

式中 r 为应变计算窗口的半径, Ω_x 和 Ω_y 分别为在网格节点数为 $(2r+1) \times (2r+1)$ 的应变计算窗口中各节点对应的 x 方向的位移 d_{px} 和 y 方向的位移 d_{py} 的集合。过中间网格节点所对应的位移点,作平面 P_1 ,使得 P_1 平行于由这组位移点最小二乘拟合出的平面 P 。则 d_x 表示 Ω_x 中的各位移点到平面 P_1 的距离,同样地可求得 d_y 。

1) 位移场误差修正

r_0 通过相关子区大小和网格间距确定 $r_0 = [M/g_s] - 1$,如相关子区大小为50 pixel,网格间距是5 pixel,则 r_0 为5,这样才能够确保相关子区和应变子区有相同的大小的像素单元。(4)式表示修正后的位移。

$$\begin{cases} d'_{px} = d_{px} + \lambda_x \\ d'_{py} = d_{py} + \lambda_y \end{cases} \quad (4)$$

2) 选择应变子区大小

定义 $(2r+1)$ 为应变子区的大小,在当前散斑图像下, r 根据 $\lambda(r)$ 和位移场随机误差之间的关系确定。依据参考图像子区与目标图像子区,利用(1)~(3)式计算得出一系列的 $\lambda(r)$ 层,如 $\lambda(2) \sim \lambda(15)$,进而得出图3中的 $r-\lambda(r)$ 关系曲线。根据经验,还应当求出这些图像由于环境因素导致的位移场随机误差,由于引起位移场计算误差最主要的原因是在采集图像时环境因素造成的,所以针对一定量的静态图像(即被测对象未受外力作用变形前采集的图像)求出其由环境因素导致的位移场随机误差,理论上即为位移场计算误差。而由(3)式中的参数求解公式可以看出,位移场某一局部区域(在此被称为应变计算窗口)内,位移点间梯度变化的不均衡性,反映出了位移场计算误差,而这个反映出来的位移场计算误差与环境因素导致的位移场随机误差是等效的。所以,对于不同的应变计算窗口,通过对比确定出此窗口下的位移场随机误差在图3中对应的 r 或最接近 r 的值,并取此 r 作为当前应变计算窗口半径。

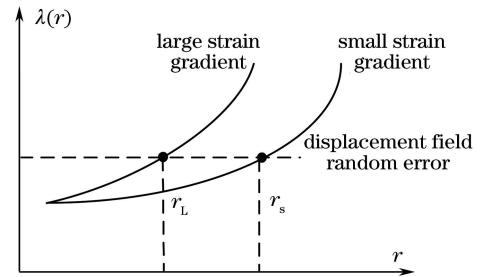


图3 应变场计算子区大小动态选择方法示意图

Fig. 3 Schematic of strain fields subset size dynamic selection method

3 仿真与分析

3.1 仿真实验

仿真实验用来验证本文算法在非均匀变形情况下的效果,针对上节提出的误差修正方法进行仿真验证与分析。生成一系列不同的非均匀变形情况下的散斑图,其中一个散斑图生成算法已经得到广泛应用^[13],表示为

$$f(i, j) = \sum_k I_k \cdot \exp\left[-\frac{(x_i - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}{R^2}\right], \quad (5)$$

式中 (x_k, y_k) 为随机生成的散斑中心, I_k 为散斑中心的灰度。生成非均匀变形模拟散斑图像的大小为 $250 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ ^[11], 散斑密度为4%, 散斑数量为12000, 平均半径为2 pixel, 并且中心点的灰度值为128, 如图4所示

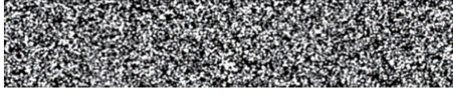
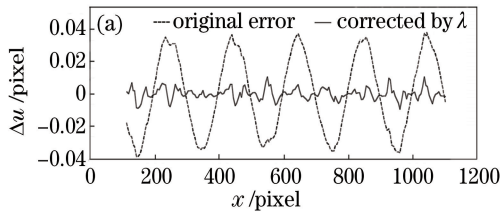


图4 带状非均匀变形模拟散斑图

Fig. 4 Zonal heterogeneous deformation simulated speckle pattern

利用基于反向映射法的模拟散斑生成方法生成变形后的仿真散斑图^[19], 在水平方向位移场模拟加入按正弦规律变化的非均匀变形, 带状模拟散斑图



可以呈现多个周期性规律。在水平方向模拟加入的位移场, 表示为

$$U(X) = \alpha \sin(2\pi X/q), \quad (6)$$

式中 α 为水平位移峰值, q 为正弦规律变化位移场的周期。当周期 q 固定的情况下, 峰值 α 反映非均匀变形的强度。在本节仿真过程中, 设定周期 $q = 200 \text{ pixel}$ 。

按照 $\alpha = 1/\pi$ 和 $\alpha = 12$ 两种情况进行仿真分析。当 $\alpha = 1/\pi$ 时, 表示较小程度的非均匀变形 $\epsilon_{x, \min} = 2\pi\alpha/q = 1\%$; $\alpha = 1$ 时, 表示较大程度的非均匀变形 $\epsilon_{x, \max} = 2\pi\alpha/q \approx 3.14\%$, 仿真计算结果如图5、6所示。其中虚线表示未经过所提算法修正的原始误差, 实线表示经过算法修正后的误差。应变场误差是在理论应变场为10000微应变的前提下得出的。

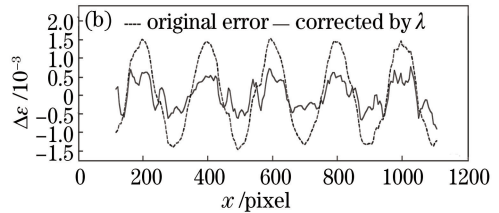


图5 小变形情况下修正前后误差。(a)位移场误差;(b)应变场误差

Fig. 5 Errors before and after correction under the small deformation condition.

(a) Displacement field errors; (b) strain field errors

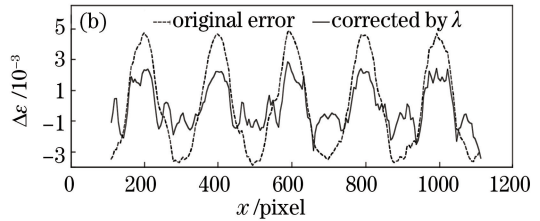
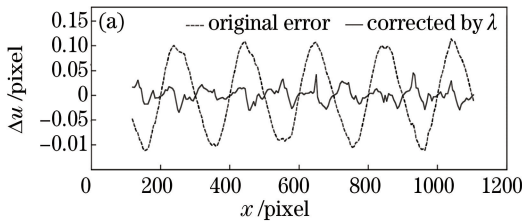


图6 大变形情况下修正前后误差。(a)位移场误差;(b)应变场误差

Fig. 6 Errors before and after correction under the large deformation condition. (a) Displacement field errors;

(b) strain field errors

同时, 表1是本文方法与近几年DIC领域其他相关方法的比较。

表1 本文方法与其他相关方法的对比

Table 1 Contrast the proposed method with other related methods

| Method | Strain fields error |
|------------------|---------------------|
| Proposed method | -0.002-0.003 |
| Ref. [5] method | -0.3089-0.0992 |
| Ref. [13] method | >0.003 |
| Ref. [21] method | -0.008-0.004 |

3.2 结果与对比

图5展示了小变形情况下, 本文算法得出的位移场误差达到了0.01的像素级别。同时, 利用参数

λ 选取应变子区大小后, 计算得到的应变场误差也明显减小。图6为大变形情况下, 本文算法得出位移场误差值更小。由表1可知, 相同变形情况下文献[5, 13, 21]中的仿真结果明显 $>0.005 \text{ pixel}$ 。同时, 利用参数 λ 选取应变子区大小后, 应变场误差也有所减小。以上说明, 在基于局部非均匀变形梯度强度情况下, 本文算法对非均匀变形测量中的应变场误差抑制明显, 可以很好地适用于大小非均匀变形。

4 结论

提出了用于修正位移场和动态选择应变计算子

区大小的局部非均匀变形梯度强度参数 λ , 以有效降低 DIC 在非均匀变形测量过程中的计算误差。模拟散斑图仿真分析的结果也充分证实了所提算法能够有效、可靠地修正位移并提高位移场的测量精度, 这些都为应变计算窗口大小的选择提供依据, 进而提高了应变场的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Liu C, Dai Y T, Dai M L, *et al.* by Two-dimensional multi-camera full-field digital image correlation deformation measurement method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1212002.
刘聪, 戴云彤, 戴美玲, 等. 二维多相机全场数字图像相关变形测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1212002.
- [2] Pataky G J, Sehitoglu H. Experimental methodology for studying strain heterogeneity with microstructural data from high temperature deformation [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 53-63.
- [3] O'Connor S J, Nowell D, Dragnevski K I. Measurement of fatigue crack deformation on the macro- and micro-scale: uniform and non-uniform loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 89: 66-76.
- [4] Shan B H, Huo X Y, Liu Y. Astereovision measurement method using epipolar constraint to correct digital image correlation matching [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0804003.
单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0804003.
- [5] Jerlhag E, Weinland C, Porcu P, *et al.* On the use of the digital image correlation method for heterogeneous deformation measurement of porous solids [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2011, 49(2): 200-209.
- [6] Sun Y F, Pang J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 967-974.
- [7] Pan B, Xie H, Wang Z, *et al.* Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [8] Pan B, Wu D F, Xie H M, *et al.* Spatial-gradient-based digital volume correlation technique for internal deformation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 120-126.
潘兵, 吴大方, 谢惠民, 等. 基于梯度的数字体图像相关方法测量物体内部变形 [J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 120-126.
- [9] Hassan G M, Macnish C, Dyskin A, *et al.* Digital image correlation with dynamic subset selection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 1-9.
- [10] Zhan Q, Yuan Y, Fan X T, *et al.* Digital image correlation involves an inverse problem: A regularization scheme based on subset size constraint [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 81: 54-62.
- [11] Yuan Y, Huang J Y, Peng X L, *et al.* Accurate displacement measurement via a self-adaptive digital image correlation method based on a weighted ZNSSD criterion [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52(1): 75-85.
- [12] Wittevrongel L, Debruyne D, Lomov S V, *et al.* Implementation of convergence in adaptive global digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(5): 797-811.
- [13] Wittevrongel L, Lava P, Lomov S V, *et al.* A self adaptive global digital image correlation algorithm [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(2): 361-378.
- [14] Huang J, Pan X, Peng X, *et al.* Digital image correlation with self-adaptive Gaussian windows [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(3): 505-512.
- [15] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [16] Sutton M A, Mingqi C Q, Peters W H, *et al.* Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis [J]. *Image and Vision Computing*, 1986, 4(3): 143-150.
- [17] Yu Z J, Wang S B. Improve PCA-SIFT algorithm for matching stereo system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031501.
于之靖, 王韶彬. 改进 PCA-SIFT 算法的立体匹配系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031501.
- [18] 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.
- [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, 沈岍, 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] Cofaru C, Philips W, Paepegem W V. A novel

speckle pattern—adaptive digital image correlation approach with robust strain calculation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 187-198.

[21] Wu R, Kong C, Li K, *et al.* Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(5): 1-11.