

文章编号: 0258-7025(2010)02-0526-05

基于图像跟踪的低维材料实时应变测量方法

王 伟¹ 肖建强¹ 何小元²

(¹ 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167)
(² 东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096)

摘要 为了实时得到低维材料的应变,提出了一种基于数字图像跟踪的低维材料实时应变测量方法。首先,将试件上制作的标志点或试件表面适当的特征点作为跟踪目标,采用改进的适于跟踪测量的图像相关公式,以及根据低维材料变形特点选取相应的匹配模板和搜索区域,实现了实时测量应变所需的两点跟踪;利用双线性插值算法将目标定位在0.01 pixel上的位置,提高了该方法的测量精度。然后分级施加荷载,不仅实时跟踪到目标,而且得到低维材料在相应载荷下的实时应变值,为研究低维材料动态力学特性提供了一种实验方法。通过实验,验证了数字图像跟踪技术完全可以应用于低维材料的实时应变测量,并且适用于不同距离标志点之间的测量,相对误差在5%以内。

关键词 测量;实验力学;实时应变;数字图像跟踪技术;图像相关;低维材料

中图分类号 O348 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0526

Real-Strain Measurement of Low-Dimensional Materials Based on Digital Image Tracking

Wang Wei¹ Xiao Jianqiang¹ He Xiaoyuan²

(¹ College of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)
(² Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract In order to obtain the real-strain of low dimensional materials, the real-strain measurement of low-dimensional materials based on digital image tracking has been proposed. First, the speckles pre-made on the sample or its surface feature points are taken as the tracking objects. Two points are successfully tracked in the real-strain measurement by adopting the improved image correlation formula and selecting the correlative matched template and search region that are determined by analyzing the deformation characteristic of low-dimensional materials. By using the arithmetic of bilinear inter value, the objective is orientated in the 0.01 pixel location, so the measurement precision has been improved. Then, the loads are exerted at grade step. The objects can be successfully tracked. And, the real-strain value under the correlative loads has been obtained. Furthermore, it is an experiment method for studying the dynamic mechanics of low-dimensional materials. The experiment shows that the tracking technology can be fully applied in the real-strain measurement of low-dimension materials. Moreover, the method is also applied in the real-strain measurement of different distances between two speckles. And, the relative calculation error is controlled in 5%.

Key words measurement; experimental mechanics; real-strain; digital image tracking technology; image correlation; low-dimensional material

1 引 言

低维材料已成为当前材料学研究的热点之一,它们在高科技领域具有举足轻重的地位与作用,一

般包括除三维材料之外的二维、一维和零维材料^[1]。随着低维材料在宇航、国防工业、计算机、环境保护、化工、医药、生物和核工业等领域中的广泛应用,必

收稿日期:2009-02-27;收到修改稿日期:2009-04-21

基金项目:南京工程学院人才科研启动基金(KXJ08016)资助项目。

作者简介:王 伟(1976—),男,博士,讲师,主要从事光测力学实验及测试分析方面的研究。

E-mail:ww1177114@163.com

将在研制和发展过程中提出一系列与力学相关的新问题^[2,3]。对于低维材料如薄膜、丝等,由于自身特点的限制导致不便于安装位移传感器,并且在其表面上不能粘贴应变片,所以无法用传统拉伸实验进行测试。目前,已有学者在该领域取得了可喜的成果^[4~6],但实时动态测量其应变变化的研究尚不多见。因此,鉴于计算机数字图像处理技术的飞速发展^[7~10],本文将数字图像跟踪技术^[11~14]应用到低维材料应变测量中,实现了加载过程中应变的实时动态测量。

2 图像跟踪原理

由于数字图像易受外界环境因素的影响,因此,为了保证跟踪的准确性,将跟踪目标定为一块具有明显特征的小区域。该区域可以在试件上预先制定,也可以利用试件表面上的斑点。设图像平面的

坐标系为 xOy , $\mathbf{X}=(x,y)$ 表示图像平面上的位置向量。目标中心的强度分布函数为 $f(\mathbf{X})$;则目标中心在 t 时刻的数学模型可表示为

$$p(\mathbf{X};t) = f(\mathbf{X}). \quad (1)$$

由于目标处于运动状态,因此目标中心在图像平面上的位置向量 \mathbf{X} 也在不断变化,即

$$\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X} + \mathbf{A}_R(t), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}_R(t)$ 为目标中心在 t 时刻的平移向量。从 t 到 $t+1$ 时刻的目标中心演变模型为

$$p[\mathbf{X};(t+1)] = f[\mathbf{X} + \mathbf{A}_R(t);t]. \quad (3)$$

可见,目标运动参量是以 $\mathbf{A}_R(t)$ 为标志的。那么,该参量的估值 $\hat{\mathbf{A}}_R(t)$ 可由求取最大相关系数的算法得到,该算法的示意图如图 1 所示。设 $m \times n$ 为目标区域大小, $M \times N$ 是目标在 $t+1$ 时刻需要搜索的区域大小,则从 t 到 $t+1$ 时刻,两幅图像模型之间的相关系数^[15]为

$$C(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{f[(x_i,y_j) + \mathbf{A}_R(t);t] - \bar{f}(t+1)\} \times \{f[(x_i,y_j);t] - \bar{f}(t)\}}{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{f[(x_i,y_j) + \mathbf{A}_R(t);t] - \bar{f}(t+1)\}^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{f[(x_i,y_j);t] - \bar{f}(t)\}^2 \right\}^{1/2}}. \quad (4)$$

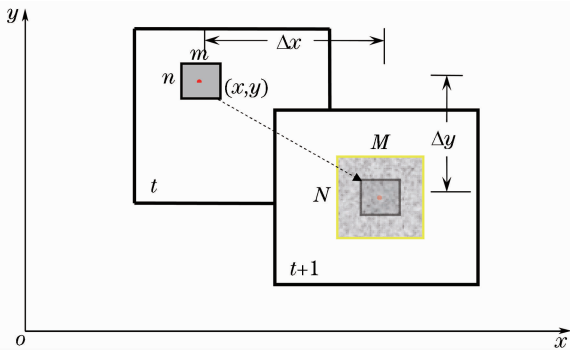


图 1 求取最大相关系数的算法示意图

Fig. 1 Arithmetic diagram of calculating maximum correlation coefficient

为了提高运算速度,取其平方形式作为图像跟踪的计算公式。其中 $\bar{f}(t+1)$ 和 $\bar{f}(t)$ 分别表示目标区域在 $t+1$ 和 t 时刻图像灰度的平均值。充分考虑到拉伸试件的变形特点,通过计算目标在矩形模板 $(m \times n)$ 和矩形搜索区域 $(M \times N)$ 中的相关系数,其最大值 $C(x,y)_{\max}$ 对应的位置向量 (x',y') 即为目标中心运动到 $t+1$ 时刻的位置向量,则平移向量 $\mathbf{A}_R(t)$ 的估值 $\hat{\mathbf{A}}_R(t)$ 为

$$\hat{\mathbf{A}}_R(t) = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' - x \\ y' - y \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$ 就是目标中心移动的位移量。然后,通过程序设定,将跟踪系统中的光标移动 $\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$ 的位移量,此时跟踪光标已经移动到新的目标中心。将新的目标作为下一帧的匹配模板,进行实时动态改变,从而能够实时跟踪到目标。

实现了目标的实时跟踪,为下一步应变的测量提供了前提条件。为了提高应变测量精度,应用两次双线性插值算法来达到高精度的定位^[16]。具体实施过程见图 2 所示。首先,将跟踪目标的中心点定位在整像素上,图中以十字星 A 表示,然后在其周围上下左右一个像素内,以 0.1 的步长重新搜索,进行相关运算,匹配到一个中心点(以 B 表示),然后再以该中心点 B 为中心,在其周围上下左右各 0.1 pixel 范围内,以 0.01 的步长重新搜索,此时最大相关系数所对应的位置(以 C 表示)即为目标在 0.01 pixel 精度上的位置。

3 实验及数据处理

为了将此测量方法向工程界推广,使之满足工程需要,首先研究了该实时应变测量方法的稳定性。

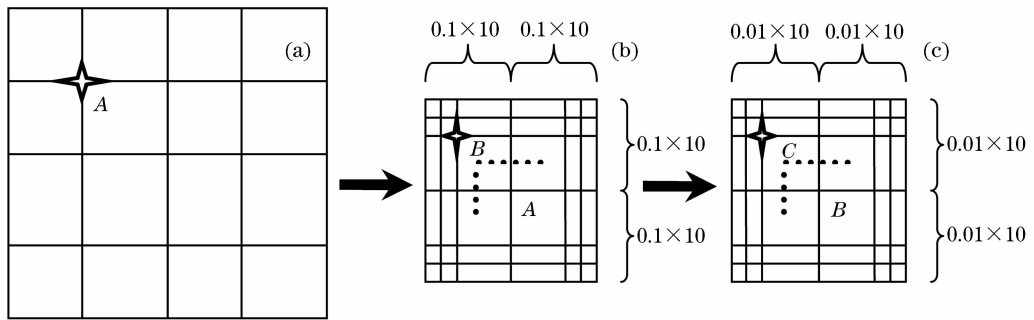


图 2 两次双线性插值算法示意图。(a) 整像素;(b) 0.1 pixel;(c) 0.01 pixel

Fig. 2 Diagram of two step bilinear inter value. (a) integer pixel; (b) 0.1 pixel; (c) 0.01 pixel

选取一尺寸为40 mm×3 mm×2 mm的橡皮带,将其固定在加载装置上。然后,在橡皮带表面做两个黑色标记线,如图3所示。然后等位移量拉伸试件(在该试件弹性变形范围内),并观察试件上两标记线之间的应变值是否发生线性变化就可以验证该方法的稳定性。图4给出了试件上两标记线之间的应变随加载步的变化规律。从图中可以看出,实验数据可以用一条直线进行线性拟合,也就是说,试件在等幅加载情况下的变形是线性的,符合实际情况,从而可以得到满意的结果。可见,本方法具有较好的稳定性。

研究对象,将该长度段的一端固定,另一端可以自由拉伸。然后,在拉伸端利用螺旋测微器进行了4组等幅加载实验,4组等幅加载量分别为:0.1,0.15,0.2和0.25 mm/step。本次实验的初始状态如图5所示,跟踪结果见图6。在实时应变测量过程中,发现固定端处用鼠标左键选择的标记基本保持不动,而拉伸端处用鼠标右键选择的标记会随载荷的增加而沿拉伸方向实时运动。即在图上可见右端十字标记线发生了移动,而左端十字标记线基本保持在原来位置。因此,基于上述分析,实验得到的应变就是该段带有标记线长度的拉伸应变。

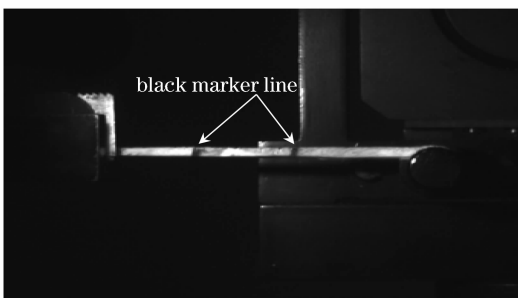


图 3 拉伸的初始状态图

Fig. 3 Original image of uniaxial tension

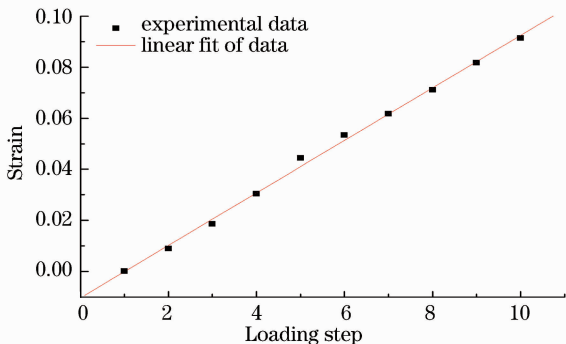


图 4 应变随加载步的变化规律

Fig. 4 Strain regulation along with loading step

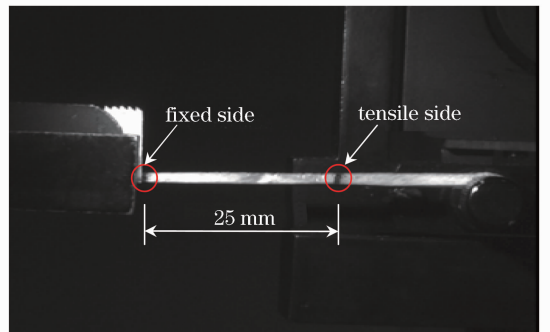


图 5 系统精度验证初始状态图

Fig. 5 Original image of testing the system precision

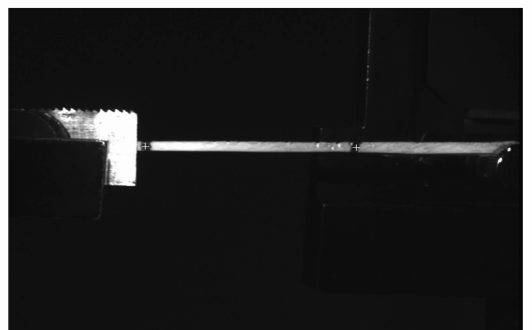


图 6 目标跟踪结果图

Fig. 6 Result image of tracking objective

其次验证了两次双线性插值算法的精度。首先,在橡皮带试件上选取长度为25 mm的一段作为

在试件弹性变形范围内,利用上述 4 种加载量分别对试件进行 4 次拉伸实验,得到 4 组试件在标记长度内相应载荷下的应变。表 1 为 4 组拉伸应变的实验数据和相对误差(注:表中的每一个实验数据

都是平均值)。从表 1 中计算的相对误差来看,实验数据和真实值比较接近,误差较小,基本上都在 5% 以内。通过 4 组验证实验,说明该实时应变测量方法的计算精度还是比较高的,可以满足工程需要。

表 1 应变测量值及其相对误差

Table 1 Strain value and its correlative calculation error

Groups	Step /mm	Strain value	True value	Correlative calculation error /%
First group 0.1 mm/step	0.1	0.004061	0.004	1.5
	0.2	0.007682	0.008	-3.9
	0.3	0.011641	0.012	-3.0
	0.4	0.015612	0.016	-2.4
	0.5	0.019250	0.020	-3.8
Second group 0.15 mm/step	0.15	0.005868	0.006	-2.2
	0.30	0.012143	0.012	1.2
	0.45	0.017327	0.018	-3.7
	0.60	0.025092	0.024	4.6
	0.75	0.030673	0.030	2.2
Third group 0.2 mm/step	0.2	0.008051	0.008	0.6
	0.4	0.016513	0.016	3.2
	0.6	0.023388	0.024	-2.6
	0.8	0.030925	0.032	-3.4
	1.0	0.041168	0.040	2.9
Fourth group 0.25 mm/step	0.25	0.009569	0.010	-4.3
	0.50	0.019612	0.020	-1.9
	0.75	0.030377	0.030	1.3
	1.00	0.041419	0.040	3.5
	1.25	0.052376	0.050	4.8

4 结 论

为了探讨低维材料实时的变形性能,提出了基于数字图像跟踪的低维材料实时应变测量方法。实验不仅验证了测量方法的可行性,可以实时跟踪到目标,而且使得应变测量的相对误差在 5% 以内。另外该方法也为低维材料的动态力学性能测试提供了一种有效的实验方法。

参 考 文 献

- Li Yan, Jiang Bin, Deng Hong *et al.*. Research on low dimension materials [J]. *Materials Review*, 2004, **18**(3):9~12
李 燕,姜 斌,邓 宏等. 低维材料的研究[J]. 材料导报, 2004, **18**(3):9~12
- X. Kang, X. Y. He, L. Liu. Application of non-contact deformation measurement in mechanical properties study of MEMS [C]. *SPIE*, 2002, **4537**:418~421
- X. Y. He, X. Kang, C. Quan *et al.*. Optical methods for the measurement of MEMS materials and structures [C]. *SPIE*, 2002, **4537**:63~68
- T. Hua, H. M. Xie, B. Pan *et al.*. A new micro-tensile system for measuring the mechanical properties of low-

dimensional materials—fibers and films [J]. *Polym. Test.*, 2007, **26**(4):513~518

- B. Pan, H. M. Xie, Z. Q. Guo *et al.*. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(3):033601
- Ji Hongwei, Yu Bennong, Ping Youmei *et al.*. Investigation of the mechanical properties of molded pulp with DICM [J]. *Packaging Engineering*, 2004, **25**(4):168~170
计宏伟,余本农,平幼妹等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J]. 包装工程, 2004, **25**(4):168~170
- Sheng Jinchang, Liu Jishan, Su Baoyu. Coupled multiphysics analysis in fractured rock masses based on digital image processing technique [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(10):30~35
盛金昌,刘继山,速宝玉. 基于图像数字化技术的裂隙岩石多场耦合分析[J]. 工程力学, 2007, **24**(10):30~35
- Sun Wei, He Xiaoyuan, Quan Chenggen *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):894~901
孙 伟,何小元,C. Quan等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(5):894~901
- Pan Bing, Xie Huimin. 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
- 10 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):197~201
杨 勇,王琰蕾,李 明 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):197~201
- 11 D. A. Montera, S. K. Rogers, D. W. Ruck *et al.*. Object tracking through adaptive correlation [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(1):294~302
- 12 J. S. Cho, D. J. Kim, D. J. Park. Robust centroid target tracker based on novel distance features in cluttered image sequences [C]. *SPIE*, 2000, **4067**:1045~1056
- 13 D. S. Jang, H. I. Choi. Active models for tracking moving objects [J]. *Pattern Recognition*, 2000, **33**:1135~1146
- 14 Chen Dongyan, Zhang Qi, Wang Yanling *et al.*. Implementation of maneuver target prediction in image tracking system [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(1):33~37
陈东炎,张 玘,王艳玲 等. 图像跟踪系统中机动目标预测的实现[J]. *应用光学*, 2007, **28**(1):33~37
- 15 Wang Wei, Liu Gendi, Dong E-liang *et al.*. Image analysis for mandibular molar and post-core prosthesis [J]. *J. Applied Sciences*, 2006, **24**(6):637~641
王 伟,刘根娣,董萼良 等. 数字图像分析用于下颌后磨牙及其桩核修复体[J]. *应用科学学报*, 2006, **24**(6):637~641
- 16 P. Zhou, K. E. Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image speckle correlation (DISC) [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(8):1613~1620