

实时数字图像相关用于土木准静态实验测量

邵新星¹ 戴云彤¹ 何小元¹ 王海涛² 吴刚²

¹东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096

²东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

摘要 基于种子点扩散的并行计算方法及反向组合高斯-牛顿算法, 实现了数字图像相关的现场实时测量。根据被测区域的连通性与不连通性, 分别描述了单种子点与多种子点的并行计算方法。结果表明, 多种子点并行计算方法可以有效地解决不连通区域的实时测量。成功将该方法用于土木准静态实验测量, 实时获取全场位移及应变。碳纤维增强复合材料(CFRP)片材-钢板界面粘结滑移关系实验表明: 该方法可以实时获取全场变形, 根据变形场可直接判断剥离点的位置; 该方法实时记录了界面剥离的扩展过程, 直接得到了CFRP片材与钢板界面粘结滑移关系, 为研究纤维增强复合材料(FRP)加固界面性能提供了有效的测量手段。实时测量将有助于数字图像相关方法在土木行业更进一步的推广。

关键词 测量; 实时数字图像相关; 土木工程; 准静态实验

中图分类号 TN911.74 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1012003

Real-Time Digital Image Correlation for Quasi-Static Test in Civil Engineering

Shao Xinxing¹ Dai Yuntong¹ He Xiaoyuan¹ Wang Haitao² Wu Gang²

¹Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

²The key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract A real-time digital image correlation method is realized using the seed point-based parallel method and inverse compositional Gauss-Newton algorithm. According to the continuity of measured area, the single-seed parallel method and multiple-seed parallel method are described respectively. The results indicate that the multiple-seed parallel method can be effectively used to measure regions separated by poorly correlated data. The proposed method is successfully applied to quasi-static test in civil engineering, obtaining the full-field displacement and strain distribution in real time. Conclusions can be obtained from the experiment of measuring the bond-slip relationship of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) sheet-steel interface: the method can be used to gain the full-field deformation and the location of stripping area can be determined directly; the stripping process of interface can be recorded in real time and bond-slip relationship of interface can be obtained directly, which provides an effective way to measure and analyze the behavior of fiber reinforced plastic(FRP) consolidating structure. The real-time measurement will help to further promote digital image correlation method in civil engineering.

Key words measurement; real-time digital image correlation; civil engineering; quasi-static test

OICS codes 120.3940; 100.2000; 120.4290

1 引言

随着土木工程领域新材料、新结构、新工艺的发展, 很多问题中都需要使用全场、非接触的变形测量

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11272089、11327201)、国家科技支撑计划(2014BAK11B00)

作者简介: 邵新星(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事光测力学与图像处理方面的研究。E-mail: shaoxinxing@seu.edu.cn

导师简介: 何小元(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构变形监测、微电子器件力学行为等方面的研究。

E-mail: mmhxy@seu.edu.cn(通信联系人)

技术^[1]。单点测试技术(百分表、应变片等)已经无法满足测试需求。光学测量方法因其全场、非接触的优势,越来越多地被用于土木工程领域的实验研究中。

应用于宏观尺度变形测量的光学测量方法主要有全息干涉法^[2]、云纹干涉法^[3]、电子散斑干涉法^[4-7]、投影栅线^[8]和数字图像相关(DIC)方法^[9-11]等。与全息、散斑干涉等方法相比,数字图像相关具有设备更加简单、对测量环境的要求更低、测量范围更广的优点。与光学实验室中的测量相比,土木工程实验的测量环境通常都比较复杂。鉴于此,数字图像相关成为了土木领域中最受关注的光学测量方法^[12]。

目前,数字图像相关已经被成功地应用于土木工程领域中静、动态实验研究中。准静态实验测量是土木工程领域实验研究中非常重要的一部分,一般以1~2 frame/s的频率采集图像(通常不超过10 frame/s,有时甚至低于1 frame/s)^[12-13]。由于土木工程领域中的实验周期都很长,即使以低于1 frame/s的频率采集图像,到实验结束也会记录下大量的图片。这些图片记录了荷载作用下试样变形直至破坏的全过程,由于涉及的图像数据量大,导致变形计算和分析非常耗时,因而相关计算速度的提升有利于增加数据分析的时效性。同时,如果相关计算速度足够快,在采集图像的同时,实时求解出感兴趣区域的变形信息、实时判断破坏点的位置,则可为土木实验研究提供更全面、直接的实验依据。

根据土木工程领域中的实际需求,本文基于种子点扩散的并行计算方法及反向组合高斯-牛顿算法,实现了数字图像相关的现场实时测量。介绍了实时数字图像相关方法,将实时数字图像相关应用于碳纤维增强复合材料(CFRP)片材-钢板界面粘结滑移关系实验,以此证明方法的可行性与有效性,对实时数字图像相关方法做了简短的讨论并给出了结论。

2 实时数字图像相关方法

实时数字图像相关方法,即计算速度足够快,在采集图像之后立即计算出试样变形并显示。数字图像相关方法中,亚像素位移算法、插值算法及初值传递策略是影响计算速度的三个重要因素^[9,14-15]。研究者在这三个方面做了很多工作,如:Baker等^[16]在2001年提出了相比于传统牛顿-拉普森算法具有更快计算速度的反向组合高斯-牛顿算(IC-GN)算法;Chen等^[17]提出了质量导向的初值传递策略,初值的传递有利于减少迭代次数,而质量导向则可以提高其在复杂变形下的稳健性;Pan等^[18]将反向组合高斯-牛顿算法、质量导向算法及插值查找表相结合提出了一种减少冗余计算的标准算法。由于这些方法都是串行计算,计算速度的提高有限。计算机的快速发展使并行计算成为可能,这将很大程度上减少计算时间。Jiang等^[19]提出了一种列传递的并行计算方法;Jiang等^[20]提出一种路径无关算法,将基于快速Fourier变换的互相关算法和反向组合高斯-牛顿算法结合,同样可实现并行计算;近期,Shao等^[21]提出一种种子点扩散传递的并行算法,结合反向组合高斯-牛顿算法,利用多核CPU在8线程的计算机上计算速度约为质量导向算法的7倍。为了解决不连续区域的实时测量问题,这里在种子点扩散并行算法的基础上,提出了多种子点并行计算方法。

2.1 反向组合高斯-牛顿算法

为了提高卢卡斯-卡耐德算法的计算速度,Baker等^[16]在2001年提出反向组合高斯-牛顿算法,该算法起初主要被用于图像对齐。Sutton等^[22]在其专著中曾对反向组合高斯-牛顿算法在数字图像相关中的使用做了一些介绍,但是并不详细。Pan等^[18,23]对比了该算法与传统牛顿-拉普森算法的计算效率,并讨论了该算法的收敛条件。Gao等^[24]分析了该算法在一阶形函数与二阶形函数下的表现。Shao等^[21]对比分析了该算法与传统牛顿-拉普森算法的抗噪声能力。通过前面的研究可以发现:与传统的牛顿-拉普森算法相比,反向组合高斯-牛顿算法具有全面的优势。目前,反向组合高斯-牛顿算法受到了高度关注。

图1为反向组合高斯-牛顿算法的原理示意图,其中 $W(x,y;p)$ 是用于描述目标子区与参考子区之间的形函数, x,y 是指相对于模板中心的局部坐标, p 是指目标子区相对于参考子区的变形向量, Δp 是指每次迭代的变形增量。在反向组合高斯-牛顿算法的每次迭代中,增量的求解首先施加于参考图像上,然后将增量矩阵求逆后施加在目标模板的变形上,迭代过程中的Hessian矩阵保持不变。同时,在反向组合高斯-牛顿算法中,因变形增量引起的一阶泰勒展开作用于整像素点上。因此与牛顿-拉普森算法相比,反向组合高斯-牛顿算法具有更快的计算速度及更好的抗噪声能力。

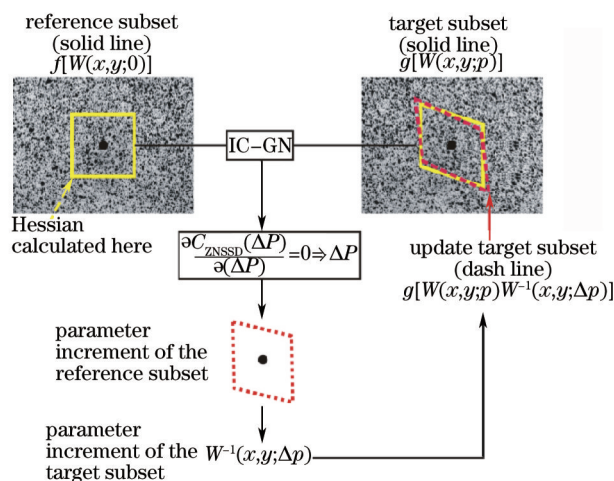


图 1 反向组合高斯-牛顿算法示意图

Fig.1 Schematic of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm

2.2 种子点扩散的并行算法

数字图像相关方法是逐块计算的处理技术,因此可以使用并行计算来提高其计算速度,这里使用的是种子点扩散的并行算法。

2.2.1 种子点初始化

种子点的初始化是该方法的第一步,可以直接通过用户设定的方式来进行选取,也可以通过算法自动选取。这里采用的是自动选取的方式:计算被测区域内每一个子区的灰度梯度平方和,灰度梯度平方和可以反映其散斑的精度^[25],将灰度梯度平方和最高的子区作为种子点。

对于多种子点并行计算,则可以在每个不连通区域内都自动选取一个种子点。当变形过程中出现部分区域计算结果很差不能保证种子点传递(如变形很大时部分区域出现了掉漆或失相关)时,则可以在特殊区域手动选取种子点。

2.2.2 单种子点并行计算

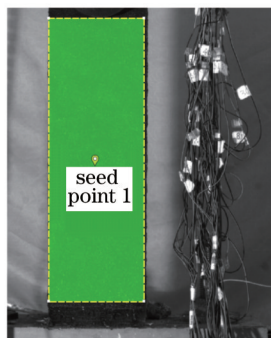


图 2 单种子点并行计算方法

Fig.2 Single-seed parallel computing method

对于如图 2 中的待计算区域,在其中定义一个种子点作为初始的计算点,通过改进初值传递方式来计算其他所有待计算点。其实现方法为:

1) 在计算区域中选取一个种子点(采取第 2.2.1 节描述的方法),通过初值搜索方法^[9,18]及反向组合高斯-牛顿算法计算其变形。判断种子点是否计算成功,检查计算成功种子点邻近的四个点,将四个点中未被计算过的点放入待计算列表中。触发多线程,开始并行计算。

2) 对于每一个线程,从待计算列表中获取一个可计算点。通过改进的初值估计及反向组合高斯-牛顿算法来计算可计算点。若该计算点计算成功,则检查该点相邻的四个点,将四个点中未被计算过的点放入待计算列表中。

3) 重复步骤2),直到待计算列表中无可计算点,且所有线程都已经停止计算。

该方法使用了改进的初值估计,因此迭代次数更少。同时,该方法还使用了计算速度更快的反向组合高斯-牛顿算法,其计算速度有望达到实时计算的要求。计算过程中,每计算一个点需要判断该计算点是否计算成功,这里使用零均值归一化互相关(ZNCC)系数来区分该点是否计算成功。ZNCC系数可表达为

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}^2, \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j), \quad (2)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j), \quad (3)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}, \quad (4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}. \quad (5)$$

ZNCC系数的取值范围为[-1,1], $C_{ZNCC}=1$ 表示完全匹配, $C_{ZNCC}=0$ 表示不相关。这里依据文献[26]将ZNCC系数的阈值设为0.8来判断计算成功点,大于0.8则计算成功。

2.2.3 多种子点并行计算

对于如图3所示的计算区域不连续,或部分区域计算结果很差不能保证种子点传递,单个种子点不能完成所有感兴趣区域的计算,需要定义多个种子点。为了实现不连续区域的计算,需要对第2.2.2节的步骤1)进行修改,即:

选取多个种子点(每个不连通区域至少选取一个种子点),通过初值搜索方法及反向组合高斯-牛顿算法计算其变形。判断种子点是否计算成功,检查计算成功种子点邻近的四个点,将四个点中未被计算过的点放入待计算列表中。触发多线程,开始并行计算。

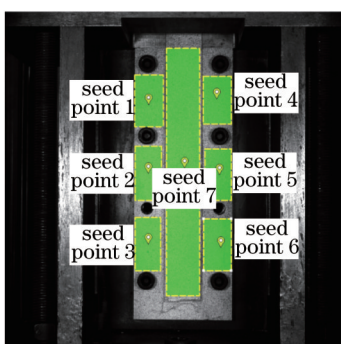


图3 多种子点并行计算方法

Fig.3 Multiple-seed parallel computing method

2.3 并行2D SG差分器应变求解

这里采用了2D SG差分器的方法进行应变求解^[27],由于每个计算点的应变求解是不相关的,因此可以直接采用并行计算的方式来提高其计算速度。关于SG差分器的构造,可以参考文献[27]。

3 CFRP片材-钢板界面粘结滑移关系测试

这里介绍实时数字图像相关方法在土木实验现场测量的应用实例,这里应用的实验为CFRP片材-钢板界面粘结滑移关系测试。粘结滑移关系决定了界面的粘结强度、应变分布、有效粘结长度等重要指标。实验中一般通过黏贴电阻应变片的方式获得加载过程中纤维增强复合材料(FRP)表面的应变,通过差分 and 积分运算获得界面的剪应力和滑移分布,进行得到界面的粘结滑移关系。实际测量中,应变片不可能布置得非常紧密,导致差分得到的剪应力结果偏差较大。采用数字图像相关方法的全场变形测量方法,可以缩小数据

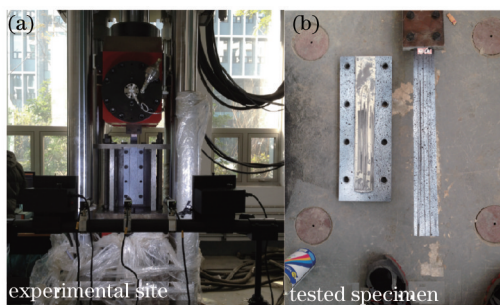


图 4 (a) 实验现场图; (b) 测试试样

Fig.4 (a) Experimental site; (b) tested specimen

计算点的间隔,有利于提高计算结果的准确度。同时,数字图像相关方法计算得到的位移通过逐点局部最小二乘的方法(可构造 2D SG 差分器)可以直接计算得到应变^[9,27],可以直接用于后续的数据分析。

3.1 实验方案

实际测量中,实时地计算出变形结果,不仅避免了后续长时间的处理工作,提升了数据分析的时效性。更重要的是,依据求得的变形场,可以调整合适的加载速率及荷载大小,有利于更全面、直接地进行力学性能的分析。

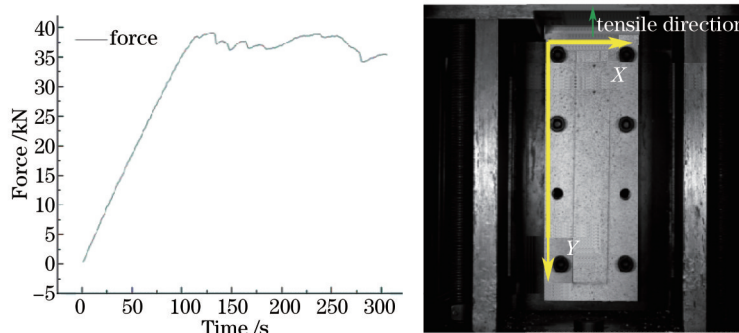


图 5 (a) 加载曲线; (b) 加载方向

Fig.5 (a) Loading curve employed in the tests; (b) tensile direction

图 4 为实验现场及试样典型的破坏模式图。采用了喷漆的方式对试样表面进行了喷涂,获取用于相关计算的均匀散斑场。图 5 为加载曲线及加载方向示意图,加载过程中 CFRP 片材会发生剥离直至破坏。相机型号为 UI-370CP-M-GL,相机分辨率为 2048 pixel×2048 pixel,实验过程中采集图像的频率为 2 frame/s。为了实验方便,采用了易携带的笔记本计算机进行实时数字图像相关计算,其配置为 Inter(R) Quad-Core (TM) i7-3720QM CPU,计算机主频为 2.6 GHz,内存大小为 8.0 GB。计算中,使用了全部四核的 8 个线程进行并行计算。

3.2 实验结果

针对图 3 中的计算区域及种子点选取,将计算步长设为 5 pixel,此时总的计算点个数为 20041 个点。应变计算窗口选取为 15×15 个计算点。表 1 为实时数字图像相关方法的计算效率,当计算模板逐渐变大时,其计算速度逐渐变慢,平均迭代次数逐渐减小。更大的计算模板意味着更多像素需要计算,但是可以为周围的点提供更高精度的初值。为了满足 2 frame/s 的计算效率,这里选取了 15 pixel 的模板来进行实时计算,此时计算速度可达每秒 44573 个点,每幅图加上应变计算的总时间也仅为 0.48 s。

表 1 实时数字图像相关方法计算效率

Table 1 Computation efficiency of the proposed real-time digital image correlation method

Subset size /pixel	Displacement calculation	Average number	Strain calculation	Total time for
	speed /(points /s)	of iterations	time /s	each image /s
11	54987.5	3.7	0.03	0.39
15	44573.8	3.2	0.03	0.48
19	33955.3	3.0	0.03	0.62
23	25892.8	2.7	0.03	0.81

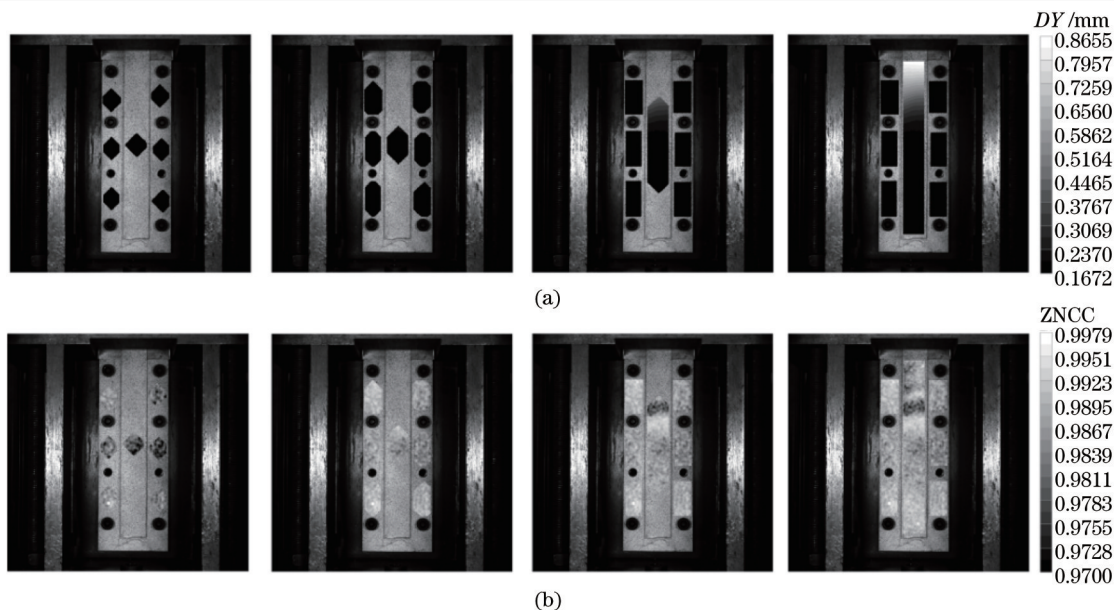


图 6 位移计算的中间过程和最终结果。(a) V 场; (b) 相关系数分布

Fig.6 Intermediate stages and final results of (a) V displacement field and (b) ZNCC coefficient distribution

图 6 为计算过程中的种子点扩散示意图,其中图 6(a)为沿 y 方向的位移场,图 6(b)为 ZNCC 系数分布图。采用多种子点并行计算方法,多个区域可以同时计算,很好地解决了不连通区域的测量问题。从图 6(b)中可知,ZNCC 系数基本都大于 0.97,证明了计算结果的正确性。

图 7(a)与图 7(b)分别给出了试件在加载过程中试件表面的位移场及应变场,可以直观地观察到界面受力变形、剥离、直至破坏的发展过程。随着载荷的逐渐增大,CFRP 表面的位移和应变逐渐增大并且由加载端逐渐向自由端方向扩展;CFRP 两侧的钢板表面位移及应变很小,几乎没有受力,加载过程中仅发生刚体位移。这里值得说明的是,加载过程中的变形场都是在实验过程中实时获取的。因此,实验过程中若发现问题,也可以及时地对实验装置或实验方法进行改进。

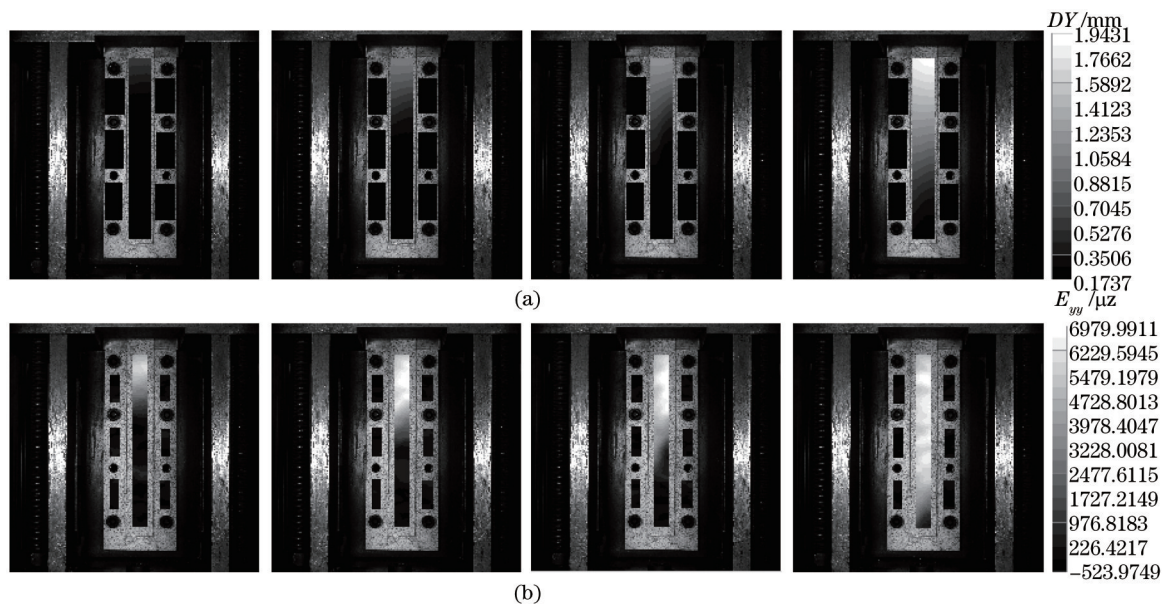


图 7 随着荷载增大试件表面变形分布(a) V 场; (b) ϵ_{yy} 场

Fig.7 Deformation distribution of (a) V field; (b) ϵ_{yy} field with the increase of load

这里取荷载为 36.33 kN 时的数据进行分析。由于 CFRP 以下的钢板位移难以测量,在界面受力过程中钢板层的变形基本可以忽略,因此,将 CFRP 与钢板位移之差作为界面的相对滑移值,如图 8(a)所示。图 8(b)

给出了一组沿试件宽度方向的测试结果,由图可以看出:CFRP片材表面的位移数据沿宽度方向基本保持恒定;CFRP片材与钢材交界处存在一个过渡段,即CFRP边缘附近的钢板表面也有一定的变形;两侧的钢板表面位移基本相同,如图8(a)所示为整个试件的刚体位移。

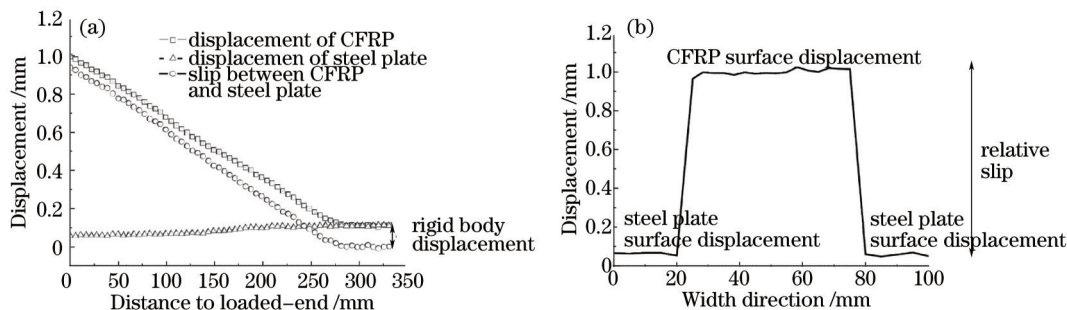


图8 试件表面位移分布。(a)沿Y方向;(b)沿X方向

Fig.8 Displacement distribution along (a) Y direction and (b) X direction

加载过程中CFRP表面的应变如图9(a)所示,通过差分运算获得界面的剪应力^[9-10],如图9(b)所示。将图8(a)的滑移分布与图9(b)的剪应力的数据联立,可得到界面的粘结滑移关系,如图10所示,随滑移增大剪应力先增大后减小。剪应力到达峰值之前,界面滑移很小,达到峰值之后,剪应力迅速降低,界面滑移量明显增大。

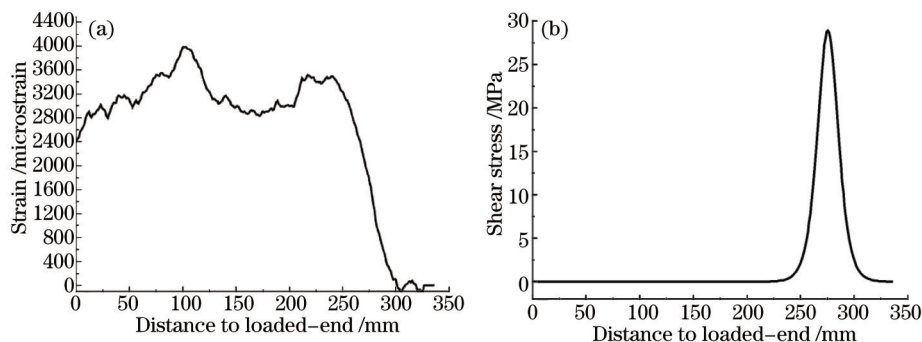


图9 (a) CFRP应变分布曲线;(b)界面剪应力分布

Fig.9 (a)Strain distribution of CFRP; (b) shear stress distribution of interface

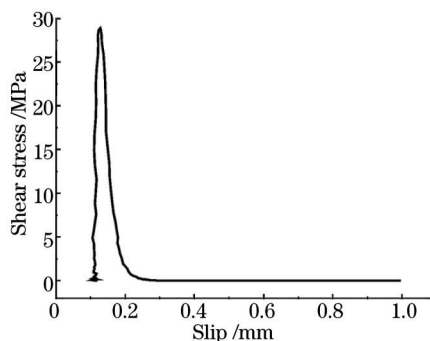


图10 界面粘结滑移关系

Fig.10 Bond-slip relationship of interface

4 结 论

本文提出的实时数字图像相关方法,有助于数字图像相关在土木行业内更进一步的推广,如结构的变形测量、土木工程领域材料的力学性能研究和健康监测等。在土木工程领域的实际测量中,实验周期很长(尤其对于循环荷载的加载方式),往往会有大量的图片需要进行相关分析与处理。如果采用先采图后处理的方式,将会大大影响数据分析的时效性,不利于后续实验工作的开展。

根据土木工程领域的实际需求,基于种子点扩散的并行计算方法及反向组合高斯-牛顿算法,实现了数

字图像相关的现场实时测量。采集图像的同时,实时计算出试件表面的变形场并显示。这样的实验手段,不仅可以提高数据分析的时效性,还可为土木实验研究提供更全面、直接的实验依据。即使不使用该方法进行实时测量,也可以大大提高后期数据处理的工作效率。

同时,在测量过程中,这里只使用了配置普通的笔记本电脑即可完成实时的测量与分析,无需昂贵的硬件成本。对于具有多核处理器的工作站,已经实现了十万个点每秒的计算速度。后续的工作中,将在GPU上实现所提出的种子点扩散的并行计算方法,更进一步地提高计算速度,争取将实时的数字图像相关测量方法用于动态测量中去。

参 考 文 献

- 1 Shen Zuyan. Introduction of Civil Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
沈祖炎. 土木工程概论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- 2 Yamaguchi I. Holography, speckle, and computers[J]. Opt&Lasers in Eng, 2003, 39(4): 411-429.
- 3 Liu Z, Fang D, Xie H, *et al.*. Study of effect of 90 domain switching on ferroelectric ceramics fracture using the moire interferometry[J]. Acta Materialia, 2007, 55(11): 3911-3922.
- 4 Dai X, Pu Q, Wang L, *et al.*. Measurement on fracture process and prediction of the load capacity of steel fiber reinforced concrete by electronic speckle pattern interferometry[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(5): 1181-1188.
- 5 Zhang Min, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308002.
张 敏, 唐 锋, 王向朝, 等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308002.
- 6 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0408004.
池 峰, 朱 煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
- 7 Pan Weiqing, Zhao Xiaobo. Measurement of steel ball surface flaw based on dual wavelength interferometry and digital phase detection [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508007.
潘卫青, 赵晓波. 钢球表面缺陷的双波长干涉数字相位检测[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508007.
- 8 Dai Meiling, Yang Fujun, Dai Xiangjun, *et al.*. An equi-phase coordinate calibration method based on two reference planes[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512006.
戴美玲, 杨福俊, 代祥俊, 等. 一种基于双参考平面的等相位坐标标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512006.
- 9 Pan B, Qian K, Xie H, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Meas Sci&Technol, 2009, 20(6): 062001.
- 10 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412004.
潘 兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- 11 Ren Maodong, Liang Jin, Tang Zhengzong, *et al.*. Microscopic three-dimensional deformation measurement system based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512002.
任茂栋, 梁 晋, 唐正宗, 等. 微尺度三维变形测量的显微数字图像相关系统[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512002.
- 12 Zhu H, Wu G, Shi J, *et al.*. Digital image correlation measurement of the bond - slip relationship between fiber-reinforced polymer sheets and concrete substrate[J]. J Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(17): 1590-1603.
- 13 Shi Jiawei, Zhu Hong, Wu Zhishen, *et al.*. Digital image correlation method for measuring the bondslip relationship of FRP sheet-concrete interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 13-22.
施嘉伟, 朱 虹, 吴智深, 等. 数字图像相关法测量 FRP 片材与混凝土界面的黏结滑移关系[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 13-22.
- 14 Pan B, Li K. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. Opt&Lasers in Eng, 2011, 49(7): 841-847.
- 15 Zhao J, Zeng P, Lei L, *et al.*. Initial guess by improved population-based intelligent algorithms for large inter-frame deformation measurement using digital image correlation[J]. Opt&Lasers in Eng, 2012, 50(3): 473-490.
- 16 Baker S, Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework[J]. International J Computer Vision, 2004, 56(3): 221-255.
- 17 Chen L, Treece G M, Lindop J E, *et al.*. A quality-guided displacement tracking algorithm for ultrasonic elasticity imaging[J]. Medical

- Image Analysis, 2009, 13(2): 286–296.
- 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 Jiang J, Hall T J. A parallelizable real-time motion tracking algorithm with applications to ultrasonic strain imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(13): 3773.
- 20 Jiang Z, Kemao Q, Miao H, *et al.*. Path-independent digital image correlation with high accuracy, speed and robustness[J]. *Opt&Lasers in Eng.* 2015, 65: 93–102.
- 21 Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss - Newton algorithm in digital image correlation[J]. *Opt&Lasers in Eng.* 2015, 71: 9–19.
- 22 Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- 23 Pan B. An evaluation of convergence criteria for digital image correlation using inverse compositional Gauss - Newton algorithm[J]. *Strain*, 2014, 50(1): 48–56.
- 24 Gao Y, Cheng T, Su Y, *et al.*. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. *Opt&Lasers in Eng.* 2015, 65: 73–80.
- 25 Pan B, Xie H, Wang Z, *et al.*. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 7037–7048.
- 26 Yu Qifeng, Shang Yang. *Image Based Precise Measurement and Motion Measurement*[J]. Beijing: Science Press, 2009.
于起峰, 尚 洋. *摄像测量学原理与应用研究*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 27 Pan B, Xie H, Guo Z, *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.

栏目编辑: 何卓铭