

文章编号: 1001-4888(2022)05-0610-11

三维数字图像相关变形测量结果的一致性研究与校验^{*}

刘思梦, 徐向阳, 马银行, 邵新星, 何小元

(东南大学 土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 采用典型四点弯实验对规范测试条件下三维数字图像相关(3D-DIC)变形测量结果的一致性进行了研究, 并采用溯源至激光波长的电子散斑干涉(ESPI)计量检测技术对其离面位移测量结果进行校验。结果表明, 在规范测试条件下, 当相机分辨率为 $2048\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$ 时, 3D-DIC 的应变测试误差在 $50\ \mu\epsilon$ 以下, 当变形大于 $1000\ \mu\epsilon$ 时, 标准离差率始终处于 0.05 以下。计量检定结果表明, 在采用规定的数字散斑图案、规范操作步骤及计算参数的情况下, 采用电动位移计对悬臂梁进行加载, 位移为 $0 \sim 10\ \mu\text{m}$ 时, 60mm 视场 3D-DIC 系统测量误差不超过 $0.25\ \mu\text{m}$ 。综合上述结果表明, 通过规范操作步骤及计算方法等因素, 能够保证数字图像相关方法在变形测试时的精度, 且结果具有良好的一致性。

关键词: 数字图像相关; 变形测量; 精度; 一致性

中图分类号: O341; TP391.41

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-302

0 引言

作为一种非接触全场测量变形方法, 数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法近 10 年来在土木^[1]、交通^[2]、生物医学^[3]等领域中得到广泛应用。DIC 方法的优势主要有光路简单、测量视场易调节、对环境要求低等^[4], 目前该方法在二维和三维测量领域中的应用已经较为成熟。

自 1982 年 Peters 等^[5]提出 DIC 方法以来, 广大学者对其在测量中的散斑质量、匹配算法和精度等方面进行了广泛而深入的研究^[6-9], 使得这一方法在一定程度上满足了科研和工业测量的需求。但是, 同一试件表面制作不同的散斑图案或选择不同的计算参数, 测量结果仍存在较大差异^[7, 10], 因此, 为了进一步拓宽该方法的应用范围, 对测量结果一致性的研究必不可少。

为扩展 DIC 方法的应用范围, 国际数字图像相关学会于 2018 年发布了数字图像相关可靠实践指南^[11], 该指南规定了 DIC 测量的基本操作流程, 一定程度上提高了测量结果的可靠性, 但是并没有明确散斑场制作方法和计算参数等内容, 其可靠性没有得到实验验证。因此, 对 DIC 测量结果进行校验, 并评估测试结果的一致性具有一定的现实意义和研究价值。

近几年的研究中, 陈振宁^[12]给出了最佳数字散斑场, 并提出了可以精确、高效、可重复的水转印制斑方法, 保证了 DIC 测量中的散斑质量的一致性。文献^[12]提出环境温度的变化会对相机内部元件的温度造成影响, 从而引起成像几何形状变化, 影响 DIC 测量的一致性。另外, 计算参数的选择对 DIC 的应变测量结果具有较大影响^[13]。袁正刚^[14]在位移以及应变测试结果一致性实验中, 通过计算得到位移

^{*} 收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(11827801, 11532005)资助

通信作者: 何小元(1956—), 男, 博士, 教授。主要研究领域为实验固体力学和工程在线检测。Email: mmhxy@seu.edu.cn

场与均值间的最大绝对误差、误差均值和标准差,发现小变形下全场位移及应变测量结果具有可重复性,且一致性较好,但该研究中统计分析的样本数量较少,且没有对影响 DIC 结果的因素进行规范,也没有通过具体的方法对 DIC 测量结果进行校验,测量结果的可靠性仍需要校验。针对 3D-DIC 系统的测量精度研究,冯秀等^[15]采用精度更高的电子散斑干涉测量系统作为验证,发现待测物体产生 $4\mu\text{m}$ 以上离面位移时,3D-DIC 系统和电子散斑干涉测量系统的精度可以达到同一量级。

本文将利用现有设备,采用规范的散斑图样、统一的系统软硬件参数和固定的计算方法,由不同的实验人员对 3D-DIC 的面内变形测量结果一致性进行实验验证。在此基础上,采用溯源于激光波长 (532nm) 的电子散斑干涉计量检测技术,对 3D-DIC 测量系统的离面位移测量结果进行校验,以此验证 DIC 测量结果的可靠性。

1 DIC 测量基本原理及参数选择

1.1 DIC 基本原理

3D-DIC 是一种基于双目视觉原理,通过匹配左右相机以及试样表面变形前后的散斑图像,追踪点的三维位置,从而进行全场变形测量的方法。如图 1 所示,物体上任意一点 M 通过左右两相机分别在像面上成像于点 m_1 、 m_2 ,将变形前点 m_1 附近的灰度特征作为参照,依据预先定义的相关函数 C 在右相机图像上寻找匹配点 m_2 ,此时点 M 既处在相机 C_1 的光心与像点 m_1 连线上,又处在相机 C_2 的光心与像点 m_2 连线上,结合相机内外参数计算得到被测物体表面变形前点 M 的坐标,由此, M 点空间位置就被唯一确定。同理,可以在变形后左右相机图像中分别寻找到与 m_1 和 m_2 相应的点 m_1' 和 m_2' ,因此, M' 的位置也可以被确定。最后依据 M 、 M' 以及位移计算公式^[15],即可求得被测物体表面点 M 的位移。依据文献^[16],可采用抗干扰性更好的归一化最小平方距离函数 C 来表征参考子区和变形后子区的相似程度:

$$C = \sum_{x=-N}^{x=N} \sum_{y=-N}^{y=N} \left\{ \frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-N}^{x=N} \sum_{y=-N}^{y=N} [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x', y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-N}^{x=N} \sum_{y=-N}^{y=N} [g(x', y') - g_m]^2}} \right\}^2 \quad (1)$$

式中: N 为图像子区半宽; $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 分别为参考图像和变形图像的子区灰度值; f_m 和 g_m 分别为参考图像和变形图像子区灰度的均值。

1.2 一致性条件分析及控制

1.2.1 环境因素

研究表明,计算结果的真实性受光强大小影响^[17],保持试件表面灰度梯度明显是获得精确测量结果的条件之一,因此在一致性验证实验中,需要控制镜头进光量,使图像明暗适中,并成像清晰。另外,在非实验室的 3D-DIC 方法应用中,相机的自热效应和环境温度的波动更会导致相机内外参数发生变化^[18-22],因此,量化并减小测量中的温度变化有助于提高 3D-DIC 测量结果的一致性。室内或短时室外环境下可认为环境温度较为稳定,使用 3D-DIC 测量前需对系统进行充分预热,以保证相机传感器等内部元件在测量时温度波动可控。

1.2.2 散斑因素

DIC 测量前,通常在试件表面制作散斑图案来增强试件表面的纹理信息^[23]。近年来,学者们通过对测量误差、散斑质量评价方法以及散斑制作等方面的深入研究,提出了可靠的散斑质量评价标

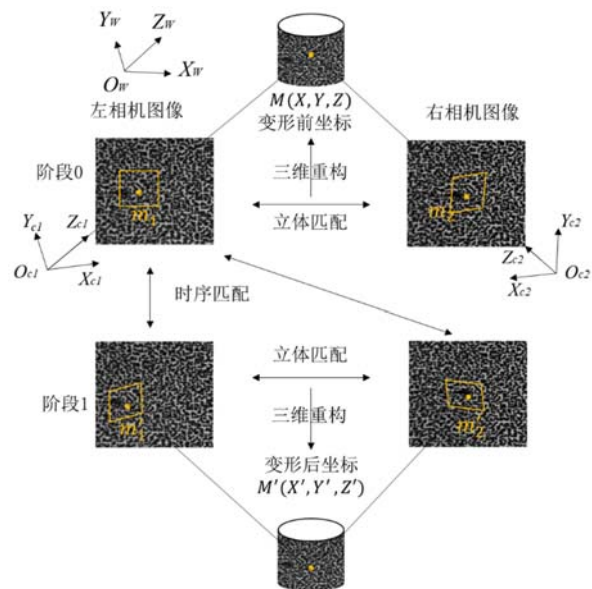


图 1 3D-DIC 流程图

Fig. 1 Flow chart of 3D-DIC

准^[23-27],并提出了水转印、激光雕刻等将散斑场“复制”到试件表面的方法。本文实验中采用水转印的方法在试件表面制作散斑,散斑效果图如图 2 所示。

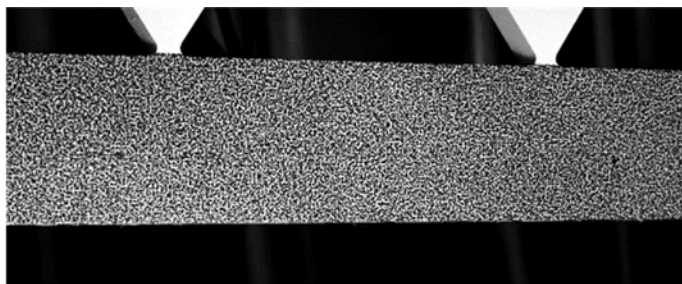


图 2 水转印散斑效果图

Fig. 2 Effect picture of water transfer printing speckle

本文采用模拟数字图像相关计算方法来评估上述水转印散斑的质量。主要步骤包括:(1)取一张试件表面散斑图,然后通过亚像素平移并添加噪声来形成一组计算图像;(2)采用最小平方距离函数作为相关准则^[28]、采用反向高斯-牛顿迭代算法进行亚像素配准^[28]和双三次 B-样条插值方法^[29],并选择与实际实验一致的子区大小进行位移计算;(3)采用均方根误差(root mean square error, RMSE)来表征位移计算误差:

$$\text{RMSE}(u') = \sqrt{\sigma(u')^2 + [E(u') - u_0]^2} \quad (2)$$

式中: u' 为 DIC 计算位移值; u_0 为真实的位移值。本文后续实验中散斑图的模拟评价 RSME 为 0.005pixel,因此散斑质量不构成影响 3D-DIC 测量结果的主要因素。

1.2.3 算法因素

在双相机 3D-DIC 系统中,只有获得 2 个相机的内外参数才能确定空间点的位置,因此,标定是 3D-DIC 系统中的关键步骤。陈振宁等^[30]发现当使用大于等于 9 组有效姿态的标定板图像对时,标定后的重投影误差符合精度要求。尹洪涛等^[31]发现当使用 15~20 组标定图像时,标定结果趋于稳定。因此,本文实验中选取 20 组有效标定图像。

除标定外,3D-DIC 方法测量结果的精度还受到计算参数选择的影响^[32-34]。

综上,本文实验中控制的一致性影响因素如下:

- (1) 实验在实验室进行,无风且温度稳定,正式实验前相机预热 2h。
- (2) 采用水转印的方式制作散斑,并使用陈振宁^[12]在论文中建议的优化数字散斑场:直径 4pixel、随机度 0.3、占空比 50%。
- (3) 标定图数量对为 20 对。
- (4) 图像的采集、数据处理使用课题组自行研发的 3D-DIC 系统^[35,36],采用最小二乘拟合位移场的方法计算应变,采用的拟合窗口为 15 个计算点,子区尺寸为 29pixel×29pixel,步长为 7pixel。
- (5) 两相机的光轴夹角约为 35°,视场约为 200mm,选定标定板角点数为 11×8,间距为 15mm。

2 一致性实验方案和结果分析

2.1 实验方案

采用 2 个分辨率为 2048pixel×2048pixel 的 IDS 相机,型号为 UI-3370CP-M-GL,配置 25mm 的 Kowa 镜头组成双目测试系统,辅以 LED 冷光源补偿环境光以增强图像质量。实验对象为标准四点弯梁,四点弯形式方便光学测量,不产生延迟现象,且仅出现面内应变场,此种形式的梁允许根据相同的参数设计生产不同的样品,因此适合用于重复性标准化实验^[37]。材料为聚碳酸酯,并在其表面水转印散斑,采用电机伺服 DEPEX 加载机进行控制加载。实验装置如图 3 所示。聚碳酸酯梁的参数见表 1。

表 1 试件基本参数表
Table 1 Basic parameter table of specimen

试件材料	纯弯段长度/mm	厚度/mm	梁高/mm
聚碳酸酯	125	20	50

在测试开始前,保持相机开机并进行 2h 以上的预热。开始后,相机和被测物保持静止,采集 50 组图像对进行噪声分析,以评估实验环境是否满足要求。在加载开始前,进行标定获得相机内、外参数。通过电机控制,对试件预加载 30N,待传感器示数稳定后,采集一组图像作为参考图。利用加载机持续加载,当荷载达到 50N 时采集图像对,荷载按每次 50N 的增幅逐级增加直到 1200N,分别采集图像后卸载至 0N。重复上述步骤多次。

实验过程中,相机、试验机、试件等整套实验设备均放置在光学隔振平台上,同时在荷载值稳定时再进行图像采集。

实验共分为两部分进行。第 1 部分实验从设备搭建到数据计算分析都由 1 人完成,共进行 20 组。第 2 部分的实验在 1.2.3 节的控制因素下进行,更换不同的操作人员进行 DIC 系统的搭建,进行 15 组,由于图像采集及计算都采用同一软件,因此计算参数的选择不作为变量。

2.2 实验结果及一致性分析

为了明确本文实验的噪声误差,计算了 50 组静态下的图像数据,所选计算区域为受弯段全部。经统计,实验本底噪声均在 $50\mu\epsilon$ 以下,表明实验环境满足要求。

图 4 展示了在 1200N 荷载下聚碳酸酯四点弯梁的横向应变分布情况,所选计算区域上下分别距离试件边缘 25 个像素,呈现出明显的纯弯段受拉区和受压区,等应变线呈水平分布,且具有良好的对称性。图 5 为某次实验的荷载-位移拟合曲线,拟合曲线近似直线,表明整个加载阶段聚碳酸酯梁一直处于弹性变形阶段。

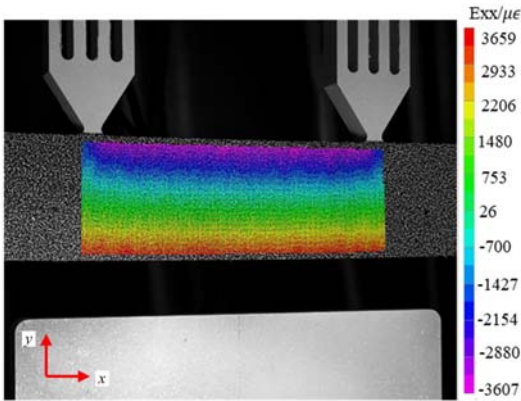


图 4 1200N 荷载下横向应变分布
Fig. 4 Transverse strain distribution under 1200N load

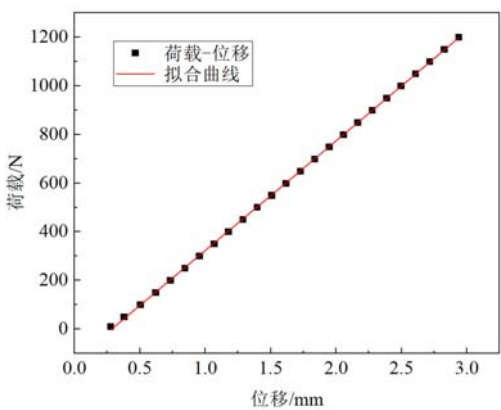


图 5 荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curve

以垂直于加载(水平)方向为 X 轴,平行于加载(竖直)方向为 Y 轴。令 20 次实验中各阶段 X 方向上的最大应变为 $EX_{ij}(j=1,2,3)$, j 表示 600N、900N、1200N 三级荷载。最大应变的平均值为 $\overline{EX_j}(j=1,2,3)$,将每次实验中各加载阶段的误差公式定为

$$\text{Error_EX}_{ij} = EX_{ij} - \overline{EX_j} \quad (i = 1,2,3,\dots,20; j = 1,2,3) \quad (3)$$

式中: i 为实验次数; j 为实验加载阶段; Error_EX_{ij} 为第 i 次实验中 j 加载阶段下的 X 方向最大应变与 j 加载阶段下 20 次实验 X 方向最大应变均值之间的误差。3 个加载阶段下 20 次实验 X 方向应变的绝对误差如图 6 所示。

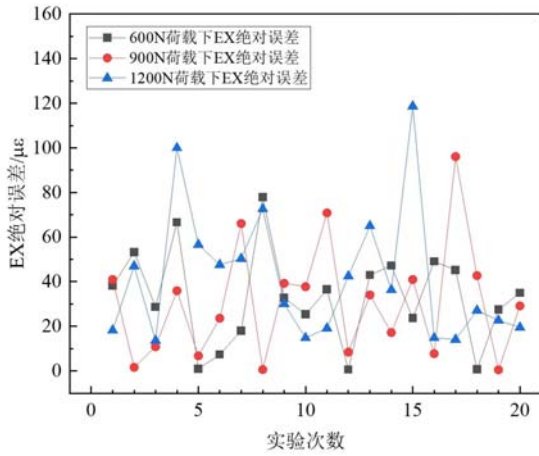


图 6 各加载阶段下的 EX 绝对误差

Fig. 6 Absolute error of EX at each loading stage

由图 6 可见, 3 个荷载下 X 方向最大应变的绝对误差均在 $35\mu\epsilon$ 左右波动, 其中 1200N 荷载下第 15 次实验误差最大, 为 $118\mu\epsilon$, 但此时试件最大应变为 $3304\mu\epsilon$, 误差为最大应变的 3.57%, 因此可以说明, 在被测物发生小变形时, 20 次实验的应变测量结果一致性良好, 实验具备重复操作性。

图 7(a) 为 35 次实验下各组最大最小应变的标准差, 由图可见, 标准差基本都在 $50\mu\epsilon$ 以下。采用标准离差率 C_v 来比较变量之间的离散程度, 其计算公式如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

该量为无量纲量, σ 和 μ 分别表示 1 组数据的

标准差和均值。一般认为标准离差率小于 0.05 时, 数据稳定, 一致性良好。图 7(b) 为 35 次实验下最大最小应变标准离差率分布曲线, 由图可知, 本文实验的标准离差率随着荷载等级升高而降低, 但是部分数据依旧在 0.07 以上, 考虑到实验的标准差稳定在 $50\mu\epsilon$ 以下, 在荷载达到 300N 以上时 (此时应变大于 $1000\mu\epsilon$), 标准离差率在 0.05 以下, 实验结果具有一致性。因此, 在采用本文中所给的系统参数和实验条件的情况下, 更换不同的实验人员也没有对结果的稳定性产生影响, 即当应变大于 $1000\mu\epsilon$ 时, 可以认为 3D-DIC 方法具有较好的一致性。

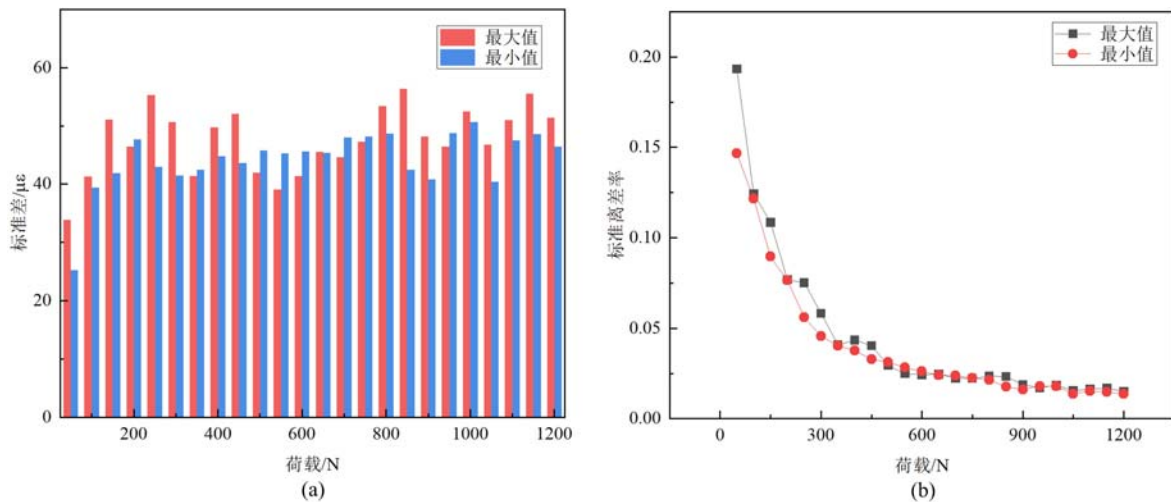


图 7 各个荷载下 35 次实验最大最小应变的 (a) 标准差和 (b) 标准离差率

Fig. 7 (a) standard deviation and (b) standard deviation rate of maximum and minimum strains of 35 groups of experiments under various loads

本文实验中采用测得的应变值来计算聚碳酸酯四点弯梁的弹性模量。四点弯梁的弹性模量计算公式如下:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{\epsilon} = \frac{3Fa}{bh^2\epsilon} \quad (5)$$

式中: M 为四点弯梁表面弯矩; I 为四点弯梁截面惯性矩; h 为四点弯梁高度; b 为四点弯梁厚度; a 为加载点距四点弯梁边缘的距离。

图8是20次实验下600N、900N、1200N荷载时受拉区弹性模量 E 及总体平均值的数值分布图,经计算,三级荷载下弹性模量的平均值约为2.71MPa,标准差为0.04左右,可见结果稳定。

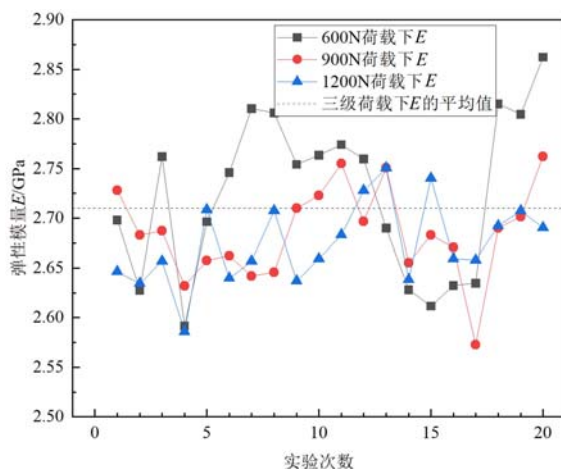


图8 三级荷载下试件弹性模量分布

Fig. 8 Elastic modulus distribution of specimen under three levels' load

3 DIC 测量结果的校验

电子散斑干涉技术(electronic speckle pattern interference, ESPI)是以激光散斑作为变形的信息载体,测量粗糙物体表面变形的一种干涉计量术。实验装置示意如图9所示,激光经扩束镜和分束镜平均分成两部分,分别照射在参考板和待测物体表面,经过漫反射的物光和参考光在CCD相机靶面干涉形成散斑图像,当物体变形时,散斑场会随之发生变化,通过压电陶瓷(PZT)相移技术^[38],可以获取散斑场在物体变形前后的相位分布,进一步对相位分析可以表征出被测物体表面的位移场变化或形变信息。ESPI测量结果可以溯源于激光波长,精度可达纳米级,因此可以采用3D-DIC系统和ESPI系统同时对同一被测物进行测量,从而校验3D-DIC系统的测量结果。

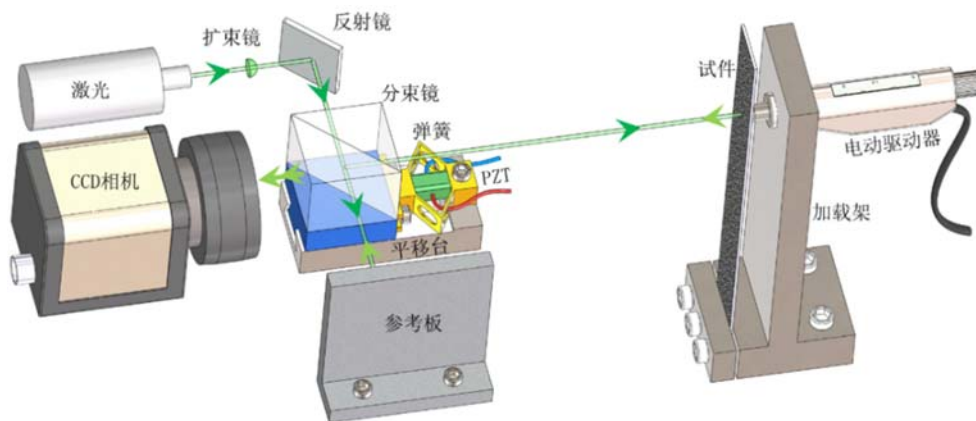


图9 实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental device

3.1 实验方案

实验中采用的3D-DIC系统相机视场为60mm;采用5472pixel×3648pixel黑白海康威视相机,型号为MV-CE200-11UM,信噪比为41.5dB,像元尺寸为2.4μm×2.4μm,配置50mm Kowa镜头、精度为1μm的标定板。标定重投影误差小于0.05pixel。实验时辅以蓝色LED光源,配相应波长的带通滤波器以消除外界光照和波长为532nm的绿色激光的影响。为减少光源发热对相机造成的影响,只在DIC系统采图时打开光源。电子散斑干涉(ESPI)系统采用532nm的绿色激光器作为干涉光源,并采用压电陶瓷进行相移,实验光路可确保相机镜头和激光同光轴并且垂直于试件表面,待测点(加载点背面)

位于 ESPI 光路的光轴上。

实验对象为底部固结在刚性底座上、宽 20mm 的悬臂梁,用 CONEX-LTA-HS 型号的电动位移发生器加载,其最小位移增量为 $0.1\mu\text{m}$,单向重复精度典型值为 $0.1\mu\text{m}$,加载点距固定端 100mm;在加载点处做上标记,以便 ESPI 系统及 3D-DIC 系统选取数据。试件底座与 3D-DIC 以及 ESPI 系统统一固定在光学隔振平台上,以减小环境振动的影响。每次实验加载 10 步,每步加载 $1\mu\text{m}$ 。实验前通过 3D-DIC 系统采集静态噪声,总位移标准差为 $0.036\mu\text{m}$ 。实验系统如图 10 所示。

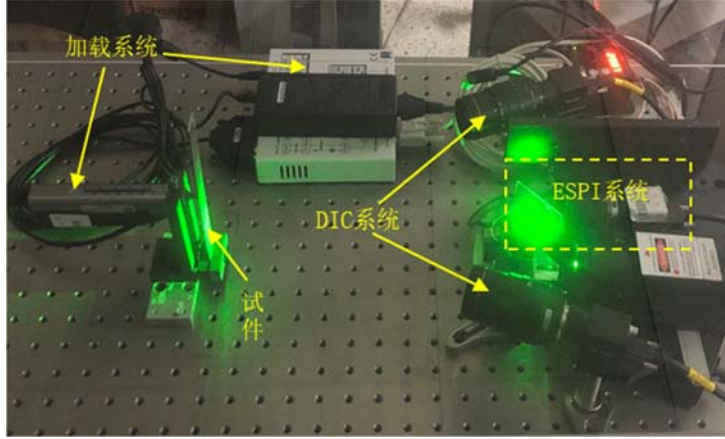


图 10 实验系统图

Fig. 10 Experimental system diagram

3.2 实验结果及分析

DIC 系统标定结果显示相机夹角为 42.7° ,标定重投影误差为 0.045pixel 。图 11 为加载到 $3\mu\text{m}$ 时, DIC 系统与 ESPI 系统测量结果示意图。由图可以看出, DIC 测量结果中位移分布云图与 ESPI 条纹分布大致符合。

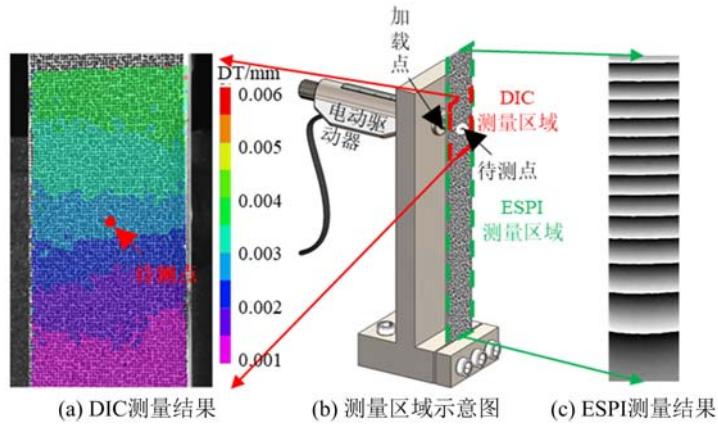


图 11 测量结果

Fig. 11 Measurement results

ESPI 系统得到的变形相位通过正余弦滤波处理^[38],滤波窗口为 $5\text{pixel} \times 5\text{pixel}$,均值滤波 10 次,并逐行解包裹得到真实相位 φ ,测试点的离面变形由 $\varphi\lambda/4\pi$ 计算得到,其中 λ 为激光波长。

实验共进行 10 组,单次结果见图 12。由于 ESPI 测量精度远高于 DIC 测量精度,因此以 ESPI 测量值为标准值,每组实验相对误差值 e_r 计算公式如下:

$$e_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{w_{\text{DIC}} - w_{\text{ESPI}}}{w_{\text{ESPI}}} \quad (6)$$

式中: n 为每组实验中加载总阶段数; w_{DIC} 为 DIC 测量位移值; w_{ESPI} 为 ESPI 系统测量位移值。

绝对误差计算公式如下:

$$e_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_{DIC} - \omega_{ESPI}) \tag{7}$$

相对误差及绝对误差的分布见图 13, 相对误差均值为 3.2%, 绝对误差均值为 0.11 μm 。

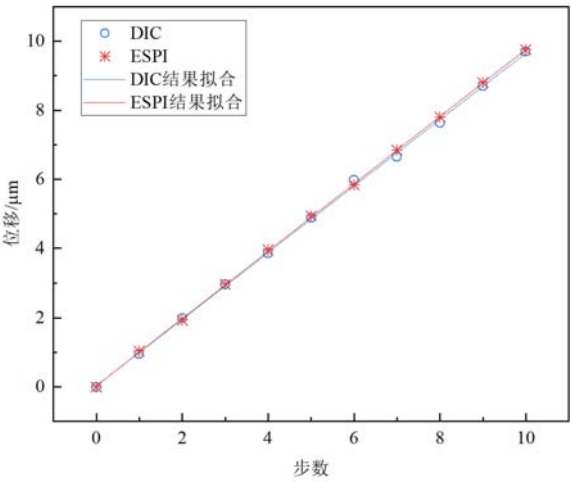


图 12 单次实验结果图
Fig. 12 Figures of single experiment results

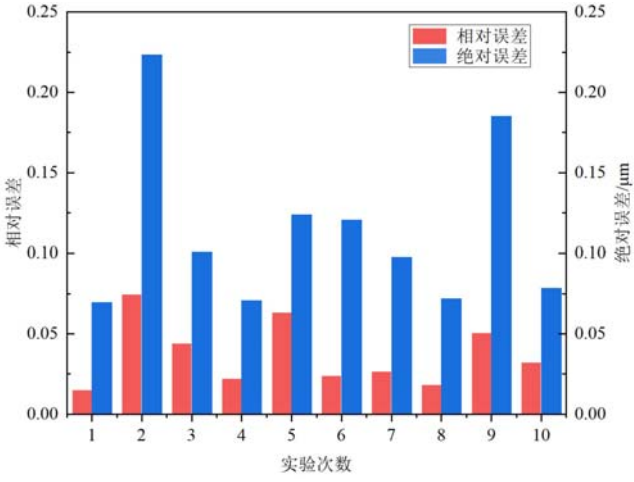


图 13 相对误差及绝对误差分布
Fig. 13 Distribution of relative error and absolute error

对 DIC 和 ESPI 数据进行拟合, 以直线斜率表示每一步的加载量, 如图 14 所示。表 2 给出了 10 次实验的均值和标准差。运用标准离差率公式(式(4)), 对 DIC 的 10 次结果进行计算, 标准离差率分别为 0.012, 小于 0.05, 可以认为测量结果具有一致性。

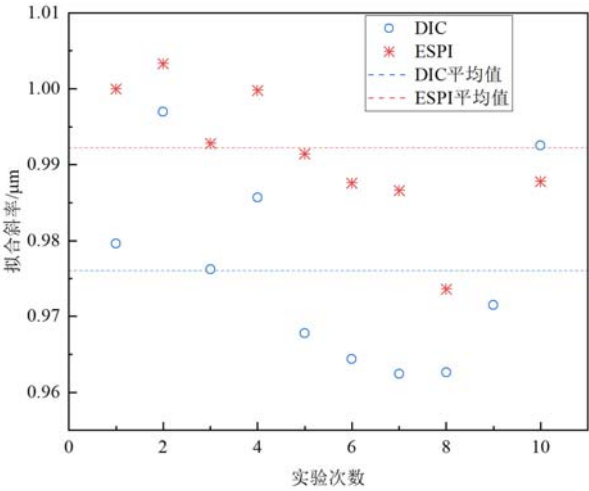


图 14 斜率拟合
Fig. 14 Fitting of slope

表 2 ESPI 和 DIC 拟合斜率统计结果		
Tab. 2 fitting slope statistical results of ESPI and DIC		
	ESPI	DIC
均值/ μm	0.9922	0.9760
标准差	0.0089	0.0125

虽然存在一定的误差, 但是 DIC 测量结果和 ESPI 结果基本一致, 相对误差为 1.6%, 因此可以认为 DIC 的测量结果在误差范围内是正确的。

4 结 论

本文为验证 DIC 测量结果的一致性,通过固定实验设备、散斑参数、操作方式、计算参数等因素,更换不同的实验人员进行实验,通过电机伺服 DEPEX 加载机对聚碳酸酯材料梁进行四点弯逐级加载,分别重复实验 20 次、15 次,验证了 DIC 测量结果的可靠性和一致性。将溯源于激光波长的干涉计量检测技术和 3D-DIC 测量系统对同一试件的测量结果进行对比,得到主要结论如下:

(1) 采用 $2048\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$ 的相机,3D-DIC 各级荷载下的应变测量精度基本都在 $50\mu\epsilon$ 以下,当应变在 $1000\mu\epsilon$ 以上时,可以确保标准离差率始终在 0.05 以下,说明在标准的实验操作下,DIC 方法应变测量结果具有一致性;

(2) DIC 测量结果和 ESPI 结果基本一致,在 60mm 的视场下,采用 2000 万像素海康威视工业相机,电动位移计控制位移为 $0 \sim 10\mu\text{m}$,多次实验后对结果求均值,相对误差在 5% 以内,绝对误差在 $0.25\mu\text{m}$ 以内,因此可以认为 DIC 的测量结果在误差范围内是正确的。

参考文献:

- [1] 邵新星,戴云彤,何小元,等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. 光学学报, 2015, 35(10):133—141 (SHAO Xinxing, DAI Yuntong, HE Xiaoyuan, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10):133—141 (in Chinese))
- [2] Gao L, Ni F J, Ling C, et al. Evaluation of fatigue behavior in cold recycled mixture using digital image correlation method[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102:393—402.
- [3] Sun C R, Standish B, Vuong B, et al. Digital image correlation-based optical coherence elastography[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(12):121515.
- [4] 邵新星,何小元,张瑾琳. 多尺度二维数字图像相关测量系统及其应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):242—246 (SHAO Xinxing, HE Xiaoyuan, ZHANG Jinlin. Multi-scale two-dimensional digital image correlation system and its application[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(2):242—246 (in Chinese))
- [5] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress-analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427—431.
- [6] Schreier H W, Braasch J R, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation[J]. Optical Engineering, 2000, 39(11):2915—2921.
- [7] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. Strain, 2005, 41(4):167—175.
- [8] 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):1—17.
- [9] Lava P, Cooreman S, Coppieters S, et al. Assessment of measuring errors in DIC using deformation fields generated by plastic FEA[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7-8):747—753.
- [10] 王圆圆. 数字图像分辨率提高及数字相关方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018 (WANG Yuanyuan. Research of the improvement in digital resolution and the method of the digital correlation[D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese))
- [11] Jones E M C, Iadicola M A. A good practices guide for digital image correlation[J]. International Digital Image Correlation Society, 2018, 10:1—70.
- [12] 陈振宁. 数字散斑场优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018 (CHEN Zhenning. Optimizations and applications of digital speckle patterns[D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese))
- [13] Xu X, Su Y, Cai Y, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(8):1575—1590.
- [14] 袁正刚. 数字图像相关技术在工程材料破坏实验中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2019 (YUAN Zhenggang. Application research on engineering material destruction experiment using digital image correlation technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese))

- [15] 冯秀, 陈旭, 徐楠, 等. 双目视觉 DIC 测量系统的离面位移测量精度[J]. 应用光学, 2013, 34(3):457—462 (FENG Xiu, CHEN Xu, XU Nan, et al. Measurement accuracy of out-of-plane displacement for binocular vision DIC system[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3):457—462 (in Chinese))
- [16] Garcia D, Orteu J J, Penazzi L. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125:736—742.
- [17] 周晓峰. 基于散斑数字图像相关的平面全场应变测量方法及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2012 (ZHOU Xiaofeng. Method and application of in-plane strain measurement based on speckle digital image correlation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese))
- [18] Handel H. Analyzing the influences of camera warm-up effects on image acquisition[C]. Computer Vision-ACCV 2007, 8th Asian Conference on Computer Vision, 2007:258—268.
- [19] Novak M D, Zok F W. High-temperature materials testing with full-field strain measurement: experimental design and practice[J]. The Review of Scientific Instruments, 2011, 82(11):303
- [20] Ma Qinwei, Ma Shaopeng. Experimental investigation of the systematic error on photomechanic methods induced by camera self-heating[J]. Optics Express, 2013, 21(6):7686—7698.
- [21] Schreier H W, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(3):303—310.
- [22] 李倩. 热气流对数字图像相关测量的影响及其修正研究[D]. 南京: 东南大学, 2019 (LI Qian. Study on influence of hot air flow on digital image correlation and its correction[D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese))
- [23] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. 实验力学, 2017, 32(5):699—717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):699—717 (in Chinese))
- [24] Wang Y Q, Sutton M A, Bruck H A, et al. Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements[J]. Strain, 2009, 45(2):160—178.
- [25] Pan B, Lu Z X, Xie H M. Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4):469—477.
- [26] Hua T, Xie H M, Wang S M, et al. Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1):9—13.
- [27] Chen Z N, Quan C G, Zhu F P, et al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9):1—10.
- [28] Su Y, Zhang Q C, Gao Z R, et al. Fourier-based interpolation bias prediction in digital image correlation[J]. Optics Express, 2015, 23(15):19242—19260.
- [29] Su Y, Zhang Q C, Xu X H, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86:132—142.
- [30] 陈振宁, 刘聪, 何小元. 数字图像相关方法中的标定对三维形貌和变形测量的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5):1050—1054 (CHEN Zhenning, LIU Cong, HE Xiaoyuan. Effect of calibration on 3D shape and deformation measurement in digital image correlation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5):1050—1054 (in Chinese))
- [31] 尹洪涛, 刘成, 李一兵, 等. 相机标定误差因素分析[J]. 信息通信, 2012(1):28—30 (YIN Hongtao, LIU Cheng, LI Yibing, et al. Analysis of factors on the error of the camera calibration [J]. Information & Communications, 2012(1):28—30 (in Chinese))
- [32] Sun Yaofeng, 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.
- [33] Pan B, Xie H M, Wang Z Y, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. Optics Express, 2008, 16(10):7037—7048.
- [34] Li B J, Wang Q B, Duan D P, et al. Modified digital image correlation for balancing the influence of subset size

- choice[J]. Optical Engineering, 2017, 56(5):054104.
- [35] Shao X X, Dai X J, Chen Z N, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring[J]. Applied Optics, 2016, 55(4):696—704.
- [36] Shao X X, He X Y. Real-time 3D digital image correlation for large deformation and rotation measurements based on a deformation transfer scheme[J]. Experimental Mechanics, 2021, 61(6):951—967.
- [37] Whelan M, Hack E, Siebert T, et al. On the calibration of optical full-field strain measurement systems[C]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Experimental Mechanics, Univ Southampton, Southampton, ENGLAND, 2005.
- [38] Creath K V. Phase-measurement interferometry techniques[J]. Progress in Optics, 1988, 26:349—393.

Consistency research and verification of results of 3D digital image correlation deformation measurement

LIU Simeng, XU Xiangyang, MA Yinhang, SHAO Xinxing, HE Xiaoyuan

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The consistency of three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) deformation measurement under standard testing conditions was studied by using typical four-point bending experiments, and the out-of-plane displacement measurements were verified by using electronic speckle interference (ESPI) measurement technology tracing to laser wavelength. The results show that under standard test conditions, when the camera resolution is $2048\text{pixel} \times 2048\text{pixel}$, the strain test error of 3D-DIC is below $50\mu\epsilon$, and when the deformation is greater than $1000\mu\epsilon$, the standard deviation is always below 0.05. The metrological verification results show that under the condition of the specified digital speckle pattern, standard operation steps and calculation parameters, the cantilever beam is loaded by an electric displacement meter, and the measurement error of the 3D-DIC system does not exceed $0.25\mu\text{m}$ when the displacement range of the cantilever beam is $0 \sim 10\mu\text{m}$ and the field of view is 60mm. The above results show that the accuracy of digital image correlation method in deformation test can be guaranteed by standardizing the operation steps and calculation methods, and the results have good consistency.

Keywords: digital image correlation; deformation measurement; precision; consistency