

引用格式: CHEN Liangyou, YAN Hao. In-plane Displacement Measurement Based on Digital Holography and Digital Image Correlation[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0409002

陈梁友, 闫浩. 基于数字全息和数字图像相关方法的面内位移测量[J]. 光子学报, 2022, 51(4):0409002

# 基于数字全息和数字图像相关方法的面内位移测量

陈梁友, 闫浩

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 仪器科学与工程系, 上海 200240)

**摘 要:**针对一套数字全息装置只能测量离面位移这一个维度位移的局限性问题,将数字全息与数字图像相关方法相结合,利用数字全息重建的强度图像,实现了面内另外两个维度位移的测量,拓宽了一套数字全息装置的测量能力。该方法对待测物体位移前后的全息图数值重建得到两幅强度图,然后对变形前后的强度图应用数字图像相关方法得到面内两个维度位移的测量结果。该方法中采用的数字全息的强度图本质上是激光散斑图,而不是传统数字图像相关使用的白光下或自然光下的表面喷涂散斑或者物体自然纹理,因此是对数字图像相关方法应用于激光散斑图像的有益探索。最后通过二维位移装置对平面施加面内方向位移的实验验证了数字图像相关方法对于数字全息重建的激光散斑图在面内位移测量的有效性。最后,讨论了基于数字全息对曲面物体利用数字图像相关进行面内位移测量的可行性。传统的二维数字图像相关方法由于有限焦深导致散斑退相关现象,因而无法对曲面物体进行面内位移测量。但是,借助数字全息技术在一幅全息图中能将物体聚焦到不同深度的能力,可以将曲面物体分割为不同深度部分开展二维数字图像相关测量。本文从理论上讨论了该方法的可行性,并在实验上遍历了不同深度的 DH 重建对曲面物体面内位移的测量准确性的影响,为数字图像相关方法借助数字全息技术的辅助对曲面物体面内位移的测量进行了有益探索。

**关键词:**数字全息;数字图像相关;面内位移测量;曲面物体;激光散斑

中图分类号:TB877

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225104.0409002

## 0 引言

全息是一种重要的非接触式光学技术,广泛用于轮廓和离面变形测量,具有全场测量,高灵敏度和非接触式测量的优点。通过使用 CCD 等光电记录设备进行全息图记录和使用计算机进行数字重建,数字全息术(Digital Holography, DH)<sup>[1]</sup>的发明规避了感光板的湿化学处理以及与传统全息测量相关的复杂相位确定问题。此外,它还能直接获得待测对象变形前后的定量振幅和相位图像<sup>[2-3]</sup>,在此基础上可以很容易地推断出变形前后两种状态之间的定量相位差和相关的离面变形。由于上述优点,DH 已被用作一种实用而有效的全场离面位移测量技术,其精度高达纳米级<sup>[4]</sup>。因此,DH 被广泛用于测量平面物体或低曲率物体的离面变形。

尽管 DH 在离面位移测量方面有优势,但单一的 DH 装置通常情况下被认为不适合 1 个维度以上位移的测量<sup>[2]</sup>,对除了离面位移维度之外的位移测量应用较少。这是因为基于干涉原理的 DH 方法只对其敏感矢量方向(一般为光轴方向)的一个维度的变形具有较高的灵敏度,而对垂直于敏感矢量的另外两个方向的变形(面内变形)不敏感。为了进行面内两个维度的位移测量,传统方法是使用多套 DH 装置分别负责面内两个方向的位移测量<sup>[5]</sup>,测量系统复杂,且信息利用率低。SCHWEDE R 等<sup>[6]</sup>将立体摄影测量技术与 DH 相结

基金项目:国家重点研究发展计划(No. 2016YFF0200700)

第一作者:陈梁友(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为数字全息与数字图像相关技术。Email:517968285@qq.com

导师(通讯作者):闫浩(1982—),女,副教授,博士,主要研究方向为数字全息技术。Email:yan\_hao@sjtu.edu.cn

收稿日期:2021-11-15;录用日期:2021-12-14

<http://www.photon.ac.cn>

合,采用了四个CCD相机,记录8幅全息图,最终实现了面内两个维度变形的测量。这个方法依然由于采用多个CCD而导致了系统的复杂。KULKARNI等<sup>[7]</sup>提出了一种可以从一个DH的干涉场中同时测量多维位移的技术。但是这套装置需要三束照明光,并且还需要将干涉场分成多个矩形部分,每个矩形部分中,干涉场被表达成多元素低阶二维相位多项式信号,硬件和软件都是十分的复杂。上述提到的方法都是需要采用多套照明光束或者CCD相机,增加了硬件成本,且数据量大,处理起来耗时。

在实验力学领域,二维数字图像相关方法(2D-Digital Image Correlation, 2D-DIC)<sup>[8]</sup>是被公认可以定量测量平面物体面内位移的工具,具有全场、非接触,高精度测量的特点。通过对变形前后记录的具有随机强度分布的两幅数字图像进行数值比较,2D-DIC可以直接提供亚像素精度的全场面内位移。通过将2D-DIC与高空间分辨率的显微镜相结合,可以实现微尺度甚至纳米尺度的面内变形。然而,2D-DIC仅限于平面内的位移和应变测量,对于曲面物体的面内位移测量存在局限性。在现有的数字图像相关测量物体面内位移的方法中,大多都是自然光或白光下的散斑,并且散斑的形成大多是通过对待测物体表面喷涂散斑的方法制造人为散斑特征或直接利用物体的表面纹理特征。潘兵等<sup>[9]</sup>通过随机喷涂黑白漆的方法制造人工散斑场,并通过溅撒或点涂的方法制作可耐受高温的人工散斑进行热变形的测量<sup>[10]</sup>,而荆甫雷等<sup>[11]</sup>提到喷涂散斑漆会改变目标本身的表面状态,间接影响高温变形测量时的发射率和辐射测温结果。这些对待测物体进行喷涂散斑的方法都会对待测物体本身造成一定的破坏,具有局限性。而激光散斑DIC使用较少,其有效性是目前DIC领域的一个值得讨论和探索的方向。

本课题组于2014年提出了将DH和DIC技术相结合的方法,仅基于一套简单的DH系统,完成了面内位移两个维度的测量<sup>[2]</sup>。但是之前的工作只验证了对于镜面物体以及平面物体面内位移测量的有效性,对于粗糙表面物体以及曲面物体测量的可能性并没有进行研究。粗糙表面物体的DH强度图与镜面物体的DH强度图存在不同,后者是样本自身的特征,而前者是激光散斑图。因此,后者的DIC与前者有着本质不同,之前文献<sup>[2]</sup>的方法无法应用于后者。

本文提出了一种将DH和DIC相结合的方法。采用一套简单的DH装置,对DH重建的粗糙物体的激光散斑强度图应用DIC方法,从而实现了粗糙表面平面物体的面内位移测量。在所提出的方法中,DH获得的强度信息不再是被抛弃,而是被充分利用起来进行面内位移的计算,仅采用一套简单的DH装置和单照明光束就实现了两个维度位移的测量,简化了测量装置,提高了测量效率,拓宽了单个DH装置的测量能力,具有非接触,高精度,高效测量的特点。针对所提出的方法,对粗糙表面的平面物体进行了实验,实验结果证明了本文方法的可行性与高精度性。同时,针对2D-DIC不适用于曲面物体面内位移测量的问题,利用DH可以在一幅全息图中选取不同重建距离,以在不同深度对曲面物体不同部分进行聚焦的特点,讨论了DH对粗糙表面的曲面物体进行面内位移测量的可能性,并借助实验进行了初步的验证。

## 1 基于数字图像相关方法辅助的数字全息面内位移测量方法

### 1.1 方法流程介绍

如图1所示,本文提出的技术整体流程包括三个步骤:1)搭建DH光路记录待测物体位移前后的全息图;2)调整重建距离对全息图进行数值重建,获得强度图;3)用DIC方法对位移前后的强度图进行处理得到物体的面内位移 $u$ 和 $v$ 。采用图1(a)所示的DH装置进行面内位移的测量,装置工作原理为:点光源激光器入射到分光镜BS1后会被反射,照射待测物体后被物体反射形成物光波,物光经过分光镜BS1,光阑,透镜,分光器BS2后最终被相机的成像平面记录,激光器的另一束光则作为参考光经过分光镜BS2反射后到达CCD成像平面跟物光波进行干涉产生全息图;其中光阑的作用在于调节投射在CCD上的物光的强弱,以最大限度地提高信息容量,同时避免频谱混叠;通过记录物体发生面内位移前后的全息图一共两张分别如图1(b)和(c);然后将全息图调整重建距离并经过数值重建后可以从中提取出物体位移前后的激光散斑强度图,如图1(d)和(e);最后利用DIC算法对这两幅散斑强度图进行处理可以得到物体的面内位移 $u$ , $v$ 分别如图1(f)和(g)所示。

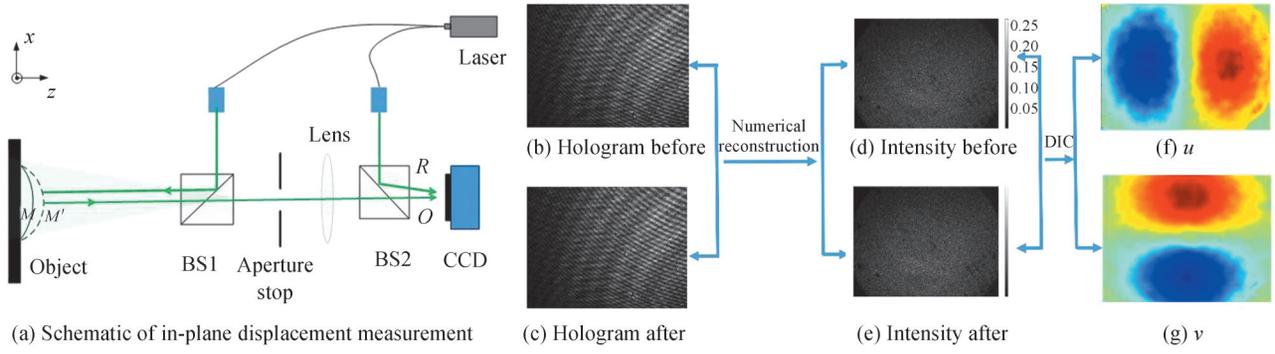


图1 总体流程介绍  
Fig. 1 General process

## 1.2 数字全息原理介绍

DH技术包括三个过程:记录过程、CCD采样和数字重建过程。在记录过程中,激光束分为两部分:参考波 $R$ 和物体波 $O$ 。参考波直接照射到CCD上,物光波被物体反射(对于不透明的标本)或透过物体(透明的标本)并携带物体信息。参考波和物体波相互干涉,在CCD平面上产生全息图 $I(x, y)$ 。这个过程是一个光学过程,可以表示为

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y) \quad (1)$$

式中, $*$ 为共轭符号, $R = |r|\exp\{i\varphi_r\}$ , $O = |o|\exp\{i\varphi_o\}$ ,其中 $R$ 是参考光, $O$ 是物光波, $r$ 和 $o$ 分别表示物光和参考光在该点的振幅, $\varphi_r$ 是参考光的相位, $\varphi_o$ 是物光波的相位, $x$ 和 $y$ 是CCD平面的坐标系。

在DH技术中,光学全息图被CCD采样和数字化,并作为数字全息图传输给计算机进行数值重建。数字重建代替了光学传播过程,通过计算机计算,可以根据角谱法得到定量的物体波场<sup>[12-13]</sup>。

$$\gamma(m, n) = \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT} \left\{ I_H(k, l) \cdot R(k, l) \cdot \exp \left[ \frac{j2\pi d}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda m \Delta f_x)^2 - (\lambda n \Delta f_y)^2} \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

式中, $k, l, m, n$ 是常数, $\lambda, d, I_H, R$ 分别是激光波长,重建距离,数字全息图和参考波。 $\Delta f_x = \frac{1}{L_x}$ 和 $\Delta f_y = \frac{1}{L_y}$ 分别是在 $x$ 和 $y$ 轴方向的空间载波频率, $L_x$ 和 $L_y$ 分别是全息图在 $x$ 和 $y$ 轴的空间尺寸。FFT表示和 $\text{FFT}^{-1}$ 分别表示傅里叶变换和逆傅里叶变换。

从 $\gamma(m, n)$ 中可以提取出强度和相位为

$$I(m, n) = |\gamma(m, n)|^2 = \text{Re}^2[\gamma(m, n)] + \text{Im}^2[\gamma(m, n)] \quad (3)$$

$$\phi(m, n) = \arctan \frac{\text{Im}[\gamma(m, n)]}{\text{Re}[\gamma(m, n)]} \quad (4)$$

其中式(3)得到的强度信息将在1.3节中使用。

## 1.3 数字图像相关方法测量面内位移的原理

本文的数字全息系统采用相干光源激光照明。当相干光源照射粗糙表面物体时,在其散射表面或者附近的光场可以观察到激光散斑。如果此时CCD位于散射光场内,就可以获得散斑图像。为了形成激光散斑图,需要合适的激光功率且被测样品本身具有一定的表面粗糙度<sup>[14]</sup>。如果激光功率过大,样品表面过度曝光导致散斑的黑点尺寸减小,从而影响DIC算法处理时子集位移的不准确跟踪和计算。而物体表面的粗糙度虽然对散斑颗粒的大小没有影响<sup>[15]</sup>,但是如果对于表面粗糙度小于32 nm的镜面物体是无法形成激光散斑的<sup>[16]</sup>。

变形前后获得的待测物体的重建的激光散斑强度图像可以用2D-DIC处理,以确定平面内的位移。基于标准子集的DIC的基本原理如图2所示。首先,在参考图像中指定一个感兴趣的区域(ROI),在这个区域中的像素点被定义为感兴趣的点。然后,为了准确地确定ROI中每个测量点的位置,在目标图像中任意划定一个以坐标点 $P(x, y)$ 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素的正方形参考子集,以找到其最相似的对应点。一旦找到具有最大相似性的目标子集的位置和形状,就可以确定参考子集中心的位移和位移梯度。在其他

ROI区域的点上重复同样的跟踪流程,以获得ROI区域的全场变形。

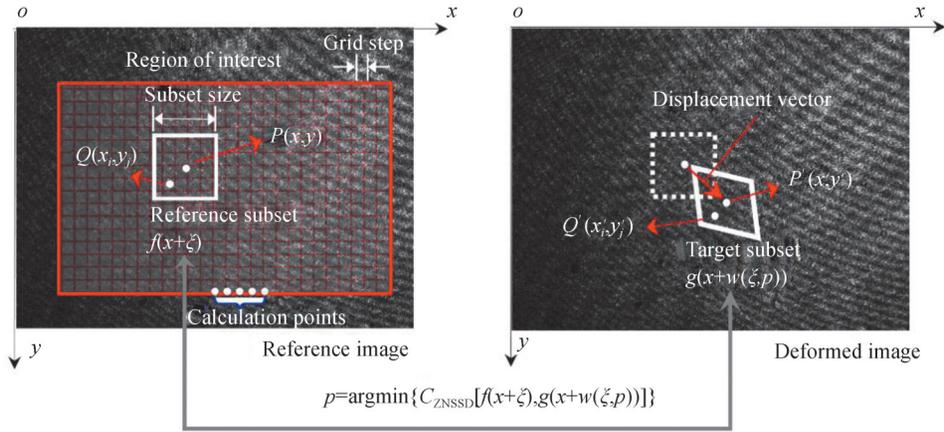


图2 DIC处理流程

Fig. 2 Process of DIC algorithm

零均值归一化最小平方距离互相关函数 (Zero-mean Normalized Sum of Squared Difference, ZNSSD) 是最为被推荐使用来定量评估两个子集之间的相似性,因为它对于照明波动的偏移变化具有很强的鲁棒性<sup>[17-19]</sup>。

$$C_{\text{ZNSSD}}(p) = \sum_{\xi} \left[ \frac{f(x+\xi) - \bar{f}}{\sqrt{\sum_{\xi} [f(x+\xi) - \bar{f}]^2}} - \frac{g(x+w(\xi, p)) - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{\xi} [g(x+w(\xi, p)) - \bar{g}]^2}} \right]^2 \quad (5)$$

式中,  $f(x)$  和  $g(x)$  分别表示参考图像和变形图像在  $x=(x, y)^T$  处的灰度值;  $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{\xi} f(x+\xi)$ ,  $\bar{g} = \frac{1}{N} \sum_{\xi} g(x+w(\xi, p))$  是两个子集的平均强度值,  $N$  表示参考子集的像素总数;  $\xi = (\Delta x, \Delta y)^T$ ,  $(-M \leq \Delta x, \Delta y \leq M)$  表示每个子集中像素点的局部坐标。 $w(\xi, p)$ ,  $p = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T$  描述了变形子集的确切位置和形状。

一般来说,如果子集足够小,子集变形函数  $w(\xi, p)$  可以用常用的一阶位移映射函数来很好地近似。此时参考子集中点  $Q(x_i, y_j)$  可以根据式(6)映射到目标子集中的点  $Q'(x'_i, y'_j)$  上。

$$\begin{cases} x'_i = x + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_j = y + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\Delta x, \Delta y$  是子集中心点  $P$  到点  $Q$  的距离;  $u, v$  分别是子集中心点  $P$  在  $x$  和  $y$  方向的位移分量,分别对应了图1(f)和(g);  $u_x, u_y, v_x, v_y$  是子集的位移梯度分量。

#### 1.4 数字全息DIC对曲面物体进行面内位移测量

凸透镜成像规律如图3(a)所示,假设点  $P$  是被测物体的对焦点,点  $P$  经过透镜后会在成像面  $P'$  点会聚,物距为  $d_u$ ,像距为  $d_v$ 。根据成像关系可知,  $d_u, d_v$  和透镜焦距  $f$  满足

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_u} + \frac{1}{d_v} \quad (7)$$

此时点  $P$  前后的一定范围都能清晰成像到像平面内  $P'$  点前后的一定范围内,这个成像清晰的范围在像平面处称为焦深。焦深 DOF 满足关系式<sup>[20]</sup>

$$\text{DOF} = \frac{\lambda}{2\text{NA}^2} \quad (8)$$

式中,  $\text{NA}$  表示光学系统的数值孔径。成像清晰且距离透镜最近的面称为前焦深,对应的像距记为  $d_{v1}$ ,成像清晰且距离透镜最远的面称为后焦深,对应的像距记为  $d_{v2}$ 。那么就可以得到前焦深的像距  $d_{v1} = d_v - \frac{\text{DOF}}{2}$ ,后焦深的像距  $d_{v2} = d_v + \frac{\text{DOF}}{2}$ 。根据式(7)的变形  $d_u = \frac{fd_v}{d_v - f}$  可得前焦深对应的远点和

近点所在物体平面对应的像距分别为  $d_{u1}$  和  $d_{u2}$ 。此时就能获得景深距离  $\Delta L = d_{u1} - d_{u2}$ 。

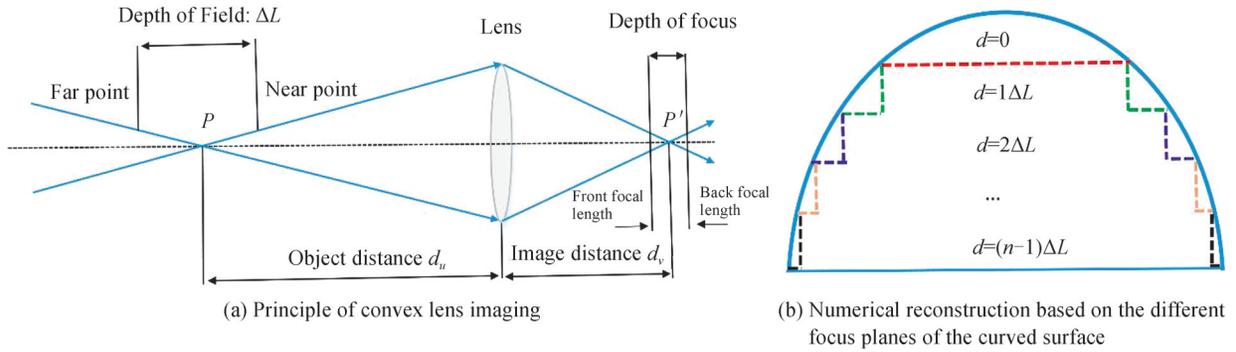


图3 对曲面物体应用DIC算法原理  
Fig. 3 Applying DIC algorithm to curved object

当曲面物体高度大于景深  $\Delta L$  时,由于曲面各部分处于不同的景深范围,一幅图中景深外的物体由于离焦会导致DIC方法产生退相关现象,造成测量不准,因此,二维DIC不适合用于曲面的面内位移测量。

但是,DH基于一幅全息图,能够在数字重建的过程中通过调节重建距离  $d$  获得不同深度处的物体的激光散斑图像。根据式(2),通过调节重建距离  $d$  可以获得不同重建距离下的物体波场,并根据式(3)提取出不同重建距离下的强度信息。

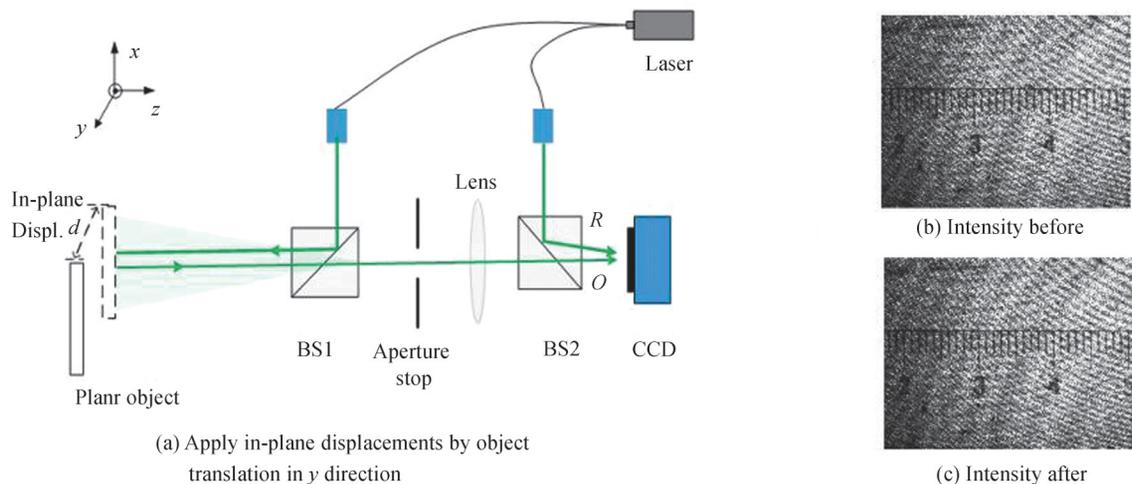
因此,可以根据系统的景深  $\Delta L$ ,将曲面高度  $h$  以景深  $\Delta L$  为间隔分成  $n = \frac{h}{\Delta L}$  块分别进行DH的数值重建,如图3(b)所示,可以得到曲面物体在不同高度处聚焦的激光散斑图像。比如曲面物体的顶点附近高为景深  $\Delta L$  的区域的重建距离为0,接着下面每一个高度为景深  $\Delta L$  的层重建距离以此为  $1\Delta L, 2\Delta L, 3\Delta L, \dots, n\Delta L$ 。最终得到整个曲面在不同重建距离下的  $n$  幅分块聚焦的强度图,并将每幅图的离焦部分滤除,只保留聚焦部分。接着用二维DIC对这  $n$  幅聚焦的激光散斑强度图进行分别处理,最后按照划分好的区域进行拼接,即可得到整个曲面的面内位移结果。

## 2 实验数据与分析

为了验证本文提出方法的有效性,对平面和曲面进行了实验。用到的实验装置如图1(a)。本次实验装置的波长、重建距离、像素数、像素大小、视场、图像放大率,数值孔径NA、焦深和景深分别为  $532 \text{ nm}, 0 \text{ mm}, 1600 \times 1200, 4.4 \mu\text{m}, 35.00 \text{ mm} \times 26.25 \text{ mm}, 0.207, 0.15, 0.012 \text{ mm}$  和  $0.41 \text{ mm}$ 。

### 2.1 平面物体平移实验

平面物体的实验如图4,采用图4(a)所示的装置,选用大恒光电GCL-2002的粗糙表面平面物体进行试



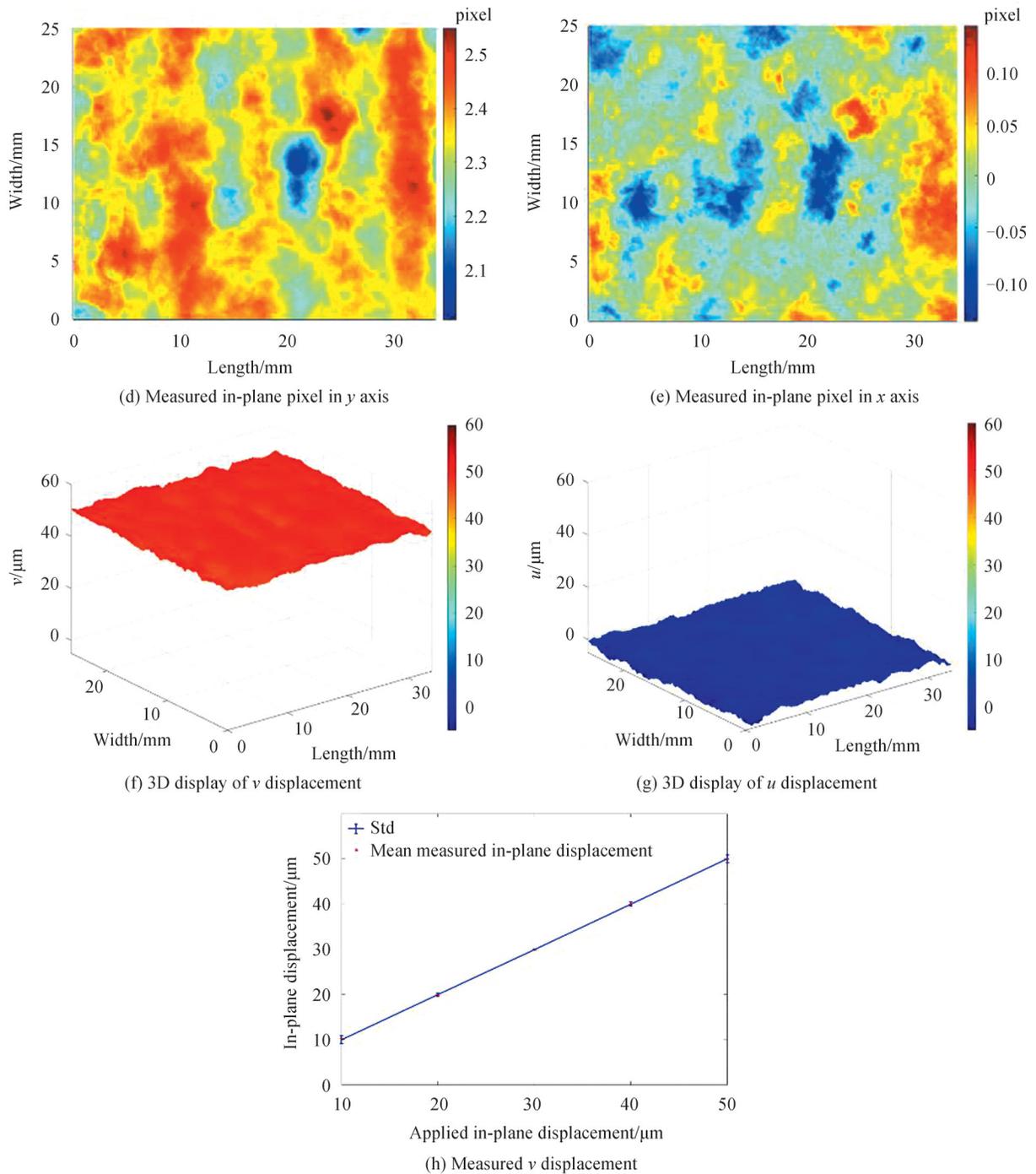


图4 平面物体平移实验

Fig. 4 Translation experiment for planar object

验,对该平面物体沿着 $y$ 轴施加面内位移。这里以施加 $50\ \mu\text{m}$ 面内位移为例。首先利用DH装置记录位移前后的全息图,并从中提取出位移前的强度图和位移后的强度图分别如图4(b)和(c),接着对这2幅强度图应用DIC算法,得到面内位移 $v, u$ 像素的测量结果分别如图4(d)和(e)。从 $v$ 的结果可知,像素值全部分布在2.1到2.5之间,且像素的平均值是2.3,结合视场放大率后可以得到 $v$ 和 $u$ 的位移量分别如图4(f)和(g)。根据测量像素值与位移值的表达式:位移 = 像素  $\times$   $\frac{\text{视场大小}}{\text{CCD Pixels}}$  = 像素  $\times$   $\frac{35000\ \mu\text{m}}{1600\ \text{pixel}}$  可得 $v$ 的位移平均测量值为 $50.31\ \mu\text{m}$ ,测量相对误差为0.63%。由 $u$ 的测量结果可知,像素值全部分布在 $-0.1$ 到 $0.1$ 之间,呈现很好的对称性,这是由于沿着 $y$ 轴施加面内位移的过程中,在 $u$ 方向并没有产生任何位移,且像素平均值为

0.06,  $u$  的位移平均值为  $1.31 \mu\text{m}$ , 绝对误差也为  $1.31 \mu\text{m}$ , 所以实验结果是符合预期的。面内位移的测量精度跟 DIC 算法、视场大小以及 CCD 尺寸有关, 最好的 DIC 算法可以提供 0.02 像素的精度, 因此本实验装置的面内位移测量精度为  $0.02 \text{ pixel} \times \frac{35000 \times 26250 \mu\text{m}}{1600 \times 1200 \text{ pixels}} = 0.4375 \mu\text{m}$ 。

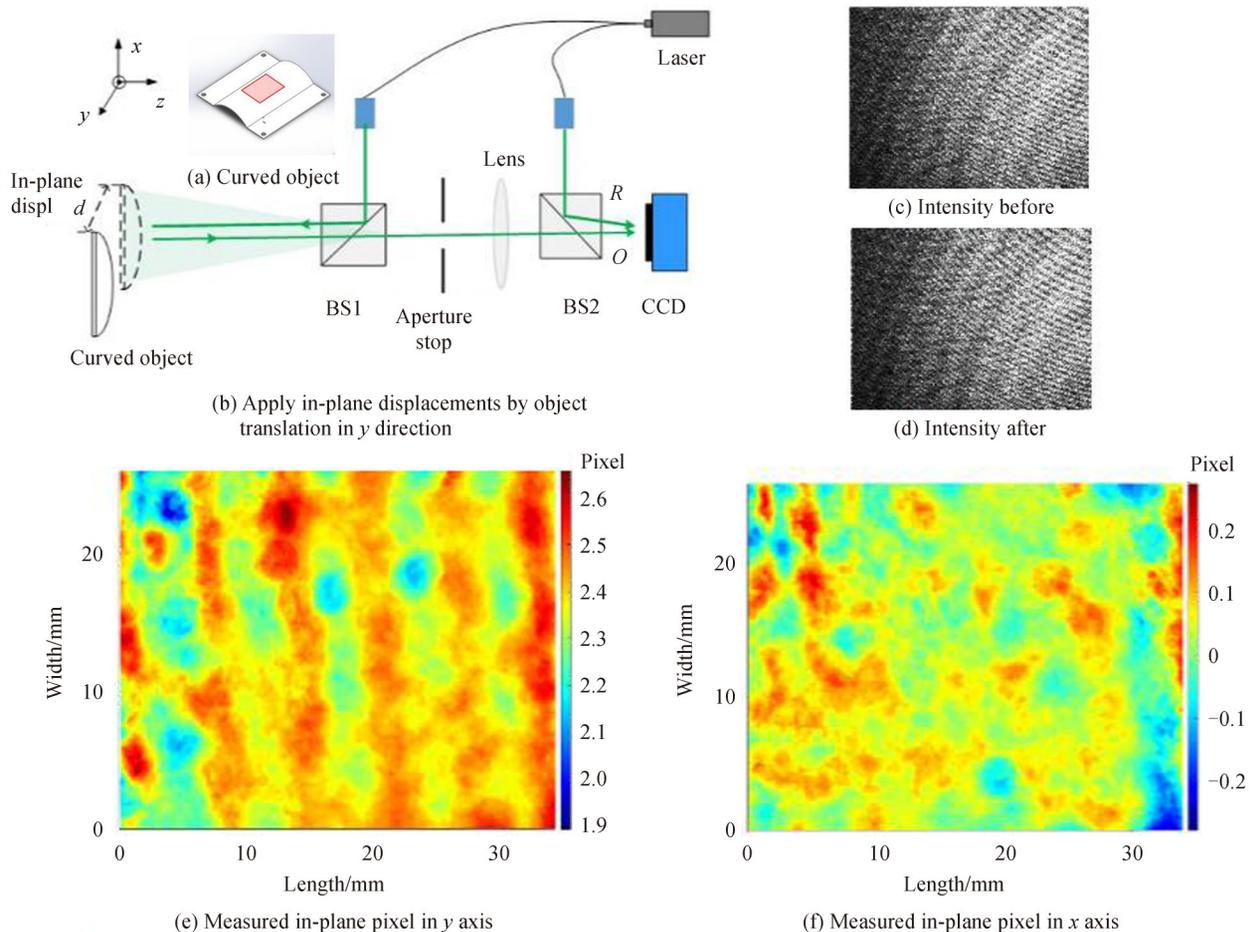
最后以  $10 \mu\text{m}$  为间隔, 对平面物体沿着  $y$  轴施加  $10 \sim 50 \mu\text{m}$  的位移, 重复 5 次后得到平均值和标准差结果如图 4(h) 所示。从实验结果可知, 多次实验的平均值具有很好的线性度且与施加值吻合的很好, 标准差也证明了实验的可重复性很好, 多次实验的平均相对误差为 1.17%, 由此验证了该方法对于平面物体的面内测量具有非常高的精度。

## 2.2 曲面物体平移实验

曲面物体的实验如图 5。采用图 5(a) 所示的 3D 打印弓高为 9 mm, 弯曲部分的宽度为 5 cm 的粗糙表面曲面物体进行实验, 红框部分为本次实验视场  $35.00 \text{ mm} \times 26.25 \text{ mm}$  的实验区域。通过图 5(b) 所示的装置对曲面物体沿着  $y$  轴施加  $50 \mu\text{m}$  的面内平移, 以曲面最高点所在的  $XOY$  平面为重建距离 0 进行整幅全息图的数值重建, 从全息图中提取出位移前后的强度图分别如图 5(c) 和 (d)。通过 DIC 算法得到  $v$  和  $u$  的像素计算结果分别如图 5(e) 和 (f)。由实验结果可知,  $v$  的像素平均值为 2.25,  $u$  的像素平均值为  $-0.07$ , 结合视场放大率可计算出曲面物体在  $y$  方向和  $x$  方向的面内位移结果分别如图 5(g) 和 (h) 所示, 其中  $v$  方向的平均位移为  $49.22 \mu\text{m}$ , 相对误差为 1.57%,  $u$  方向的平均位移为  $-1.49 \mu\text{m}$ , 绝对误差为  $1.49 \mu\text{m}$ , 考虑到施加位移时的系统误差和读数误差, 所以可以认为测量结果跟施加值非常符合。

接着以  $10 \mu\text{m}$  为间隔, 对曲面物体沿  $y$  轴施加  $10 \sim 50 \mu\text{m}$  的位移, 重复多次实验的结果如图 5(j)。由结果可知, 曲面物体的面内位移测量值与施加值也具有很好的线性关系, 且具有很好的一致性, 多次实验的相对误差平均值为 1.94%, 这也验证了本文方法对于曲面物体的面内位移具有很好的精度。

但是相对平面物体来说, 曲面物体面内位移测量结果的平均值或者标准差都比平面物体的实验结果差



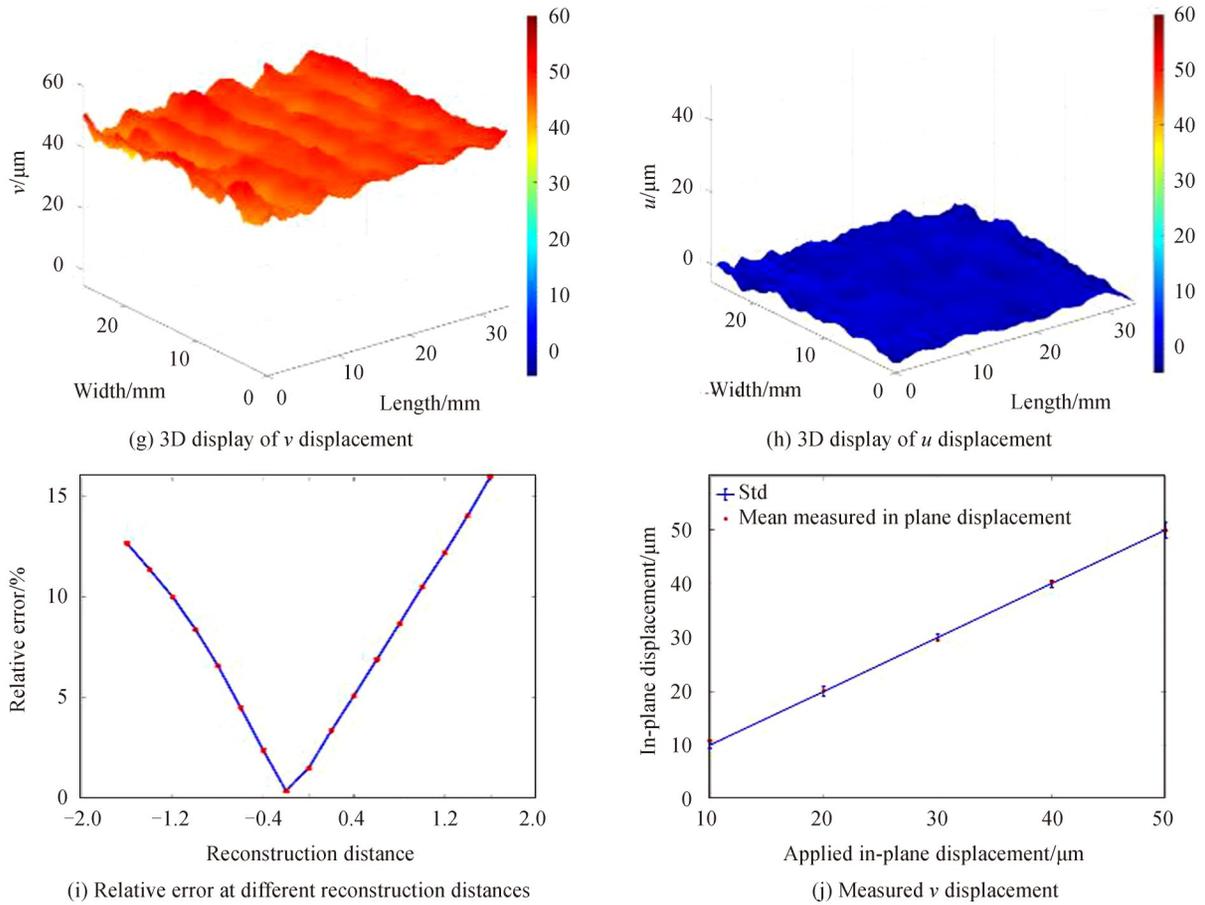


图5 曲面物体平移实验  
Fig. 5 Translation experiment for curved object

一点。通过对比图5(e)和图4(d)可知,曲面物体测量得到的像素值分布比平面物体的像素分布更加的广泛,波动性也更大,比如曲面物体 $v$ 的结果分布在1.9到2.6像素之间, $u$ 的测量结果分布在 $-0.3$ 到 $0.3$ 像素之间。造成这样问题的原因是由于曲面物体高度超过景深导致图像离焦和散斑退相关。本实验的曲面的高度为 $2.9\text{ mm}$ ,大于景深 $0.4\text{ mm}$ ,导致曲面物体大部分表面处于离焦状态。根据曲面高度和景深的数值,可以将曲面分为 $n = \frac{2.9\text{ mm}}{0.4\text{ mm}} + 1 = 8$ 块,以 $\frac{\Delta L}{2} = 0.2\text{ mm}$ 为间隔,以曲面顶点所在聚焦面的重建距离 $0$ 为中心,将重建距离从 $-1.6\text{ mm}$ 到 $1.6\text{ mm}$ 进行的遍历,得到面内位移测量相对误差的结果如图5(i)所示。由结果可知,重建距离影响面内位移测量结果,本实验的最佳重建距离在 $-0.2\sim 0\text{ mm}$ 之间,说明在这个区间内激光散斑图像中聚焦部分最大,因此二维DIC的测量结果也更加准确。同时,图5(i)也可以看出位移测量结果跟重建距离存在线性关系,所以根据线性关系可以帮助快速定位到最佳重建距离附近。但需要指出的是,本文并未对每个重建距离下图像中的离焦部分进行删除,因此离焦部分会影响DIC的测量结果。接下来,通过滤除每个重建距离下的离焦部分并保留聚焦部分,并将所有重建距离下的聚焦部分按照深度进行拼接成一幅三维的聚焦激光散斑图,将能够通过二维DIC技术对曲面物体进行面内位移测量。

### 3 结论

本文提出了一种基于数字图像相关方法(DIC)辅助的数字全息(DH)技术对粗糙表面物体面内位移进行测量的方法,将DIC应用领域拓宽到了全息技术重建的激光散斑图像。通过对全息图进行数值重建从而恢复出激光散斑强度图,对强度图应用DIC算法得到面内两个维度的位移结果,解决了单个DH装置只能对离面方向这一个维度位移测量的问题。本文通过二维位移装置对平面物体以及曲面物体施加面内位移,实验验证了本文方法具有非常高的精度,平面物体的多次重复性测量的相对误差为 $1.17\%$ 。但是曲面物体的

测量误差会比平面误差相对大一点,多次实验平均相对误差为 1.94%,这是因为本实验装置的聚焦深度为 0.4 mm,小于曲面高度 2.9 mm,导致曲面物体的部分表面处于离焦状态,影响二维 DIC 的测量。本文通过对重建距离的遍历研究了重建距离对曲面物体面内位移测量结果的影响,并且理论提出了针对曲面不同离焦面采取不同的重建距离进行数值重建最后将测量结果进行拼接的方法,有望进一步提高曲面物体的测量精度。与现有的方法相比,本文方法的优势在于三方面:首先,装置简单且信息利用度高,充分利用了以往 DH 中被丢弃的强度图信息,仅采用一套 DH 装置就能够实现面内两个维度位移的测量,提高了 DH 的测量能力;第二,探索了二维激光散斑 DIC 并证明了其有效性;第三,该方法可以通过在 DH 重建过程中调整重建距离,为 2D-DIC 应用到曲面物体的面内位移测量提供一种可能。需要指出的是,本文并未采用自动聚焦算法寻找最佳重建距离,而是通过带有刻度和特征信息的平面物体来肉眼寻找最聚焦的位置。经过平面物体的面内位移实验,通过 DIC 测量得到的面内位移值在肉眼认为最聚焦位置下已经非常接近施加值。

**致谢** 本文受国家重点研发开发项目基金资助。同时,北京航空航天大学固体力学研究所的潘兵老师对本文理论部分进行了指导,并对文章写作提出了宝贵的修改意见,在此致以衷心的感谢。

### 参考文献

- [1] SCHNARS U. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1994, 11(7): 2011-2015.
- [2] YAN H, PAN B. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital holography and digital image correlation[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5166-5169.
- [3] 顾国庆,王开福,燕新九.基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理[J]. *激光技术*, 2010,(6):750-752.
- [4] HAO Y, ASUNDI A. Impact of charge-coupled device size on axial measurement error in digital holographic system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1194-1196.
- [5] MORIMOTO Y, MATUI T, FUJIGAKI M, et al. Three-dimensional displacement analysis by windowed phase-shifting digital holographic interferometry[J]. *Strain*, 2008, 44(1): 49-56.
- [6] SCHWEDE R, BABOVSKY H, KIESSLING A, et al. Measurement of three-dimensional deformation vectors with digital holography and stereophotogrammetry[J]. *Optics Letters*, 2012,37(11): 1943-1945.
- [7] KULKARNI R, RASTOGI P. Three-dimensional displacement measurement from phase signals embedded in a frame in digital holographic interferometry[J]. *Applied Optics*, 2015,54(11): 3393-3397.
- [8] PAN B, QIAN K, XIE H, 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.
- [9] 潘兵,吴大方,夏勇.数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. *实验力学*, 2010,(2):120-129.
- [10] 潘兵,江天云,吴大方.时变热辐射环境下高温合金蜂窝板三维热变形测量[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6): 969-975.
- [11] JING Fulei, ZHANG Changxian, WANG Xiyang. Non-contact synchronous testing technology for turbine blade strain/temperature[J]. *Aerospace Power*, 2020, (6):35-38.  
荆甫雷,张常贤,王希影,等.涡轮叶片应变/温度非接触同步测试技术分析[J]. *航空动力*, 2020, (6):35-38.
- [12] COLOMB T, MONTFORT F, KÜHN J, et al. Numerical parametric lens for shifting, magnification, and complete aberration compensation in digital holographic microscopy[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2006, 23(12): 3177-3190.
- [13] YAN H, ASUNDI A. Comparison of digital holographic microscope and confocal micro-scope methods for characterization of micro-optical diffractive components[C]. *Ninth International Symposium on Laser Metrology*, 2008: 71550B.
- [14] ZHENG Q, MASHIWA N, FURUSHIMA T. Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles[J]. *Materials & Design*, 2020, 191: 108626.
- [15] SONG J, YANG J, LIU F, et al. Quality assessment of laser speckle patterns for digital image correlation by a multi-factor fusion index[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 124:105822.
- [16] MASHIWA N, FURUSHIMA T, MANABE K. Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 184: 16-21.
- [17] 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.
- [18] ZOU X, PAN B. Full-automatic seed point selection and initialization for digital image correlation robust to large rotation and deformation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021,138: 106432.
- [19] PAN B. An evaluation of convergence criteria for digital image correlation using inverse compositional Gauss-Newton algorithm[J]. *Strain*, 2014, 50(1): 48-56.
- [20] 迈克尔·夸克(著),韩郑生等译. *半导体制造技术*[M]. 北京:电子工业出版社,2015:359-360.

## In-plane Displacement Measurement Based on Digital Holography and Digital Image Correlation

CHEN Liangyou, YAN Hao

(*Department of Instrument Science and Engineering, School of Electronics, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract:** We propose an in-plane displacement measurement method based on combination of Digital Holography (DH) and Digital Image Correlation (DIC). It utilizes intensity images reconstructed by DH, and extends the capability of a single DH setup to in-plane displacement measurement. The methodology of the proposed method is illustrated. And the holograms before and after the in-plane displacement of the object are recorded by CCD. Then the intensity images are numerically reconstructed from holograms. And finally the DIC algorithm is applied to the intensity map to obtain the in-plane displacements in  $u$  and  $v$  components, respectively. The method we proposed solves the problem that one single DH setup can only measure out-of-plane displacement, but not in-plane displacement. Furthermore, the intensity images of DH used in this method is essentially laser speckle images, rather than the surface spray speckle or natural texture of the object under white or natural light used in traditional DIC. Therefore it is a meaningful exploration of DIC method for the type of laser speckle images. Real experiments of in-plane displacement measurements of diffuse planar objects are performed. The results presents an average relative measurement error of 1.17%, verifying the validity and high accuracy of the proposed method. Finally, this paper discusses the feasibility of proposed method for in-plane displacement measurements of diffuse curved objects. Conventionally, 2D-DIC is unable to perform in-plane displacement measurements of curved objects due to the speckle decorrelation phenomenon caused by the limited depth of focus. However, with the ability of the DH technique to focus objects to different depths in a single hologram, it is possible to segment curved objects into different depth parts with each depth part focused for DIC measurements. This paper theoretically discusses such feasibility and experimentally traverses the DH reconstruction distance to evaluate the accuracy of the proposed method for in-plane displacement measurements of curved objects. This is also a meaningful exploration of DIC measurements of in-plane displacement of curved objects with the assist of DH. The advantages of this technique over the existing methods are as follows: 1) The setup is simple and has high information utilization, making full use of the intensity map information that has been discarded in previous holography method, enabling in-plane displacement measurements with only one DH setup; 2) Extend DIC to the type of laser speckle images and prove its effectiveness; 3) With the help of DH capability in mutlti-depth focusing, the possibility of 2D-DIC for in-plane displacement measurement of curved objects are explored and demonstrated feasible.

**Key words:** Digital holography; Digital image correlation; In-plane displacement; Curved object; Laser speckle

**OCIS Codes:** 090.1995; 100.2000; 140.3460