

## 多相机数字全息测量物体三维变形方法研究

张美娟<sup>1,3</sup>, 夏海廷<sup>1,3,4\*</sup>, 宋庆和<sup>2,3\*\*</sup>, 郭荣鑫<sup>1,3</sup>, 王世荣<sup>2</sup>, 方强<sup>1,3</sup><sup>1</sup>昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500;<sup>2</sup>昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500;<sup>3</sup>云南省土木工程防灾重点实验室, 云南 昆明 650500;<sup>4</sup>昆明理工大学民航与航空学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 针对数字全息技术测量物体表面三维微小变形时, 由于需要三个不同方向的矢量信息, 检测光路都比较复杂的问题, 提出了一种基于多相机数字全息三维变形检测方法。首先建立了准确重建物体变形前后相位差分布的方法, 然后根据不共面且含有三维变形信息的三个相位差, 实现物体表面三维变形场的检测。并对所提方法进行了数值模拟及实验验证, 实验结果表明了该方法的可行性及实用性。

**关键词** 全息; 数字全息; 三维变形; 多相机; 干涉计量; 有限元分析

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1609001

## 3D Deformation Measurement Method of Multi-Camera Digital Holography

Zhang Meijuan<sup>1,3</sup>, Xia Haiting<sup>1,3,4\*</sup>, Song Qinghe<sup>2,3\*\*</sup>, Guo Rongxin<sup>1,3</sup>, Wang Shirong<sup>2</sup>, Fang Qiang<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;<sup>2</sup>Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;<sup>3</sup>Yunnan Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Kunming 650500, Yunnan, China;<sup>4</sup>Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

**Abstract** Aiming at the problem that digital holography technology measures three-dimensional micro-deformation on the surface of an object, which requires vector information in three different directions, and usually the detection optical path is relatively complicated, a three-dimensional deformation detection method based on multi-camera digital holography is proposed. First, a method is established to accurately reconstruct the phase difference distribution before and after the object. According to the three phase differences that are not coplanar and contain three-dimensional deformation information, the detection of the three-dimensional deformation field on the surface of the object is realized. Then, numerical simulation and experimental verification of the proposed method are carried out, which proves the feasibility and practicability of the method.

**Key words** holography; digital holography; three dimensional deformation; multi-camera; interferometry; finite element analysis

## 1 引言

在数字全息检测技术中, 物光场的强度和相位都可以从全息图中获得, 因此利用相位变化信息进行全息测量得到了越来越多的应用<sup>[1-3]</sup>。相位包含了物体的高度信息, 可以实现表面形貌的测量, 也可以实现变形场的检测, 继而进行应力和应变的分析。数字全息干涉计量是一种提供全视场检测的光学无损技术, 广

泛应用于多个领域<sup>[3-4]</sup>, 如木材检测<sup>[5]</sup>、牙科检查<sup>[6]</sup>、化学反应<sup>[7-10]</sup>、梁的挠度分析<sup>[11]</sup>、透明物体材料<sup>[12]</sup>、生物材料<sup>[13-15]</sup>等变形场测量, 此外数字全息还可应用于振动测量<sup>[16-18]</sup>、温度场<sup>[19-21]</sup>和流体测量<sup>[22-23]</sup>及显微全息<sup>[24-26]</sup>等领域。数字全息可以获得物体表面的1维、2维和3维变形场分布, 而同时获取物体的三维变形场能够更全面地了解物体整体变形情况, 进而更全面地对物体力学等特征进行分析。精确获取 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的微小

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-05-23; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(11862008)

通信作者: \*16095310@qq.com; \*\*songqinghe@kust.edu.cn

变形,是全面表征物体在载荷作用下的力学行为和原位应变场计算的必要条件。物体表面三维变形是观测点沿灵敏度矢量方向的位移,为了测量物体表面的三维变形,需要生成 3 个不共面的灵敏度矢量,这可以通过从不同方向照射或观察物体来实现。Hernandez-Montes 等<sup>[27-28]</sup>采用 3 束不同方向的光照射测量物体,且与同一束参考光相干涉的数字全息干涉测量系统来测量猫的鼓膜表面  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的微小变形,从而测量猫鼓膜表面的应变场。Kulkarni 等<sup>[29]</sup>提出了一种可以从一个数字全息干涉场同时测量三维位移的技术。Tankam 等<sup>[30]</sup>利用彩色数字全息系统测量物体表面的三维变形场。Schwede 等<sup>[31]</sup>提出了一种基于 4 个相机的立体摄影测量与数字全息技术相结合的方法来确定任意受力物体的三维变形矢量,该系统中数字全息技术需要记录 4 个相机位置处变形前、后的数字全息图,即总共需要记录 8 幅全息图以获得物体变形情况。

现有的数字全息方法基本可以实现三维变形的测量,但其实验光路均比较复杂,因此设计一种光路简单、易于操作和计算的数字全息三维变形场测量方法仍是值得研究的课题。基于此,本文提出了一种基于多相机数字全息测量物体三维变形的的方法。所提方法从不同位置观察物体来获得 3 个不共面的灵敏度矢量,并根据相位差、灵敏度矢量、三维变形之间的关系求解出所测量物体的三维变形。

## 2 基本原理

### 2.1 数字全息记录与重建

基于多相机数字全息的记录方式采用传统离轴全息,实验装置如图 1 所示,激光器发出的激光经过分光棱镜 BS1 后分成互相垂直的两束光;分光棱镜 BS1 分出的第 1 束光经过平面反射镜 M2 反射到显微物镜 MO1 和准直透镜 L1 进行扩束准直,扩束准直后照明待测物体,待测物体的散射光场经合束镜 BS2 投射到 CCD 上;分光棱镜 BS1 分出的第 2 束光经过平面反射镜 M1 反射到显微物镜 MO2 和准直透镜 L2 上进行扩束准直,再由平面反射镜 M2 反射到合束镜 BS2 作为参考光;到达合束镜 BS2 后,参考光与物光场叠加形成数字全息图。实验装置还包含高精度二维电控平移台,CCD 固定在电控平移台上,CCD 相机探测面法线与待测物体法线保持平行,依靠电控平移台精准控制 CCD 在  $x$ 、 $y$  方向的平移量。CCD 在不同位置分别记录下待测物体变形前、变形后的数字全息图。

所记录的数字全息图在进行重建时,使用球面波作为重建波<sup>[32]</sup>,采用像面滤波技术实现可变放大率波

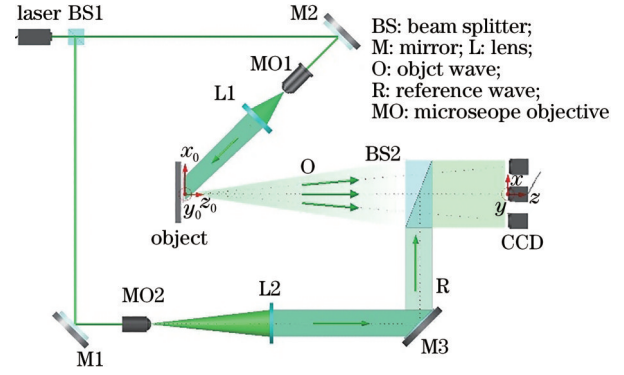


图 1 多相机数字全息记录光路图

Fig. 1 Optical setup of multi-camera digital holography

前重建,让其在不同位置拍摄全息图的重建像具有相同尺寸并在同一位置精确叠加。结合衍射逆运算得到变形前后的无干扰全息图,进而获得无零级和共轭级干扰的变形前后重建物光场。根据变形前后得到的重建物光场可获得带有三维变形信息,且相互独立的三个相位差分布,即可计算出物体表面三维变形场。

### 2.2 基于多相机数字全息检测三维变形场原理

物体发生变形  $d$  时,物体表面各点到达 CCD 的光程将随之改变,光程改变引入的相位差  $\Delta\varphi$  与三维变形向量  $d = (d_{x_0}, d_{y_0}, d_{z_0})$  的关系可记为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot (K_o - K_e), \quad (1)$$

$$K_e = -\cos\theta_{er}\sin\theta_e i - \sin\theta_{er}\sin\theta_e j - \cos\theta_e k, \quad (2)$$

$$K_o = \cos\theta_{or}\sin\theta_o i + \sin\theta_{or}\sin\theta_o j + \cos\theta_o k, \quad (3)$$

式中:  $K_e$  是照明矢量,为物体的照明方向;  $K_o$  是观察矢量,为物体的观察方向;  $\theta_o$  为 CCD 与光轴的夹角,称为观察角,  $\theta_{or}$  为观察角  $\theta_o$  在  $xy$  平面的投影与  $x$  轴的夹角;  $\theta_e$  为照明光的入射角,  $\theta_{er}$  为入射角  $\theta_e$  在  $xy$  平面的投影与  $x$  轴的夹角。则灵敏度矢量  $S = K_o - K_e$ 。

图 2 为照明和观察矢量示意图,则物体上任意点因变形而产生的位移可表示为

$$d = d_{x_0} i + d_{y_0} j + d_{z_0} k, \quad (4)$$

式中:  $d_{x_0}$ 、 $d_{y_0}$ 、 $d_{z_0}$  分别为  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  方向的位移分量。为了检测  $d_{x_0}$ 、 $d_{y_0}$ 、 $d_{z_0}$ ,采用 3 个不共线的 CCD 相机从不同的方向观察变形前、后的物体,并由 3 个 CCD 记录物体变形前后的全息图,基于重建物光场计算出的 3 个相位差与三维位移场各分量之间的矩阵关系为

$$\begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \Delta\varphi_3 \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} A \begin{pmatrix} d_{x_0} \\ d_{y_0} \\ d_{z_0} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -(\cos\theta_{or1}\sin\theta_{o1} + \cos\theta_{er}\sin\theta_e) & -(\sin\theta_{or1}\sin\theta_{o1} + \sin\theta_{er}\sin\theta_e) & \cos\theta_{o1} + \cos\theta_e \\ \cos\theta_{or2}\sin\theta_{o2} + \cos\theta_{er}\sin\theta_e & -(\sin\theta_{or2}\sin\theta_{o2} + \sin\theta_{er}\sin\theta_e) & \cos\theta_{o2} + \cos\theta_e \\ \cos\theta_{or3}\sin\theta_{o3} + \cos\theta_{er}\sin\theta_e & \sin\theta_{or3}\sin\theta_{o3} + \sin\theta_{er}\sin\theta_e & \cos\theta_{o3} + \cos\theta_e \end{bmatrix}, \quad (6)$$

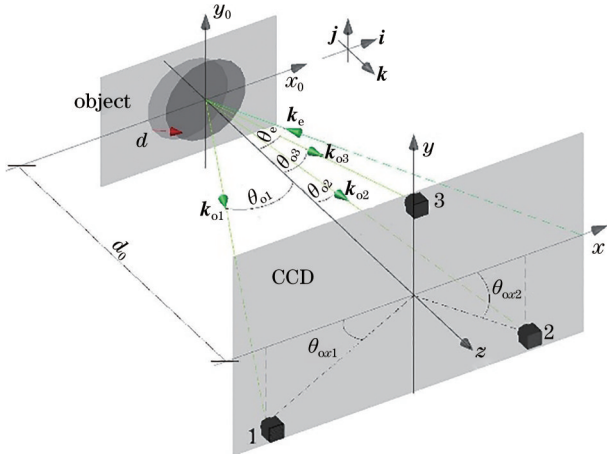


图 2 照明和观察矢量示意图

Fig. 2 Scheme for illumination vector and observation vector

式中： $\mathbf{A}$  为灵敏度矩阵； $\theta_{oi} (i=1, 2, 3)$  为  $\text{CCD}_i (i=1, 2, 3)$  与光轴的夹角， $\theta_{axi} (i=1, 2, 3)$  为  $\theta_{oi} (i=1, 2, 3)$  在  $xy$  平面的投影与  $x$  轴的夹角。当 3 个 CCD 记录位置不同时，可以得到不共面的 3 个灵敏度矢量，则灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$  可逆，3 个方向的位移分量可表示为

$$\begin{pmatrix} d_{x_0} \\ d_{y_0} \\ d_{z_0} \end{pmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi} \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \Delta\varphi_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

利用数字全息图重建出待测物体变形前、后 CCD 在 3 个不同位置处的物光场相位  $\varphi_1^0(x_0, y_0)$ 、 $\varphi_2^0(x_0, y_0)$ 、 $\varphi_3^0(x_0, y_0)$  和  $\varphi_1^1(x_0, y_0)$ 、 $\varphi_2^1(x_0, y_0)$ 、 $\varphi_3^1(x_0, y_0)$ ，即可获得 3 个相互独立的相位差分布：

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1(x_0, y_0) = \varphi_1^1(x_0, y_0) - \varphi_1^0(x_0, y_0) \\ \Delta\varphi_2(x_0, y_0) = \varphi_2^1(x_0, y_0) - \varphi_2^0(x_0, y_0) \\ \Delta\varphi_3(x_0, y_0) = \varphi_3^1(x_0, y_0) - \varphi_3^0(x_0, y_0) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)，即可求出 3 个方向的位移场分量，从而获得三维位移场分布。

### 3 模拟仿真与实验验证

#### 3.1 多相机数字全息三维变形检测模拟仿真

本实验组模拟计算的物体为四周固定的铝合金圆盘，其直径为 80 mm，厚度为 2.4 mm，材料为铝合金，弹性模量为 71 GPa，泊松比为 0.3。铝合金圆盘与带有千分尺的固定装置依靠螺纹固定在一起，铝合金圆盘中心受到旋转千分尺所施加的点荷载。用 ANSYS 软件模拟变形场的计算时，铝合金圆盘的边界约束和受力示意图如[图 3(a)]所示，向圆盘中心施加 18 N 的力。将有限元模拟计算得到的圆盘位移场 3 个分量数据进行插值，即可得到 3 个  $1200 \times 1200$  的位移分量矩阵，如[图 3(b)、(c)、(d)]所示。

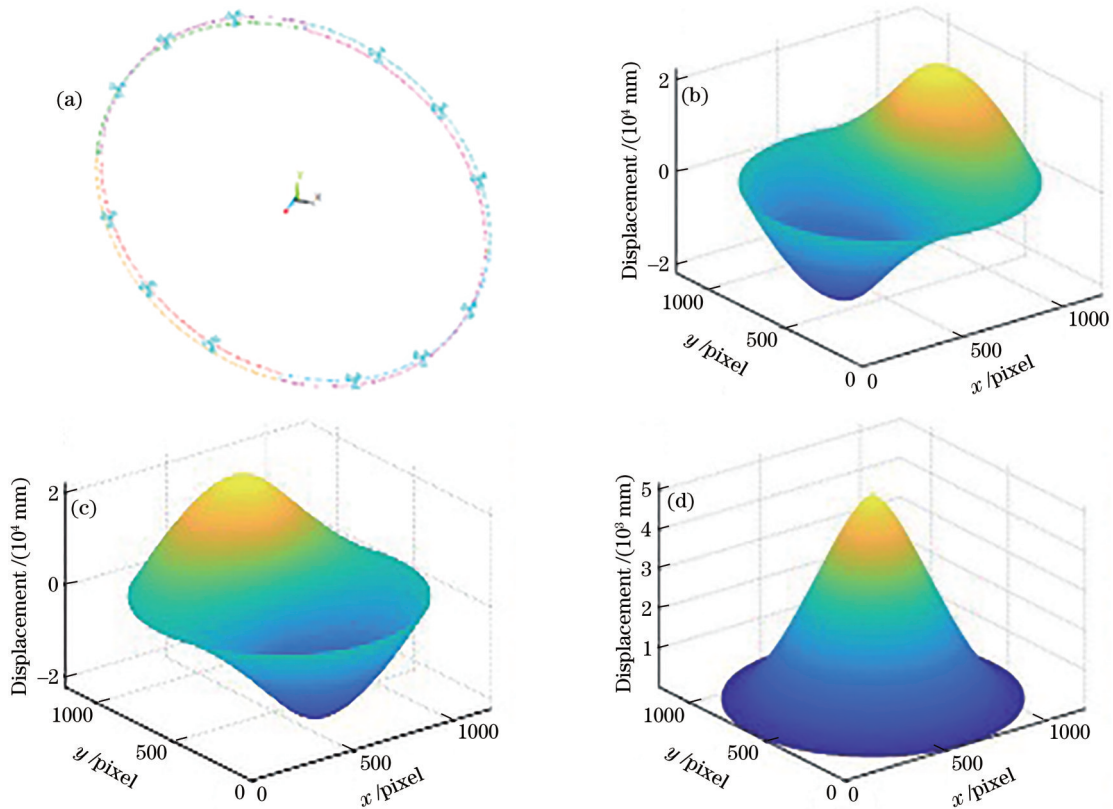


图 3 ANSYS 计算的三维位移场 ( $1200 \times 1200$ )。(a) 物体受力示意图；(b) 位移分量  $d_{x_0}$ ；(c) 位移分量  $d_{y_0}$ ；(d) 位移分量  $d_{z_0}$ 。

Fig. 3 Three-dimensional displacement field calculated by ANSYS ( $1200 \times 1200$ ). (a) Schematic diagram of force on object;

(b) displacement component  $d_{x_0}$ ; (c) displacement component  $d_{y_0}$ ; (d) displacement component  $d_{z_0}$ .



设置 3 个 CCD 相机坐标位置分别为  $(-100, -30, 1920)$  mm、 $(100, -30, 1920)$  mm、 $(0, 30, 1920)$  mm。则可得到 3 个 CCD 相机与光轴的夹角  $\theta_{oi}$  及其在平面  $xyz$  的投影与  $x$  轴的夹角  $\theta_{oxi}$ 。记光波波长  $\lambda = 532$  nm, 物体到 CCD 记录平面的距离  $d_0 = 1920$  mm。照明光的角度  $\theta_e = \pi/4, \theta_{ex} = 0$ , 将 3 个方向位移分量  $d_{x_0}, d_{y_0}, d_{z_0}$  及灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$  代入式 (5), 得

到含有三维变形信息的相位差  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$ 。将相位差  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$  分别输入数字全息模拟程序, 得到包裹的相位差, 再将相位差进行相位解包裹, 其结果如图 4 所示。将数字全息系统计算得到的解包裹相位差  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$  及灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$  代入式 (7) 进行多相机数字全息三维变形场检测计算, 即可得到 3 个方向的位移分量  $d_{x_0}, d_{y_0}, d_{z_0}$ , 如图 5 所示。

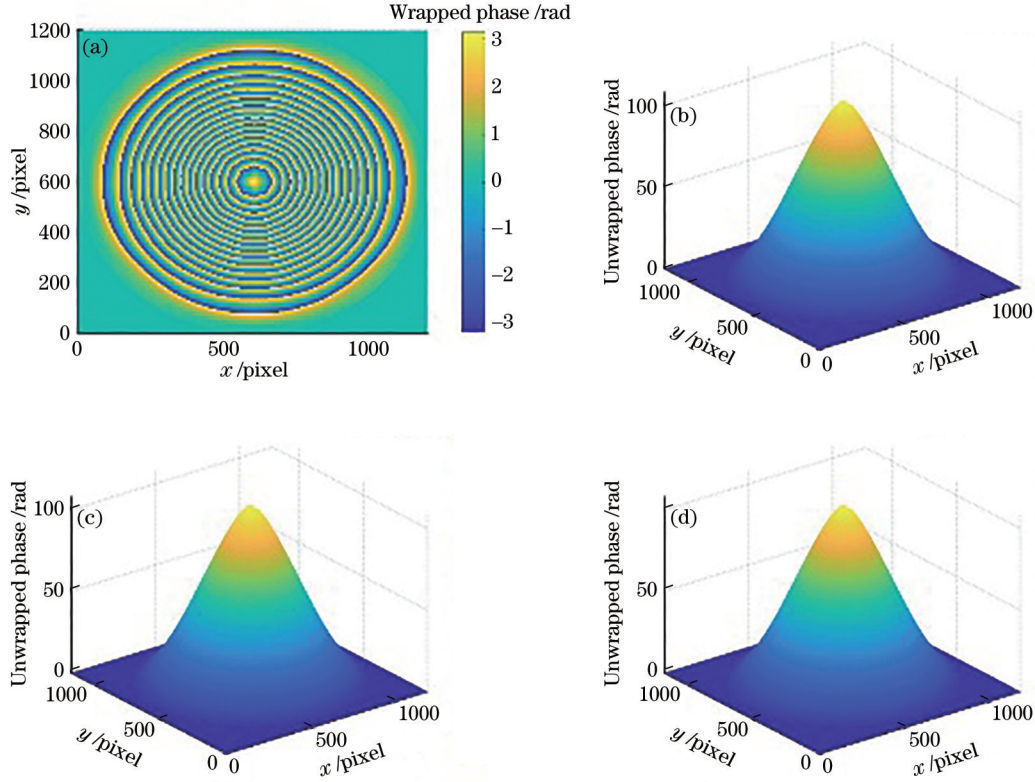


图 4 全息模拟计算相位差结果。(a)包裹相位差分布;(b)解包裹相位差  $\Delta\varphi_1$ ;(c)解包裹相位差  $\Delta\varphi_2$ ;(d)解包裹相位差  $\Delta\varphi_3$   
Fig. 4 Phase difference results calculated by holographic simulation. (a) Wrapped phase distribution; (b) unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_1$ ; (c) unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_2$ ; (d) unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_3$

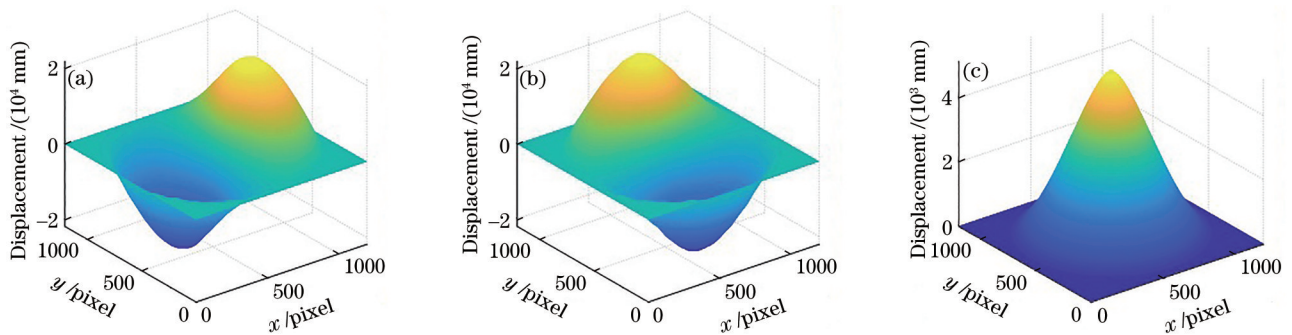


图 5 三维位移场模拟计算结果。(a)位移分量  $d_{x_0}$ ;(b)位移分量  $d_{y_0}$ ;(c)位移分量  $d_{z_0}$

Fig. 5 Three-dimensional displacement field simulation results. (a) Displacement component  $d_{x_0}$ ; (b) displacement component  $d_{y_0}$ ; (c) displacement component  $d_{z_0}$

### 3.2 多相机数字全息三维变形检测实验

多相机数字全息实验光路如图 1 所示, CCD 相机型号为 GRAS-50S5M-C, 像元数量为  $2048 \times 2048$ , 像元尺寸为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。实验中被测物体为周边固定的铝合金圆盘, 圆盘中心受到旋转千分尺所

施加的点荷载, 使物体表面产生离面及面内位移。3 个 CCD 相机坐标位置与第 3.1 节相同, 照明光的位置坐标为  $(640, 0, 750)$  mm, 根据相机、照明光位置坐标信息可以得到 3 个 CCD 相机与光轴的夹角  $\theta_{oi}$ 、照明光与光轴夹角  $\theta_e$  及在平面  $xy$  的投影与  $x$  轴的夹角

$\theta_{ori}$ 、 $\theta_{ex}$ , 从而得到灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$ 。将 CCD 相机拍摄得到的全息图代入数字全息波前重建计算程序, 计算出物体变形前、后的相位差, 再将相位差进行相位解包

裹得到  $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 、 $\Delta\varphi_3$ , 如图 6 所示。进而根据式 (7) 计算出待测物体三维位移  $d_{x_0}$ 、 $d_{y_0}$ 、 $d_{z_0}$ , 实验结果如图 7 所示。

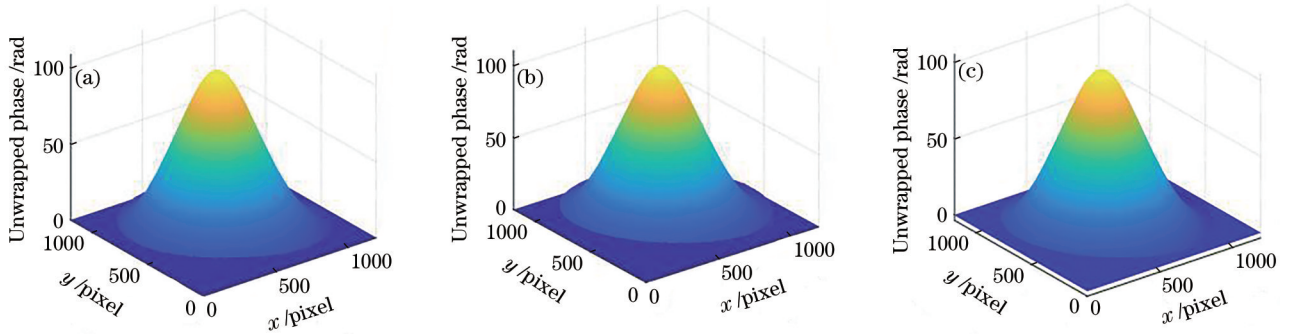


图 6 实验计算相位差结果。(a)解包裹相位差  $\Delta\varphi_1$ ; (b)解包裹相位差  $\Delta\varphi_2$ ; (c)解包裹相位差  $\Delta\varphi_3$

Fig. 6 Phase difference results calculated by experiment. (a) Unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_1$ ; (b) Unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_2$ ; (c) Unwrapped phase difference distribution  $\Delta\varphi_3$

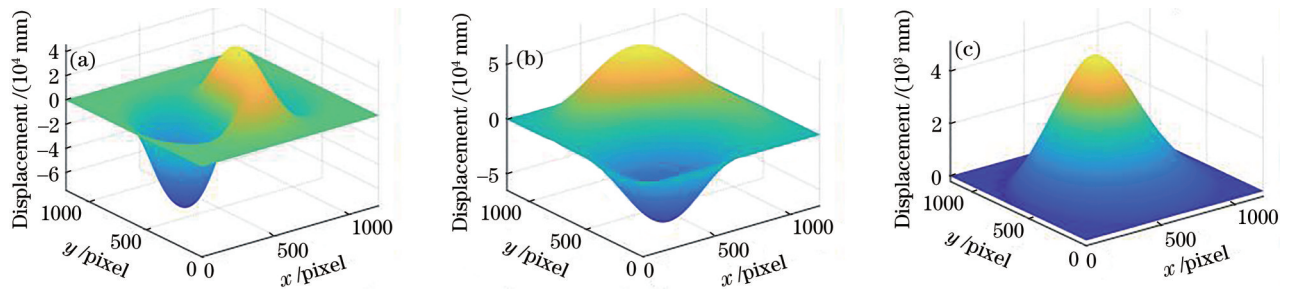


图 7 实验计算相位差结果。(a)位移分量  $d_{x_0}$ ; (b)位移分量  $d_{y_0}$ ; (c)位移分量  $d_{z_0}$

Fig. 7 Experimental results of three dimensional displacement field. (a) Displacement component  $d_{x_0}$ ; (b) displacement component  $d_{y_0}$ ; (c) displacement component  $d_{z_0}$

由图 5 和图 7 的测量结果可以看出, 多相机数字全息实验检测结果与有限元数字模拟计算结果基本吻合, 表明该检测方法切实可行, 量化测量结果可靠。模拟与实验结果对比如图 8 所示, [图 8(a)] 为位移分量  $d_{x_0}$  在  $y=600$  pixel 处绘制的数字模拟、实验结果及两者差值剖面线对比, [图 8(b)] 为位移分量  $d_{y_0}$  在  $x=600$  pixel 处

绘制的数字模拟、实验结果及两者差值剖面线对比, [图 8(c)] 为位移分量  $d_{z_0}$  在  $y=600$  pixel 处绘制的数字模拟、实验结果及两者差值剖面线对比。从图 8 可以看出, 离面位移场  $d_{z_0}$  与有限元数字模拟结果吻合较好, 而面内位移场  $d_{x_0}$ 、 $d_{y_0}$  与有限元数字模拟结果相比误差较大。

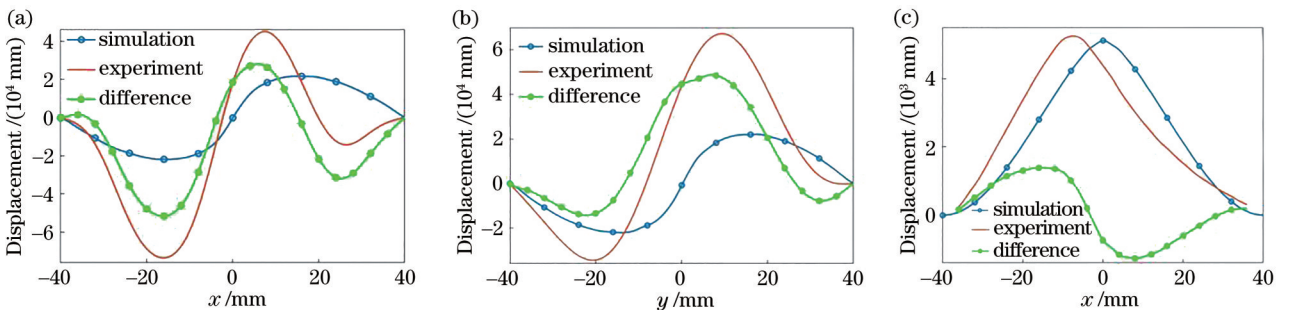


图 8 数字模拟与实验结果对比。(a)位移分量  $d_{x_0}$  在  $y=600$  pixel 处剖面线对比; (b)位移分量  $d_{y_0}$  在  $x=600$  pixel 处剖面线对比; (c)位移分量  $d_{z_0}$  在  $y=600$  pixel 处剖面线对比

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results. (a) Profile comparison of displacement component  $d_{x_0}$  at  $y=600$  pixel; (b) profile comparison of displacement component  $d_{y_0}$  at  $x=600$  pixel; (c) profile comparison of displacement component  $d_{z_0}$  at  $y=600$  pixel

产生误差的因素有如下几个: 1) 在实验过程中, 因为加力系统尚不能实现实时的应力分布测量, 所以仿

真参数是以最大离面位移相同进行计算的, 因此离面位移场  $d_{z_0}$  吻合度会更高; 2) 实验中的位移场模拟器边

界通过螺纹结合,受力达不到理想均匀状态,因此对面向内位移会产生较大影响;3)多相机拍摄物体变形前后全息图进行重建时,需要像面滤波取出所需的共轭物光像,像面滤波中心不能很精确地选在重建平面上共轭物光像的中心,即3个相机记录的全息图在进行波前重建时在同一位置做不到精准叠加,存在像素级误差;4)由于实验光路的限制,不同CCD之间的观察角在一个小角度(2.5°左右)内,而物体到CCD相机的记录距离及照明光位置坐标在测量时精度偏低,也会在计算上带来误差。上述问题均可通过进一步研究得到改善,使得多相机数字全息三维变形检测系统达到较高的检测精度。

## 4 结 论

提出了一种基于多相机数字全息三维变形检测方法,并利用ANSYS有限元软件及数字全息仿真系统实现了物体表面的三维变形场检测的仿真实验,同时完成了基于多相机数字全息测量物体三维变形场的实验研究。理论分析、数值模拟以及实验研究结果验证了所提方法的可行性和实用性。该方法采用单色数字全息记录光路,系统简单,成本较低,可为数字全息检测系统的拓展应用和三维变形场检测系统的设计提供有益的参考。

### 参 考 文 献

- [1] 闫浩, 隆军, 刘驰越, 等. 数字全息技术及散斑干涉技术在形变测量领域的发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0603010.  
Yan H, Long J, Liu C Y, et al. Review of the development and application of deformation measurement based on digital holography and digital speckle interferometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 0603010.
- [2] Andrés N, Pinto C, Lobera J, et al. Digital holography applied to simultaneously measure the shape and the radial deformation of a blood vessel (*ex-vivo*)[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106304.
- [3] Flores-Moreno J M, de la Torre-Ibarra M, Hernandez-Montes M D S, et al. DHI contemporary methodologies: a review and frontiers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106184.
- [4] Dekiff M, Berssenbrügge P, Kemper B, et al. Simultaneous acquisition of 3D shape and deformation by combination of interferometric and correlation-based laser speckle metrology[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(12): 4825-4840.
- [5] Kumar M, Shakher C. Experimental characterization of the hygroscopic properties of wood during convective drying using digital holographic interferometry[J]. Applied Optics, 2016, 55(5): 960-968.
- [6] Kumar M, Birhman A S, Kannan S, et al. Measurement of initial displacement of canine and molar in human maxilla under different canine retraction methods using digital holographic interferometry[J]. Optical Engineering, 2018, 57(9): 094106.
- [7] Shinde S K, Dhaygude H D, Chikode P P, et al. Structural, morphological, optical and hologram recording of the CdS and ZnS thin films by double exposure digital holographic interferometry technique[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(10): 7385-7392.
- [8] Maile N C, Mahadik S B, Takale M V, et al. Surface deformation studies of MnO<sub>2</sub> film by double exposure digital holographic interferometry technique[J]. Materials Research Express, 2019, 6(4): 045204.
- [9] Thorat J B. Surface deformation study of the electrodeposited nanostructured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films by double-exposure digital holographic interferometry[J]. Physica Status Solidi (a), 2019, 216(20): 1800661.
- [10] Thorat J B, Mohite S V, Madake S B, et al. Electrochemical and surface deformation studies on electrodeposited nanostructured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 384-393.
- [11] Černecký J, Božek P, Pivarčiová E. A new system for measuring the deflection of the beam with the support of digital holographic interferometry[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 66(1): 53-56.
- [12] Xia H T, Guo R X, Fan Z B, et al. Non-invasive mechanical measurement for transparent objects by digital holographic interferometry based on iterative least-squares phase unwrapping[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(4): 439-445.
- [13] Alvarez A S, de la Torre Ibarra M H, Santoyo F M, et al. Strain determination in bone sections with simultaneous 3D digital holographic interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 57: 101-108.
- [14] 王云新, 王大勇, 杨怡姝, 等. 数字全息技术在生物医学成像和分析中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209002.  
Wang Y X, Wang D Y, Yang Y S, et al. Application and analysis in the biomedicine field using digital holographic technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209002.
- [15] Acosta L S, del Socorro Hernández M M, Santoyo F M, et al. Study of skin rigidity variations due to UV radiation using digital holographic interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105909.
- [16] Mrozek P, Mrozek E, Werner A. Electronic speckle pattern interferometry for vibrational analysis of cutting tools[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2018, 12(2): 135-140.
- [17] Preciado J S, Lopez C P, Hernandez-Montes M D S, et al. Laser vibrometry in the quality control of the break of tanned leather[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 78-83.
- [18] Hernández-Montes M D S, Muñoz S, de la Torre M, et al. Quantification of the vocal folds' dynamic displacements[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(17): 175401.
- [19] Agarwal S, Kumar V, Shakher C. Temperature measurement of wick stabilized micro diffusion flame under the influence of magnetic field using digital



- holographic interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 161-169.
- [20] Xi T L, Di J L, Li Y, et al. Measurement of ultrafast combustion process of premixed ethylene/oxygen flames in narrow channel with digital holographic interferometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28497-28504.
- [21] Dancova P, Psota P, Vit T. Measurement of a temperature field generated by a synthetic jet actuator using digital holographic interferometry[J]. *Actuators*, 2019, 8(1): 27.
- [22] Desse J M, Olchewsky F. Dual-reference digital holographic interferometry for analyzing high-density gradients in fluid mechanics[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1635-1638.
- [23] Zhang S T, Duan L, Kang Q. Experimental research on thermocapillary migration of drops by using digital holographic interferometry[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(7): 1-13.
- [24] 冯方, 田爱玲, 刘丙才, 等. 基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0409003.  
Feng F, Tian A L, Liu B C, et al. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0409003.
- [25] 戴思清, 豆嘉真, 张继巍, 等. 基于数字全息术的近场成像与应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111008.  
Dai S Q, Dou J Z, Zhang J W, et al. Digital holography based near-field imaging and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111008.
- [26] 温凯, 马英, 张美玲, 等. 高稳定性定量相位显微技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 200001.  
Wen K, Ma Y, Zhang M L, et al. Quantitative phase microscopy with high stability[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 200001.
- [27] Hernandez-Montes M D S, Santoyo F M, Muñoz S, et al. Surface strain-field determination of tympanic membrane using 3D-digital holographic interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 71: 42-50.
- [28] Solis S M, Santoyo F M, Hernández-Montes M. 3D displacement measurements of the tympanic membrane with digital holographic interferometry[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5613-5621.
- [29] 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.
- [30] Tankam P, Song Q H, Karray M, et al. Real-time three-sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(12): 2055-2057.
- [31] 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.
- [32] 李俊昌, 宋庆和, Pascal Picart, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209008.  
Li J C, Song Q H, Pascal P, et al. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209008.