

散斑相关理论测量光纤材料离面位移的新方法

赵冉^{1,2*}, 洪志伟³, 陆菁³, 张洋^{1,2,4}, 孙勇^{1,2}, 黄永刚¹, 贾金升^{1,4}

¹ 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024;

² 太阳能与建筑节能玻璃材料加工技术北京市重点实验室, 北京 100024;

³ 中科信工程咨询(北京)有限责任公司, 北京 100039;

⁴ 中建材光芯科技有限公司, 山东 枣庄 277100

摘要 为实现工业生产中光纤传像材料的微纳米尺度形变监测, 基于数字散斑相关理论提出了一种测量离面位移的新方法。运用数字散斑相关算法测得材料变形前后两幅图像之间的面内位移, 然后根据楔面化模型即可得到光纤传像材料在显微镜下的离面位移场。介绍了离面位移提取算法的原理, 并基于球面化理论对光纤传像材料离面位移测量进行了计算机模拟和实验测试, 模拟结果与实验结果均表明该方法可以由二维图像中直观的面内位移直接提取离面位移, 可以完成光纤传像材料的实时形变测量。该方法的优点为实验装置十分简单, 只需要一部工业相机拍摄显微镜下两幅图像即可完成测量, 提取离面位移时无需转换到频域和相位解包操作, 适合于动态测量。

关键词 测量; 数字散斑相关理论; 离面位移; 光纤材料; 动态监测; 工业检测

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1712002

A New Method of Out-of-Plane Displacement Measurement for Optical Fiber Material Based on Digital Speckle Correlation Method

Zhao Ran^{1,2*}, Hong Zhiwei³, Lu Jing³, Zhang Yang^{1,2,4}, Sun Yong^{1,2},
Huang Yonggang¹, Jia Jinsheng^{1,4}

¹ State Key Laboratory of Green Building Materials, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China;

² Beijing Key Laboratory of Solar Energy and Building Energy-Saving Glass Materials Processing Technology, Beijing 100024, China;

³ Zhongkexin Engineering Consulting (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100039, China;

⁴ CNBM Guangxin Technology Co., Ltd, Zaozhuang, Shandong 277100, China

Abstract To monitor the micro-nano-scale deformation of optical fiber material during industrial production, this paper proposes a novel method based on the digital speckle correlation method (DSCM) to measure the out-of-plane displacement. The in-plane displacements between two consecutive images before and after material deformation are estimated by the DSCM. Then, the out-of-plane displacement field of optical fiber material under a microscope can be obtained by the wedge model. The principle of the DSCM is introduced and the measurement of out-of-plane displacement for the optical fiber material is simulated and tested based on the image spherizing algorithm. Simulation and experimental results show that the proposed method can directly extract the out-of-plane displacement from the in-plane displacement of two-dimensional images and measure the real-time deformation of optical fiber material. The experimental device used by the method is quite simple, and only an industrial camera is needed to capture two images under a microscope and thus complete the measurement. Furthermore, the out-of-plane displacement extraction process needs neither conversion of the images to the frequency domain nor phase envelope operation. The proposed method is appropriate for dynamic measurement.

收稿日期: 2021-02-06; 修回日期: 2021-03-19; 录用日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(11902317, 61975099, 52072357)、山东省重大科技创新工程项目(2019TSLH0122)

通信作者: *zhaoran276@sina.com

Key words measurement; digital speckle correlation method; out-of-plane displacement; optical fiber material; dynamic monitoring; industrial detection

OCIS codes 120.4630; 150.3040; 110.0180; 060.2340

1 引言

光纤传像材料(如光纤面板、倒像器、微通道板等)因具有众多优良的特性而被广泛应用于夜视、航天、电子等领域之中^[1-3]。然而,该类材料在工业生产过程中会受到热压、酸碱腐蚀、氢高温还原等理化作用的影响而产生不同程度的形变。虽然此形变量较小,仅有微米甚至纳米尺度,却足以严重影响光纤传像材料的重要性能。比如在夜视微光像管中,当微通道板与光纤面板材料的间隙增加 0.1 mm 时其耦合效率会降低 10%~20%,图像分辨力也会降低 20%以上^[4]。因此必须在光纤传像材料的生产过程中对其进行形变监控,特别是离面形变的监测,才能保障生产效率并节约生产成本。

目前用于固体材料的微纳米尺度离面形变检测方法主要有扫描电镜法^[5]、光学干涉法^[6]、投影栅法^[7-9]等。扫描电镜法虽然检测精度较高,但是只能以线或者点的形式检测,检测时间较长,无法应用于批量检测;光学干涉法虽然具有较高的灵敏度,但是检测装置较为复杂,对于检测环境的要求较高;投影栅法通常需要将栅线投影到物体表面进行测量,但是由于光纤传像材料形变区域的直径通常在 13 mm 以内,光纤单丝直径小于 5 μm,这对投影设备的要求较高,不适用于动态测量。除此之外,大部分干涉与投影技术均需要进行相位解包络操作,这无疑增加了计算量与测量误差,难以满足工业检测需求。

数字散斑相关方法(DSCM)是 20 世纪 80 年代由 Peters 等^[10-12]提出的一种基于块运动匹配的面内位移提取算法。该技术具有光路简单、精度高、测量环境要求低等优点,在现场实时测量、微尺度变形场测量等众多应用领域都展示了实用性和优越性。然而,由于该方法对于离面位移的测量并不敏感,因此往往需要两部或者多部相机同时拍摄多幅照片才能实现离面位移的提取^[13],在工业生产中不可避免的振荡和扰动会增加此类双目或多目技术的检测误差,再加上检测空间的限制等需求共同制约了该类方法在工业中的应用。

本文介绍了一种基于 DSCM 与楔面化模型相结合的离面位移测量方法,并根据图像球面化原理对该方法进行了计算机模拟与实验验证。实验结果表明,该方法能够根据二维图像的面内位移场直接提取出离面位移场,只需要一部工业相机拍摄显微镜下的两幅图像即可完成测量,并且充分利用了面内位移场携带的离面位移信息,提取离面位移时无需转换到频域和相位解包操作,适合于工业环境下光纤传像材料形变的动态监测。

2 基本原理

2.1 DSCM 原理

由于物体变形前后的散斑图是相关的,因此可通过相关公式确定物体变形前后对应的几何点,然后即可直接得到面内变形场。最常用的计算相关公式为^[14]

$$C(\Delta u, \Delta v) = \frac{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + \Delta u, y_j + \Delta v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + \Delta u, y_j + \Delta v) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为变形前的图像; $g(x, y)$ 为变形后的图像; Δu 与 Δv 为图像上每点在 x 方向和 y 方向上的整像素位移; \bar{f} 和 \bar{g} 为图像子区域灰度平均值。(1)式表示在变形前后的图像上各取大小为 $m \times m$ 的子区域来计算相关系数 C ,能使 C 取最大值的 Δu 和 Δv 即为子区域中心的位移。通过上述方法,可以确定两幅图像的整像素位移值。对于亚像素的计算采用基于梯度的亚像素相关算法^[14],表示为

$$C(\Delta u, \Delta v) = \frac{\left\{ \sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + \Delta u + u', y_j + \Delta v + v') - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + \Delta u + u', y_j + \Delta v + v') - \bar{g}]^2}, \quad (2)$$

式中： u' 、 v' 为对应于整像素位移结果的亚像素位移。将 $g(x_i + \Delta u + u', y_i + \Delta v + v') - \bar{g}$ 泰勒展开，取一级近似，并令 $\frac{\partial C}{\partial u'} = 0, \frac{\partial C}{\partial v'} = 0$ ，可得，

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & C \\ E & H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中，

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2, \quad (4)$$

$$B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG, \quad (5)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG, \quad (6)$$

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2, \quad (7)$$

$$E = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG, \quad (8)$$

$$H = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_y^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG, \quad (9)$$

$$G(x_i, y_j) = g(x_i + \Delta u, y_j + \Delta v) - \bar{g}, \quad (10)$$

$$G_x = g_x - \bar{g}_x, G_y = g_y - \bar{g}_y, \quad (11)$$

$$F(x_i, y_j) = f(x_i, y_j) - \bar{f}, \quad (12)$$

式中：以 x, y 为下标的量表示对 x, y 求偏导数。对(3)式中的微分进行计算时，选用 Barron 梯度算子，其计算方法为

$$\begin{cases} \frac{\partial I(i, j)}{\partial x} = \frac{1}{12}I(i-2, j) - \frac{8}{12}I(i-1, j) + \frac{8}{12}I(i+1, j) - \frac{1}{12}I(i+2, j) \\ \frac{\partial I(i, j)}{\partial y} = \frac{1}{12}I(i, j-2) - \frac{8}{12}I(i, j-1) + \frac{8}{12}I(i, j+1) - \frac{1}{12}I(i, j+2) \end{cases}. \quad (13)$$

根据以上公式即可求得所需的两幅连续图像间的运动场 $u = \Delta u + u'$ 和 $v = \Delta v + v'$ 。

2.2 楔面化模型测量离面位移

显微镜可以按照放大原理分为光学放大和电子放大两类。在纯光学放大的显微镜下观察光纤传像材料产生的形变均可近似被看作楔形形变，如图 1 所示，将光纤传像材料抬起一个很小的角度 α ，其中 R 为图像的宽度且 $OA = OA_1 = R$ 。从竖直方向向下看， A 点移动到了 A' ，竖直方向产生的离面位移为 w ，形变前后的面内位移为 $d = AA'$ 。在得到变形前后的两幅图像后可以通过 DSCM 对两幅图像进行计算。

由于

$$d = R(1 - \cos \alpha). \quad (14)$$

因此可以得到楔角 α 为

$$\alpha = \arccos \frac{R-d}{R}. \quad (15)$$

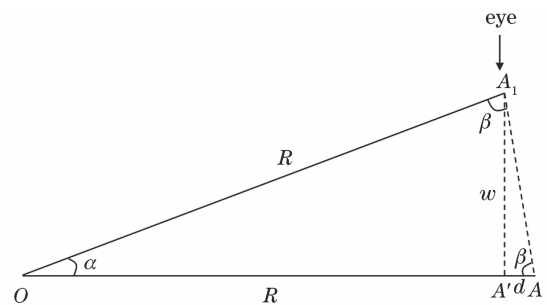


图 1 楔面化模型

Fig. 1 Wedged model

最后得到离面位移 w 为

$$w = R \sin \alpha. \quad (16)$$

3 模拟结果与分析

光纤传像材料在显微镜下的图像可以被认为是二维高斯函数阵列分布^[2,15]。在模拟图像中以光强衰减至二维高斯函数强度的 $1/e$ 位置为芯皮分界

线,芯皮直径比设置为 1:5。根据图像球面化算法^[4]可以对模拟的光纤图像进行形变加载,抬起的楔角为 $0.15 \text{ rad} \approx 8.599^\circ$,图像尺寸为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$,如图 2(a)和图 2(b)所示。为方便对照,

图 2(c)展示了变形前后两幅光纤图在 $x=200$ 处 y 方向灰度值的分布情况。从图 2(c)中可以看出,形变前后图像的灰度值是整体向右平移的,这与楔面化模型是相符的。

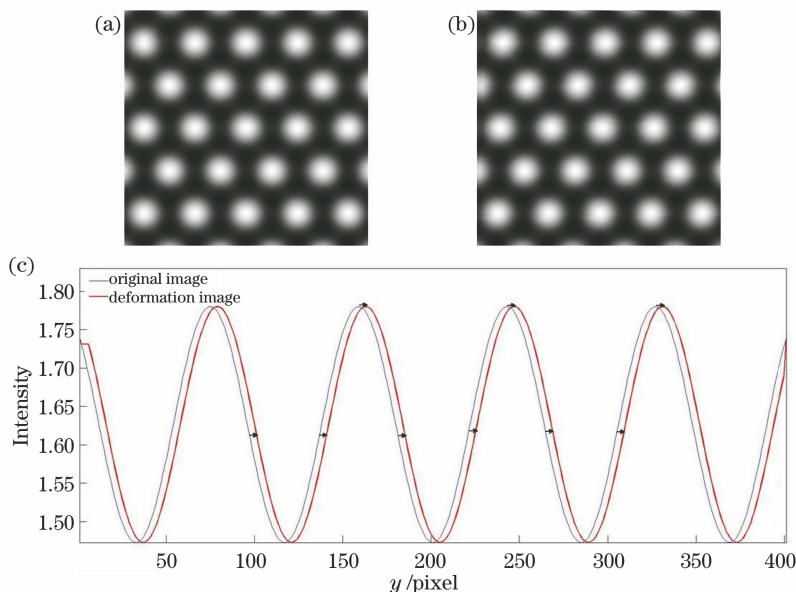


图 2 模拟显微镜下光纤图。(a)初始图像;(b)形变图像;(c)形变前后 $x=200$ 处 y 方向的灰度值分布

Fig. 2 Simulated optical fiber images under microscope. (a) Original image; (b) deformation image; (c) gray value distribution in y direction at $x=200$ before and after deformation

采用本文的 DSCM 算法对变形前后的模拟图像提取离面位移,匹配窗口大小为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$,由于算法本身的边缘效应,数据有效区域

大小为图像中央的 $347 \text{ pixel} \times 347 \text{ pixel}$ 。根据图 1 的楔面模型可得离面位移测量结果的理论与实际值,如图 3(a)和图 3(b)所示。从 x 方向来看,在

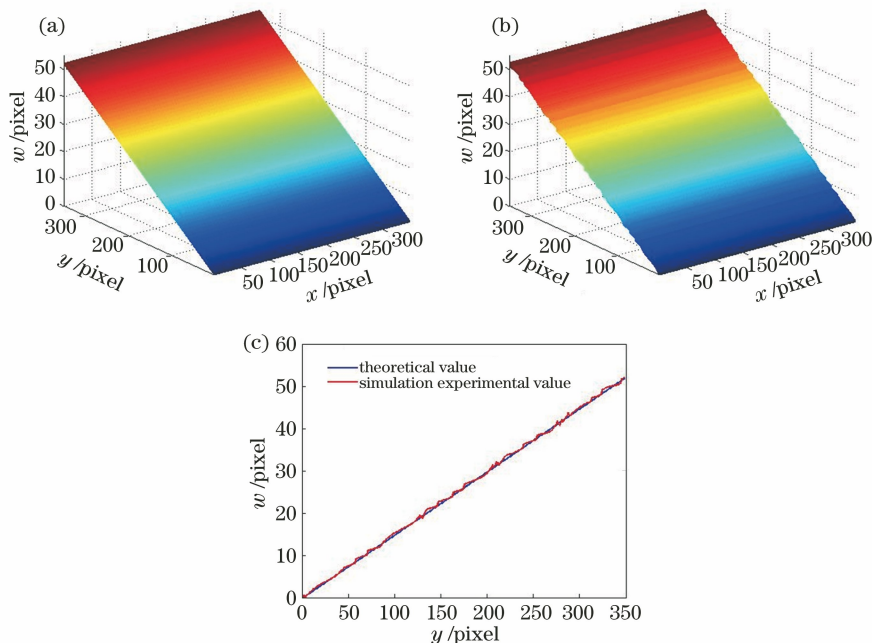


图 3 实验结果。(a)模拟实验理论值;(b)模拟实验结果;(c) $x=174$ 处结果对比

Fig. 3 Experimental results. (a) Theoretical value of simulation experiment; (b) simulation experimental result; (c) comparison of experimental results at $x=174$

$y = 347$ 处的所有测量值均为离面位移的最大值, 均值为 52.39 pixel, 相应的抬起楔角为 $0.1498 \text{ rad} \approx 8.586^\circ$, 与理论值是相符的。图 3(c) 展示了图 3(a) 和图 3(b) 在 y 方向 $x = 174$ pixel 处的结果对比。定义相对误差为 (测量值 - 理论值) / 理论值 $\times 100\%$, 从 y 方向来看, 图 3(c) 中所有点的相对误差均值仅为 0.9%, 证明该方法提取的离面位移是准确的。

4 实验结果与分析

实验装置原理图如图 4(a) 所示。光纤传像材

料被固定在支架上, 旋转支架上的手轮可以使材料倾斜。手轮上标有角度刻度, 下方螺丝的螺距为 $200 \mu\text{m}$, 即手轮每旋转一圈材料的一端要上升或下降 $200 \mu\text{m}$ 的距离, 因此可以根据光纤传像元件和支架的尺寸计算出倾斜的角度。选用的光学放大显微镜放大率为 50 倍, 支架下方有可在 z 轴方向移动的平移台用于显微镜的对焦。针对光纤传像元件尺寸选取了安道尔公司生产的 ZYLA 4.2 Plus 作为实验测试相机, 分辨率可调, 芯片靶面尺寸 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$, 靶面对角线宽度 18.8 mm , 以便于在显微镜下拍摄更大范围图像。

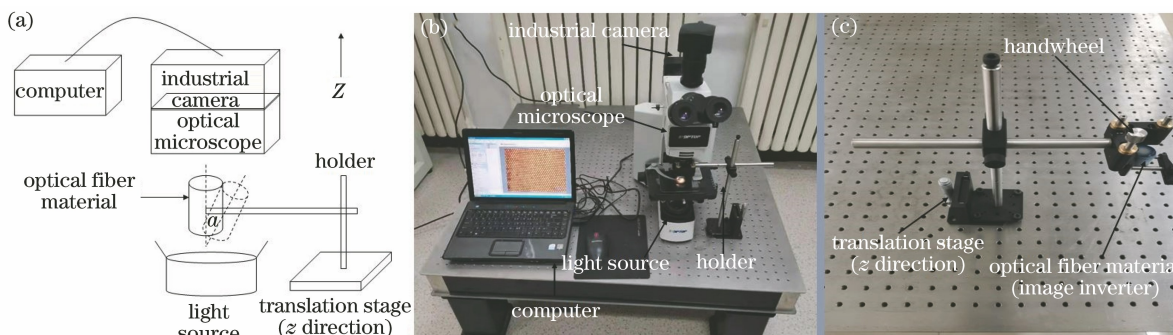


图 4 实验装置。(a) 装置原理; (b) 装置图; (c) 支架与材料

Fig. 4 Experimental setup. (a) Measurement schematic; (b) setup diagram; (c) holder and material

通过旋转手轮加载离面变形, 采用同态滤波法对所有图像进行预处理, 获得变形前后的图像尺寸为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$, $1 \text{ pixel} = 80 \text{ nm}$, 如图 5 所示, 其中图 5(b)~(e) 加载的倾角 α 分别为 6° 、 8° 、 9° 和 10° 。图 5(f) 展示了图 5(a)~(e) 在 $x = 200$ 处 y

方向灰度值的分布情况。从图 5(f) 中可以看出, 随着倾斜角度的增加, 图像向右的平移量是增加的, 这与楔面化模型和模拟实验的结果是一致的。

运用数字图像相关算法测量面内位移, 匹配窗口大小为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$, 实际测量的有效区域

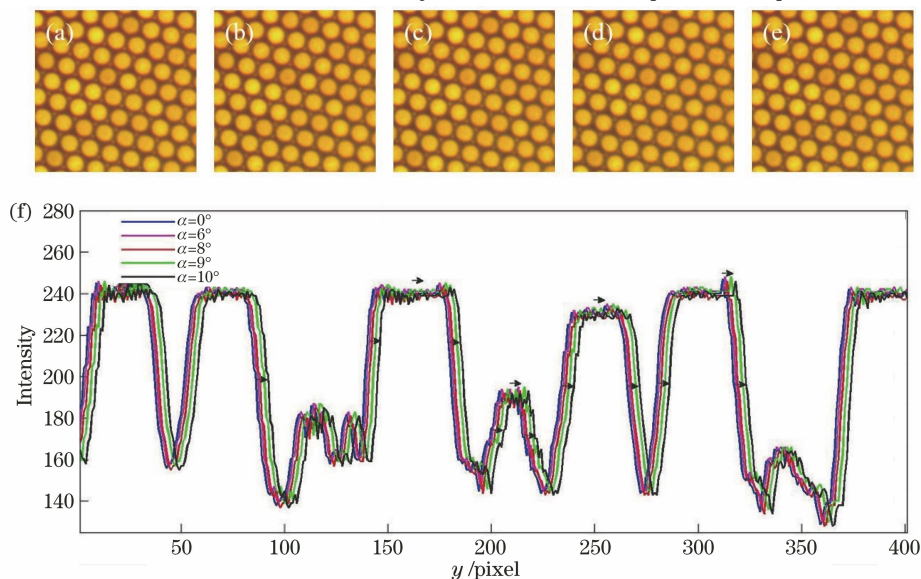


图 5 实验图。(a) 初始图像 ($\alpha = 0^\circ$); (b) $\alpha = 6^\circ$; (c) $\alpha = 8^\circ$; (d) $\alpha = 9^\circ$; (e) $\alpha = 10^\circ$; (f) 在 $x = 200$ 处 y 方向的灰度值分布

Fig. 5 Experimental images. (a) Original image ($\alpha = 0^\circ$); (b) $\alpha = 6^\circ$; (c) $\alpha = 8^\circ$; (d) $\alpha = 9^\circ$; (e) $\alpha = 10^\circ$; (f) gray value distribution in y direction at $x = 200$

为图像中央的 $347 \text{ pixel} \times 347 \text{ pixel}$, 将边缘无效的数据点去掉后对应的最大离面位移值为 2.9 、 3.9 、 4.4 、 $4.9 \mu\text{m}$ 。实验结果如图 6 所示, 每次测量的结果均为斜面, 与倾斜情况相符。在 x 方向上取 $y =$

347 处所有点的均值作为最大离面位移值的测量结果, 四次测量的结果分别为 2.92 、 3.90 、 4.43 、 $4.95 \mu\text{m}$, 与真实值的相对误差均在 1% 以内, 可以证明 x 方向的测量是准确的。

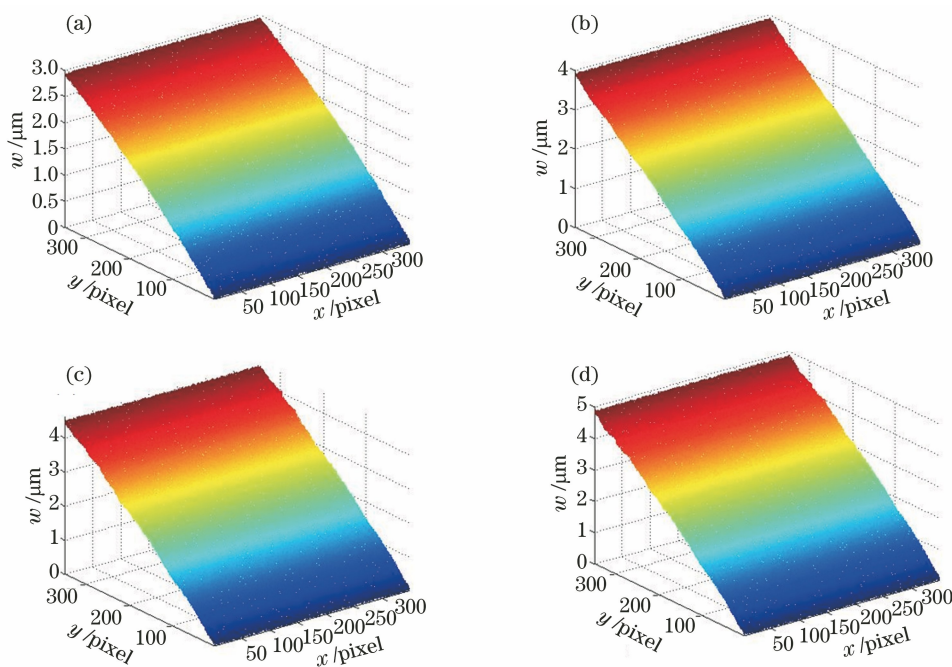


图 6 实验结果。(a) $\alpha=6^\circ$; (b) $\alpha=8^\circ$; (c) $\alpha=9^\circ$; (d) $\alpha=10^\circ$

Fig. 6 Experimental results. (a) $\alpha=6^\circ$; (b) $\alpha=8^\circ$; (c) $\alpha=9^\circ$; (d) $\alpha=10^\circ$

为方便对比, 图 7 为在 y 方向 $x=174 \text{ pixel}$ 处的实验数据和理论值对比图。同时, 表 1 列出了图 7 中 $y=172, 173, 174, 175$ 处四次测量的理论值与实验值结果。根据模拟实验中给出的相对误差的定义, 图 7 展示的发生 $6^\circ, 8^\circ, 9^\circ$ 和 10° 倾斜时的测量值

与理论值的相对误差为 4.2% 、 1.5% 、 1.6% 和 1.5% , 每一点的误差均在 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内, 表 1 中的数据均处于图像中央, 每一点在不同倾斜角度下的误差均在 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以内, 证明本文方法具有较高的测量精度。

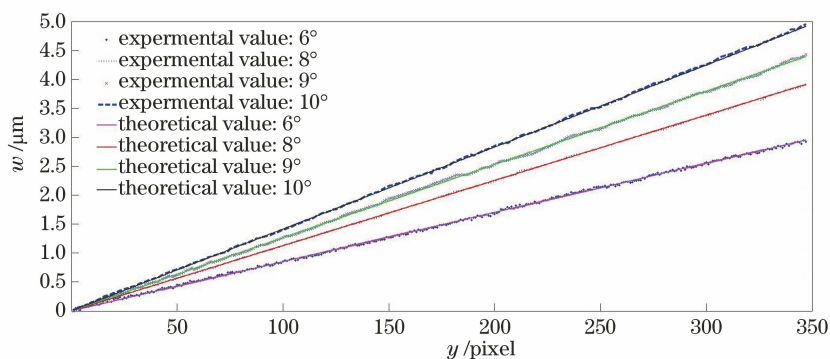


图 7 $x=174$ 处实验结果与理论值对比

Fig. 7 Comparison of experimental results and theoretical values at $x=174$

在实际生产过程中, 光纤传像元件会经受热压、退火等热加工操作, 在温度变化前后材料会发生微纳米尺度形变而影响耦合性能^[16]; 另一方面, 当光纤传像材料的均匀度不同时, 在同种理化作用下不

同位置产生的形变量会有微纳米量级的差异。目前激光点扫描法和探针法是工业生产中光纤传像元件的微纳米尺度形变与形貌检测主要方法。该方法的检测精度可达 1 nm , 重复测试的误差在 $0.02 \mu\text{m}$ 以

内,具有较好的稳定性。然而探针法属于接触式测量法,对光纤传像元件的表面损伤较大;激光点扫描法每次只能返回一个点的相对高度值,需要连续扫描数小时再由软件拼接才能得到一片区域形貌数据,只适合于静态检测。但是本文方法只需要一部工业相机拍摄显微镜下的两幅图像即可完成一片区域的离面位移的测量,对于 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 的

图像只需数十秒即可完成离面位移提取,能够大幅提升检测效率,适合于动态检测,检测精度可达 $1 \mu\text{m}$ 以上,根据本文的实验结果,在 50 倍的光学显微镜下实际测量结果的误差均小于 $0.2 \mu\text{m}$,能够满足光纤传像元件的测试需求^[16],因此该方法已用于光纤传像元件工业生产的形变、均匀度检测与监控过程之中。

表 1 图 7 中 $y=172, 173, 174, 175$ 处实验值与理论值结果

Table 1 Experimental and theoretical values at $y=172, 173, 174, 175$ in Fig. 7

Angle / ($^{\circ}$)	Theoretical values / μm	Experimental values / μm	Relative error / %	Angle / ($^{\circ}$)	Theoretical values / μm	Experimental values / μm	Relative error / %
6($y=172$)	1.462	1.446	1.09	6($y=173$)	1.471	1.441	2.08
6($y=174$)	1.479	1.485	0.41	6($y=175$)	1.488	1.487	0.07
8($y=172$)	1.938	1.948	0.51	8($y=173$)	1.949	1.962	0.66
8($y=174$)	1.961	1.975	0.71	8($y=175$)	1.972	1.987	0.76
9($y=172$)	2.176	2.211	1.61	9($y=173$)	2.189	2.224	1.60
9($y=174$)	2.201	2.235	1.54	9($y=175$)	2.214	2.252	1.71
10($y=172$)	2.434	2.440	0.24	10($y=173$)	2.448	2.451	0.12
10($y=174$)	2.462	2.456	0.24	10($y=175$)	2.476	2.459	0.69

5 结 论

本文建立了图像楔面化模型,并提出了一种基于数字散斑相关理论测量离面位移的新方法。该方法可以通过二维图像的面内位移场直接提取出离面位移场,充分利用了面内位移场携带的离面位移信息,只需要一部工业相机拍摄显微镜下的两幅图像即可完成测量,提取离面位移时无需转换到频域和相位解包操作,适合于动态测量。模拟和实验结果均表明,该方法的测量精度可达 $1 \mu\text{m}$ 以上。目前该方法已被用于光纤传像元件的生产检测与监控中,同时为固体材料的微纳米尺度形变动态测量提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] Huang Y G, Gu Z A, Zhang Y, et al. Nano-scale morphology on micro-channel plate lead silicate glass surface[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(7): 994-999.
黄永刚, 顾真安, 张洋, 等. 微通道板铅硅酸盐玻璃表面纳米尺度的形貌[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(7): 994-999.
- [2] Jiao P, Jia J S, Fu Y, et al. Detection of blemish for fiber-optic imaging elements [J]. Optical Engineering, 2020, 59(5): 053105.
- [3] Pan J S, Sun J N, Han X M, et al. High detection efficiency low noise large format neutron sensitive microchannel plate[J]. Acta Photonica Sinica, 2014,

43(12): 1204003.

潘京生, 孙建宁, 韩晓明, 等. 高探测效率低噪声的大面阵热中子敏感微通道板[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1204003.

- [4] Zhao R, Huang Y G, Wang J W, et al. Image-spherizing-based planeness detecting method for a micro-channel plate [J]. Applied Optics, 2019, 58(3): 554-560.
- [5] Ren J G, Song Z M, Li B, et al. Structure feature and evolution mechanism of pores in different metamorphism and deformation coals [J]. Fuel, 2021, 283: 119292.
- [6] Qian G L, Wu J H, Li C M, et al. Design of 3D locking system for interference fringes of holographic grating [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0405001.
钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 全息光栅干涉条纹三维锁定系统的设计[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0405001.
- [7] Tang Y X, Sun P, Dai Q, et al. New method for surface shape measurement based on Brox optical flow algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712004.
唐钰欣, 孙平, 代晴, 等. 基于 Brox 光流估计的物体表面形测量新方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712004.
- [8] Liu L, Yan P Z, Dan X Z, et al. Microscope autofocus research based on stripe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0818001.
刘璐, 闫佩正, 但西佐, 等. 基于条纹投影的显微镜

- 自动对焦研究 [J]. 光学学报, 2019, 39 (8): 0818001.
- [9] Sun P, Dai Q, Tang Y X, et al. Coordinate calculation for direct shape measurement based on optical flow[J]. Applied Optics, 2020, 59(1): 92-96.
- [10] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213427.
- [11] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0312001.
王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量 [J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0312001.
- [12] Sun Q, Cai C, Zhang S K, et al. Study of localized deformation in geopolymer cemented coal gangue-fly ash backfill based on the digital speckle correlation method [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 321-331.
- [13] Liang Z N, Zhang J X, Qiu L H, et al. Studies on deformation measurement with non-fixed camera using digital image correlation method [J]. Measurement, 2021, 167: 108139.
- [14] Zhao R, Sun P. Deformation-phase measurement by digital speckle correlation method [J]. Applied Physics B, 2016, 122(10): 1-8.
- [15] Shealy D L, Hoffnagle J A. Laser beam shaping profiles and propagation[J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5118-5131.
- [16] Pan G Z, He Y Y, Miao K Z. Specification for microchannel plate: GJB1596—93 [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1993.
潘桂枝, 何业英, 缪坤治. 微通道板规范: GJB1596-93[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1993.