

引用格式: ZHAO Ran, WANG Yanan, LI Miao, et al. Application of Optical Flow Field in Out-of-plane Displacement Measurement for Optical Fiber Material[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1212002

赵冉,王雅楠,李苗,等. 光流场在光纤材料离面位移测量中的应用[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1212002

光流场在光纤材料离面位移测量中的应用

赵冉^{1,2}, 王雅楠³, 李苗³, 刘波^{1,2}, 孙勇^{1,2}, 张洋^{1,2,4}, 贾金升^{1,2,4}

(1 中国建筑材料科学研究总院 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的检测,建立了图像楔面化模型,提出了一种基于光流的离面位移测量技术。实验装置由一部带有工业相机的光学显微镜和一个放置倒像器的支架构成,通过支架的倾斜可对光纤传像材料加载形变。首先,在显微镜下用工业相机采集变形前后的两幅二维图像。接着,用 Brox 光流算法得到两幅图像之间的光流运动场。最后,根据图像楔面化模型,由两幅图像之间的光流场得到两幅图像之间的离面位移场并分析了实验结果。实验结果表明,在光学放大 50 倍的显微镜下多次测量结果的绝对误差均小于 $0.1\ \mu\text{m}$, 相对误差均小于 2%。该方法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,适合动态原位测量。该方法测量误差较小,目前已被应用于光纤传像材料的微纳米尺度形变与均匀度工业监测。

关键词: 离面位移提取; 工业检测; 光流场; 光纤传像材料; 动态监测

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1212002

Application of Optical Flow Field in Out-of-plane Displacement Measurement for Optical Fiber Material

ZHAO Ran^{1,2}, WANG Yanan³, LI Miao³, LIU Bo^{1,2}, SUN Yong^{1,2}, ZHANG Yang^{1,2,4},
JIA Jinsheng^{1,2,4}

(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: In order to monitor the micro-scale deformation of optical fiber material during industrial production, image wedge model is built and then a out-of-plane displacement measurement technique based on optical flow field is proposed. The experimental apparatus consists of an optical microscope with an industrial camera and a holder with a fixed image inverter and the deformation can be loaded by tilting the holder. First, 2D images before and after deformation are captured through microscope with CCD camera. Subsequently, the optical flow field between two images is obtained by Brox optical flow algorithm. Finally, according to the image wedge model, the out-of-plane displacement field between two

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.11902317, 61975099, 52072357), 山东省重大科技创新工程项目(No.2019TSLH0122)

第一作者: 赵冉(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为光纤传像元件微形变检测、图像处理。Email: zhaoran276@sina.com

通讯作者: 贾金升(1971—), 男, 教授级高级工程师, 学士, 主要研究方向为特种玻璃纤维与光电功能材料。Email: zhaoran@cbma.com.cn

收稿日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-07-14

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

images is extracted from the optical flow field and the results of experiment are analysed as well. The experimental results indicate that the absolute errors and the relative errors of the measurement by optical microscope with magnification of $50\times$ are less than $0.1\ \mu\text{m}$ and 1.5% , respectively. The displacement measurement can be completed by two consecutive frames which obtained by only one optical microscope with a industrial camera. The proposed method is appropriate for dynamic deformation monitoring and industrial in-situ detection and it neither need conversion of the images to frequency domain, also do not need phase envelope operation during the out-of-plane displacement extraction process. Due to the low errors, it has been applied to the industrial uniformity and micro-nano-scale deformation monitoring of optical fiber image transmission materials.

Key words: Out-of-plane displacement extraction; Industrial detection; Optical flow field; Optical fiber material; Dynamic monitoring

OCIS Codes: 120.4630; 150.4620; 150.3040; 110.0180; 060.2340

0 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、电子等领域中^[1-2]。然而,该类材料在工业生产过程中会受到热压、退火、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 $0.1\ \text{mm}$ 时其耦合效率会降低 $10\%\sim 20\%$, 图像分辨力也会降低 20% 以上^[3]。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^[4-5]、光学干涉法^[6-8]、投影栅法^[9-11]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,然而检测装置较为复杂,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 $13\ \text{mm}$ 以内,光纤单丝直径小于 $5\ \mu\text{m}$,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。

光流场的概念是由 GIBSON J 等于 20 世纪 50 年代提出^[12-13]。经过科研人员多年的研究,光流算法逐步更新换代,现已成为了一项成熟的运动估计技术。由于二维图像的光流中包含着图像运动的三维信息,因此近年来赵冉、孙平等提出了以二维光流测量固体材料三维形变的方案^[14-15],均获得了较好的实验结果。代晴等利用光流能够精确测量面内位移的属性实现了光流的面形测量^[16]。类智方等分析了经典的 HS 光流算法和 LK 光流算法在条纹处理中的精度、分辨率和测量范围^[17]。本文针对光纤传像材料的原位形变测量需求,提出了一种基于 Brox 光流算法的微纳尺度离面位移测量方法,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,充分利用了面内位移场携带的离面位移信息,无需转换到频域和相位解包操作。由于引入了时间因子,该方法更适合于动态形变原位监测,能够满足光纤材料在实际生产的形变检测需求,并为其它固体材料的形变检测提供新的思路。

1 测量原理

1.1 Brox 光流算法

设在 t 时刻像素点 (x, y) 处灰度值为 $I(x, y, t)$, 在 $(t+\Delta t)$ 时刻该点运动到新的位置 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$, 灰度值记为 $I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ 。将 $I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ 用泰勒公式展开并忽略二阶以上的高次项,有

$$I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} \Delta t \quad (1)$$

式中, Δx 和 Δy 分别为面内位移的水平分量和垂直分量。当两幅图像之间的运动非常小时,它们满足图像一致性假设,即 $I(x, y, t) = I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$, 可以得到

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x} u + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y} v + \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中,未知量 $u(x,y)$ 和 $v(x,y)$ 为两幅图像之间的运动场,它们与面内位移的关系为 $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, $v = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ 。

式(2)即为光流基本等式^[12]。由于只有一个方程而未知量有两个,Brox光流算法通过引入亮度/灰度恒定假设 $I(x,y,t) = I(x+u,y+v,t+1)$,梯度恒定假设 $\nabla I(x,y,t) = \nabla I(x+u,y+v,t+1)$ 以及平滑假设

$\min \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\}$ 三个约束条件来构建能量函数,能够让图像上某点的能量泛函数取

最小值的 (u,v) 即为该点的光流

$$\min \left[\int_{\Omega} \Psi \left(|I(\mathbf{r} + \mathbf{k}) - I(\mathbf{r})|^2 + \gamma |\nabla I(\mathbf{r} + \mathbf{k}) - \nabla I(\mathbf{r})|^2 \right) d\mathbf{r} + \alpha \int_{\Omega} \Psi \left(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2 \right) d\mathbf{r} \right] \quad (3)$$

式中, $\mathbf{r} = (x, y, t)^T$, $\mathbf{k} = (u, v, 1)^T$; γ 代表梯度恒定假设在积分中所占的权重;平滑因子 α 代表平滑假设的权重,即光流的平滑程度, α 值越高所求得的光流越平滑,但是过于平滑的光流会增加计算的误差。根据 Brox 与多位研究人员的实验测试结果,权重系数 γ 和平滑因子 α , 通常取 5 和 30 时可以保障测量结果的准确性和平滑性。

另一方面,式(3)中亮度/灰度恒定假设的积分不能为零,因此需要引入函数 $\Psi(r^2) = \sqrt{r^2 + \epsilon^2}$, ϵ 为无穷小量,通常取 0.001 即可满足需求。 ∇ 算符只计算 x 与 y 方向的偏导数,运用变分法求解该式,可得欧拉-拉格朗日方程

$$\begin{cases} \Psi \left[I_t^2 + \gamma (I_{xt}^2 + I_{yt}^2) \right] \cdot \left[I_x I_t + \gamma (I_{xx} I_{xt} + I_{xy} I_{yt}) \right] - \alpha \operatorname{div} \left[\Psi \left(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2 \right) \nabla u \right] = 0 \\ \Psi \left[I_t^2 + \gamma (I_{xt}^2 + I_{yt}^2) \right] \cdot \left[I_y I_t + \gamma (I_{yy} I_{yt} + I_{xy} I_{xt}) \right] - \alpha \operatorname{div} \left[\Psi \left(|\nabla u|^2 + |\nabla v|^2 \right) \nabla v \right] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, div 为散度算符, $I_x = \frac{\partial I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial x}$, $I_y = \frac{\partial I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial y}$, $I_t = I(\mathbf{r} + \mathbf{k}) - I(\mathbf{r})$, $I_{xx} = \frac{\partial^2 I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial x^2}$, $I_{xy} = \frac{\partial^2 I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial x \partial y}$, $I_{yy} = \frac{\partial^2 I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial y^2}$, $I_{xt} = \frac{\partial I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial x} - \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial x}$, $I_{yt} = \frac{\partial I(\mathbf{r} + \mathbf{k})}{\partial y} - \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial y}$ 。

采用迭代法解欧拉-拉格朗日方程,式(4)可被表述为

$$\begin{cases} \Psi' \left[(I_t^{k+1})^2 \right] I_x^k I_t^{k+1} + \gamma \Psi' \left[(I_{xt}^{k+1})^2 + (I_{yt}^{k+1})^2 \right] (I_{xx}^k I_{xt}^{k+1} + I_{xy}^k I_{yt}^{k+1}) - \\ \alpha \operatorname{div} \left\{ \Psi' \left[(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2 \right] (u_x^{k+1} \mathbf{e}_x + u_y^{k+1} \mathbf{e}_y) \right\} = 0 \\ \Psi' \left[(I_t^{k+1})^2 \right] I_y^k I_t^{k+1} + \gamma \Psi' \left[(I_{xt}^{k+1})^2 + (I_{yt}^{k+1})^2 \right] (I_{xy}^k I_{xt}^{k+1} + I_{yy}^k I_{yt}^{k+1}) - \\ \alpha \operatorname{div} \left\{ \Psi' \left[(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2 \right] (u_x^{k+1} \mathbf{e}_x + u_y^{k+1} \mathbf{e}_y) \right\} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{e}_x 和 \mathbf{e}_y 为水平与竖直方向矢量,上标 k 和 $k+1$ 代表第 k 次和 $k+1$ 次迭代结果, $k=0,1,2,\dots$ 。为了移除含有 I^{k+1} 的非线性项,将 $I_t^{k+1}, I_{xt}^{k+1}, I_{yt}^{k+1}$ 做一阶泰勒级数展开

$$\begin{cases} I_t^{k+1} \approx I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k \\ I_{xt}^{k+1} \approx I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k \\ I_{yt}^{k+1} \approx I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k \end{cases} \quad (6)$$

式中, du^k 和 dv^k 为第 $k+1$ 次迭代时 u 和 v 的增量: $u^{k+1} = u^k + du^k$, $v^{k+1} = v^k + dv^k$ 。将式(6)带入式(5)可得

$$\begin{cases} \frac{I_x^k (I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)}{2 \sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xx}^k (I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k) + I_{xy}^k (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} - \\ \frac{\alpha}{2} \operatorname{div} \left[\frac{u_x^{k+1} \mathbf{e}_x + u_y^{k+1} \mathbf{e}_y}{\sqrt{(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2}} \right] = 0 \\ \frac{I_y^k (I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)}{2 \sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xy}^k (I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k) + I_{yy}^k (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} - \\ \frac{\alpha}{2} \operatorname{div} \left[\frac{v_x^{k+1} \mathbf{e}_x + v_y^{k+1} \mathbf{e}_y}{\sqrt{(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2}} \right] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中前两项为数据约束项,第三项为平滑约束项。令

$$\left\{ \begin{aligned} a_{11} &= \frac{I_x^k I_x^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xx}^k I_{xx}^k + I_{xy}^k I_{xy}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \\ a_{12} &= \frac{I_x^k I_y^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xx}^k I_{xx}^k + I_{xy}^k I_{xy}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \\ b_1 &= \frac{I_x^k I_t^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xx}^k I_{xx}^k + I_{xy}^k I_{xy}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \\ a_{21} &= \frac{I_x^k I_y^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xx}^k I_{xy}^k + I_{xy}^k I_{yy}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \\ a_{22} &= \frac{I_y^k I_y^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xy}^k I_{xy}^k + I_{yy}^k I_{yy}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \\ b_2 &= \frac{I_y^k I_t^k}{2\sqrt{(I_t^k + I_x^k du^k + I_y^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} + \frac{\gamma}{2} \frac{I_{xy}^k I_{xx}^k + I_{xy}^k I_{yt}^k}{\sqrt{(I_{xt}^k + I_{xx}^k du^k + I_{xy}^k dv^k)^2 + (I_{yt}^k + I_{xy}^k du^k + I_{yy}^k dv^k)^2 + \epsilon^2}} \end{aligned} \right.$$

式(7)中的数据约束项可以写为

$$\begin{cases} a_{11} du^k + a_{12} dv^k = -b_1 \\ a_{21} du^k + a_{22} dv^k = -b_2 \end{cases} \quad (8)$$

根据初始的 u, v, du, dv , 只要解出了第 k 次迭代的增量 du^k 和 dv^k 即可解出迭代结果 u^{k+1} 和 v^{k+1} 。采用逐次超松弛(Successive Over Relaxation, SOR)迭代法来解式(8), 需要对 b_1, b_2, a_{11}, a_{22} 做形式变换才能加入平滑

约束项, 令 $\varphi(x, y) = \frac{\alpha}{2\sqrt{(u_x^{k+1})^2 + (u_y^{k+1})^2 + (v_x^{k+1})^2 + (v_y^{k+1})^2}}$, 则有

$$\left\{ \begin{aligned} b_1' &= b_1 + \{ [u^k(x, y) - u^k(x-1, y)]\varphi(x-1, y) - [u^k(x+1, y) - u^k(x, y)]\varphi(x, y) + \\ &\quad [u^k(x, y) - u^k(x, y-1)]\varphi(x, y-1) - [u^k(x, y+1) - u^k(x, y)]\varphi(x, y) \} \\ b_2' &= b_2 + \{ [v^k(x, y) - v^k(x-1, y)]\varphi(x-1, y) - [v^k(x+1, y) - v^k(x, y)]\varphi(x, y) + \\ &\quad [v^k(x, y) - v^k(x, y-1)]\varphi(x, y-1) - [v^k(x, y+1) - v^k(x, y)]\varphi(x, y) \} \\ a_{11}' &= a_{11} + \varphi(x-1, y) + 2\varphi(x, y) + \varphi(x, y-1) \\ a_{22}' &= a_{22} + \varphi(x-1, y) + 2\varphi(x, y) + \varphi(x, y-1) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

根据式(9), 利用SOR迭代法可以得到最终的光流迭代增量表达式

$$\left\{ \begin{aligned} du^{k+1} &= (1-\omega)du^k + \frac{\omega}{a_{11}'} \{ b_1' - a_{12}dv^k + [du^k(x-1, y)\varphi(x-1, y) + du^k(x+1, y)\varphi(x, y) + \\ &\quad du^k(x, y-1)\varphi(x, y-1) + du^k(x, y+1)\varphi(x, y+1)] \} \\ dv^{k+1} &= (1-\omega)dv^k + \frac{\omega}{a_{22}'} \{ b_2' - a_{21}du^k + [dv^k(x-1, y)\varphi(x-1, y) + dv^k(x+1, y)\varphi(x, y) + \\ &\quad dv^k(x, y-1)\varphi(x, y-1) + dv^k(x, y+1)\varphi(x, y+1)] \} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中, ω 为松弛因子, 当两次迭代的差值接近于0时停止迭代, 即可得到光流的计算结果。

1.2 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 θ , 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, 采用Brox光流算法可以直接得到形变前后的面内位移 d 。根据图1中的几何关系, 可以由面内位移 d 直接提取离面位移 w

$$\begin{cases} d = R(1 - \cos \theta) \\ \theta = \cos^{-1} \frac{R - d}{R} \\ w = R \sin \theta \end{cases} \quad (11)$$

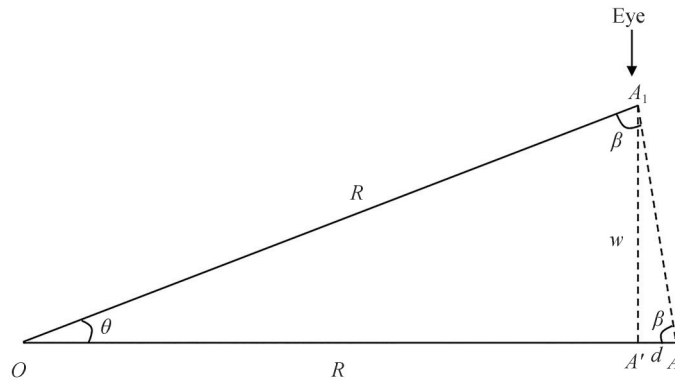


图1 楔面化模型
Fig. 1 Wedge model

2 模拟结果及分析

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^[2,18]。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,芯皮直径比被设置为1:5。根据图像球面化算法^[3]可以对模拟的光纤图像进行形变加载,抬起的楔角为0.15 rad \approx 8.599°,图像尺寸为400 pixels \times 400 pixels,如图2(a)和(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

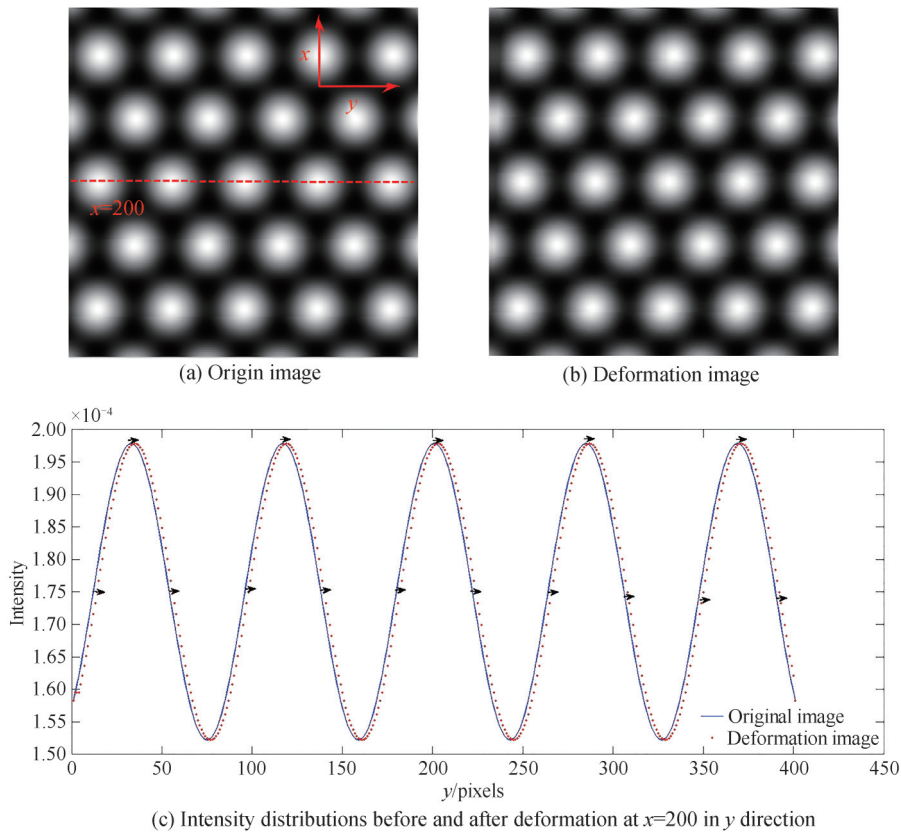


图2 模拟显微镜下光纤图
Fig. 2 Simulated optical-fiber microscopic image

前后图像的灰度值整体向右平移,与楔面化模型相符。

采用Brox光流算法对变形前后的模拟图像提取离面位移,由于光流算法的边缘平滑效应,数据有效区域为图像中央的 $300\text{ pixels}\times 300\text{ pixels}$ 。根据图1的楔面模型可得离面位移测量结果的理论值与实际值,如图3(a)和(b)所示。从图3(b)的 x 方向来看,在 $y=300$ 处所有测量值均为离面位移的最大值,均值为 44.83 pixels ,因此可以计算抬起楔角为 $0.1494\text{ rad}\approx 8.499^\circ$,与理论值相符。为了进一步验证测量精度,采用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)算法^[19]对面内位移进行计算,获得的离面位移结果如图3(c)所示。图3(d)展示了图3(a)~(c)在 y 方向 $x=150\text{ pixel}$ 处的结果对比。可以看出,在 $y\in[130, 300]$ 范围内光流法和DIC法均能获得较好的结果,但是在 $y\in[1, 130]$ 的范围内(面内位移量小于3个像素)DIC法测量结果出现小幅波动,误差增加,而光流算法的测量结果能够在平滑因子 α 的影响下保持平滑。因此,与DIC算法相比,光流算法更适用于测量小位移形变,这与图像一致性假设相符。定义绝对误差为测量值与理论值的差值,相对误差为绝对误差与理论值之比 $\times 100\%$,从 y 方向来看,图3(d)中DIC算法的相对误差为 2.3% 而光流算法的相对误差均值仅为 1.5% ,证明该方法提取的离面位移是准确的。另一方面,模拟实验中光流算法和数字图像相关算法的运行时间分别为 19.32 s 和 15.47 s (运行环境为Matlab软件, Intel i5-7400 CPU @3.0 GHz),说明该算法在运行时间方面有较好的优势。

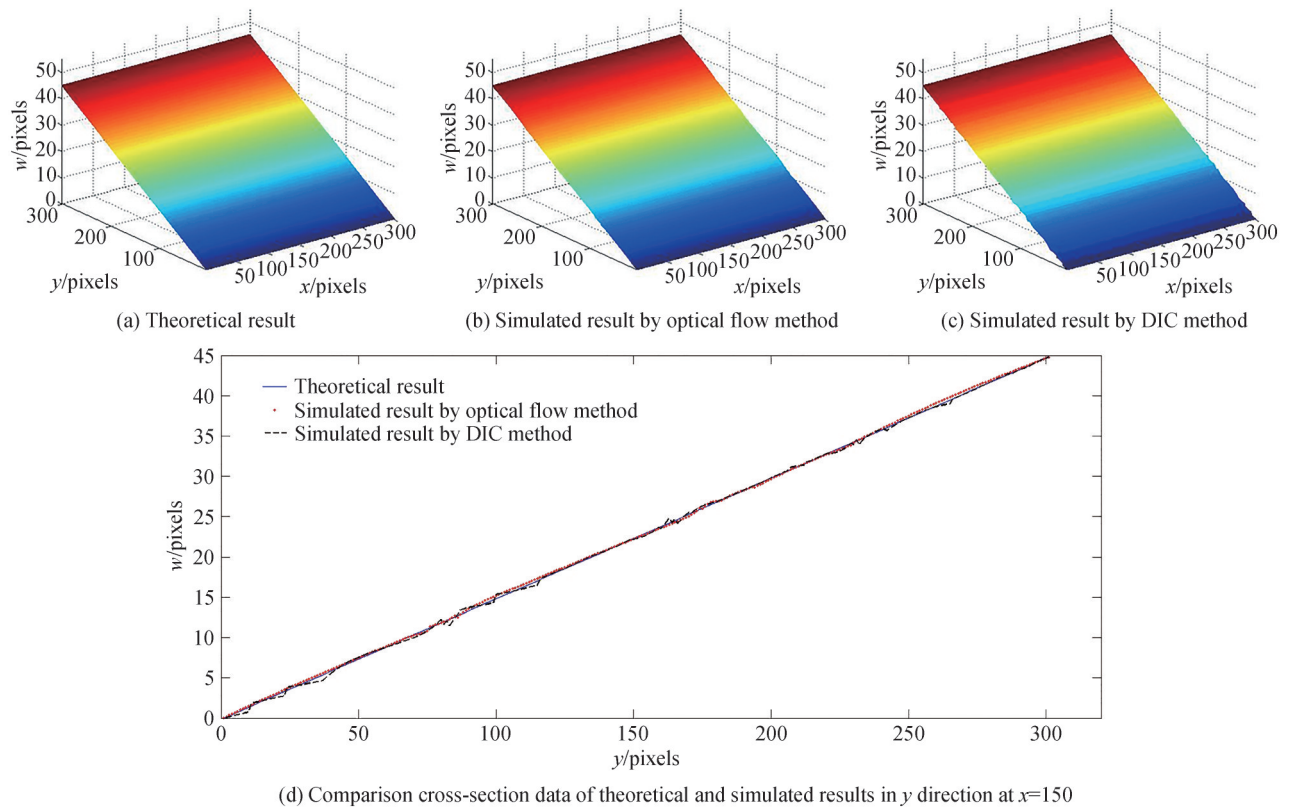


图3 模拟结果

Fig. 3 Simulation results

3 实验结果及分析

实验装置原理如图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,螺丝的螺距为 $200\text{ }\mu\text{m}$,即手轮每旋转一圈材料的一端要上升或下降 $200\text{ }\mu\text{m}$ 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,如图4(b)所示。设螺丝的伸长量为 s ,选取的光纤传像元件直径 $D_1=20\text{ mm}$,螺丝与光纤传像元件之间的支架长度 $D_2=5\text{ mm}$,加载的倾角 θ 与光纤传像元件和支架的尺寸之间的关系为 $\sin\theta=s/(D_1+D_2)$ 。选用的光学放大显微镜放大率为50倍,支架底座有可在 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,420万像素,最大分辨率为 $2048\text{ pixels}\times 2048\text{ pixels}$,全分辨率采集帧率可达100 fps,芯片靶面尺寸为 $13.3\text{ mm}\times 13.3\text{ mm}$,靶面对角线宽度为 18.8 mm ,像元尺寸为 $6.5\text{ }\mu\text{m}\times 6.5\text{ }\mu\text{m}$,以便于在显微镜下拍摄更大范围图像。实验装置如图4(c)和(d)所示。

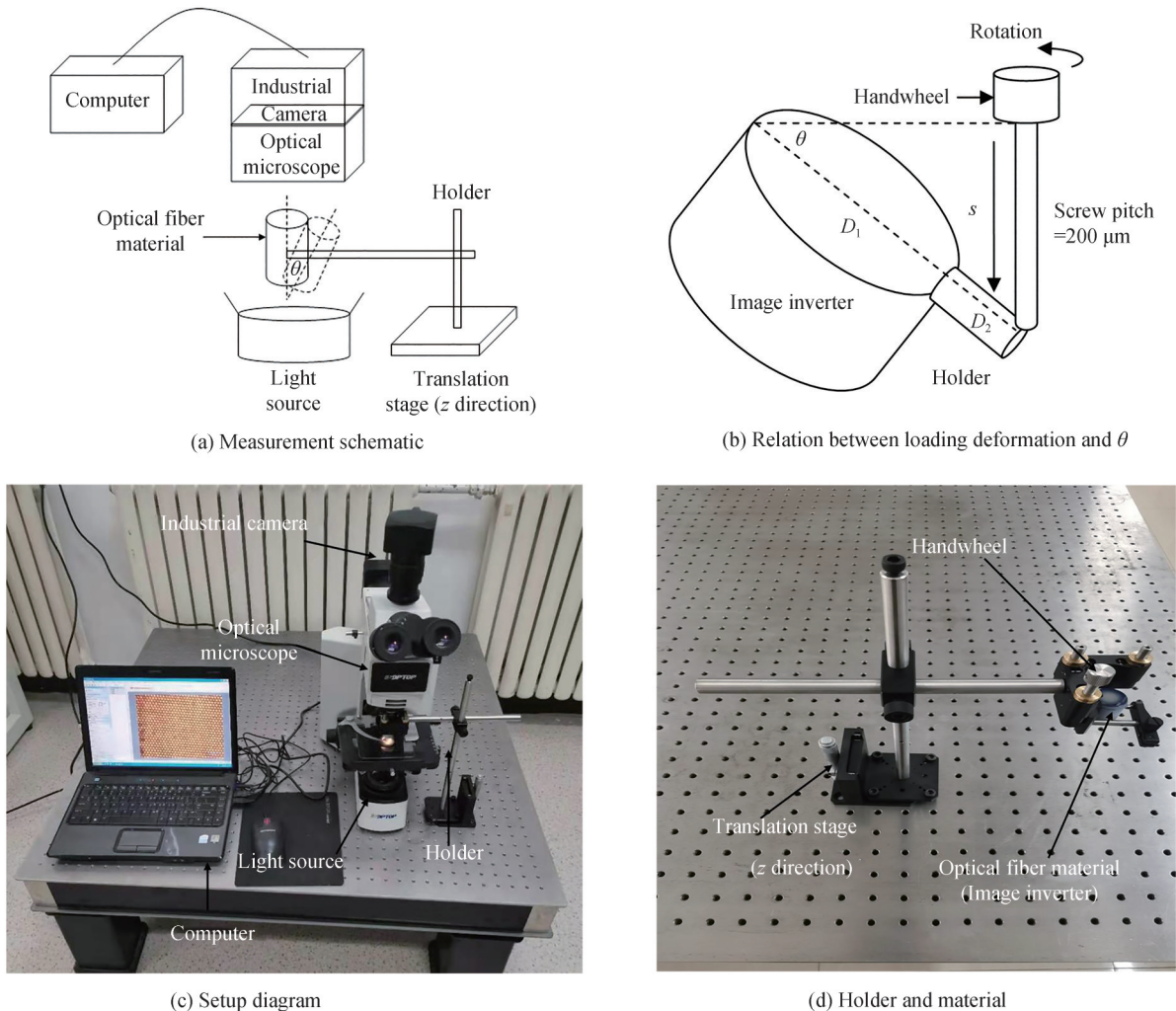
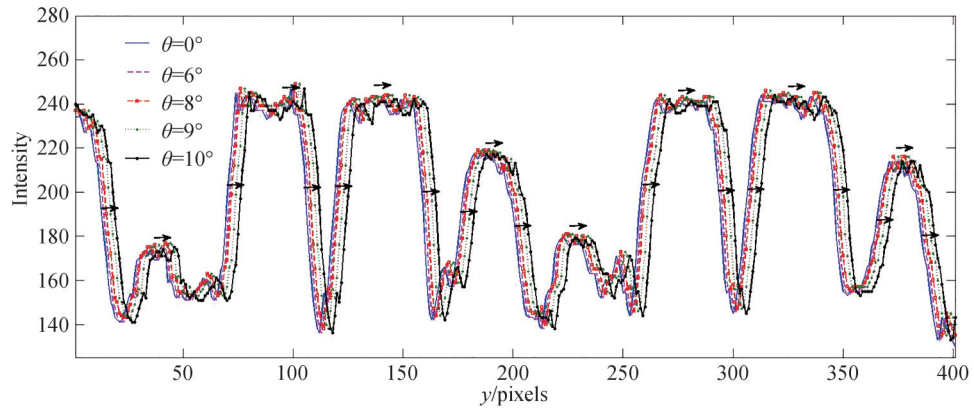
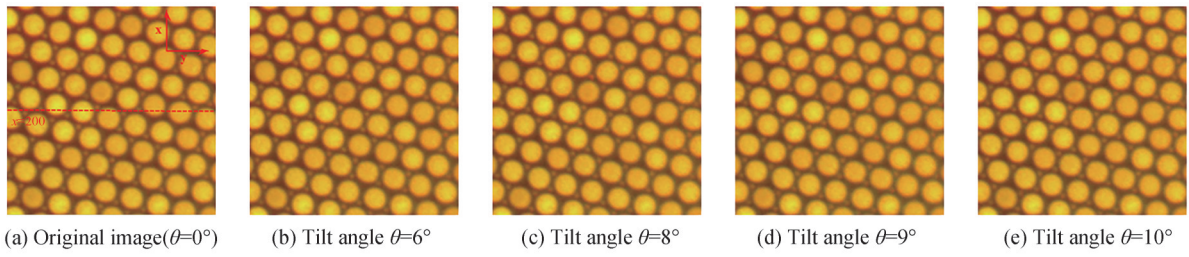


图4 实验装置与原理图
Fig. 4 Experimental setup and schematic diagram

通过旋转手轮加载离面形变,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 $400\text{ pixels}\times 400\text{ pixels}$, $1\text{ pixel}=80\text{ nm}$,如图5所示,其中图5(b)~(e)加载的倾角 θ 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,图像向右的平移量增加,与楔面化模型和模拟实验结果一致。

用Brox光流算法测量面内位移,实际测量的有效区域为图像中央的 $300\text{ pixels}\times 300\text{ pixels}$,将边缘无效的数据点去掉后对应的最大离面位移值为 $2.52\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.37\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.80\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.23\text{ }\mu\text{m}$ 。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 $y=300$ 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 $2.51\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.36\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.81\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.22\text{ }\mu\text{m}$,与真实值的相对误差均在0.5%以内,可以证明 x 方向的测量是准确的。

为方便对比,图7展示了在 $x=150$ 处的 y 方向实验数据和理论值对比。同时,表1列出了图7中 $y=149, 150, 151, 152$ 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展示了发生 6° 、 8° 、 9° 和 10° 倾斜时的测量值与理论值的相对误差为1.65%、1.70%、0.55%和0.62%,每一点的绝对误差均在 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以内,表1中的数据均处于图7的中央位置,每一点在不同倾斜角度下的绝对误差均在 $\pm 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 以内,可以证明本方法具有较高的测量精度。



(f) Intensity distributions of (a)-(e) at $x=200$ in y direction

图5 显微镜拍摄的实验图

Fig. 5 Experimental images captured by microscope

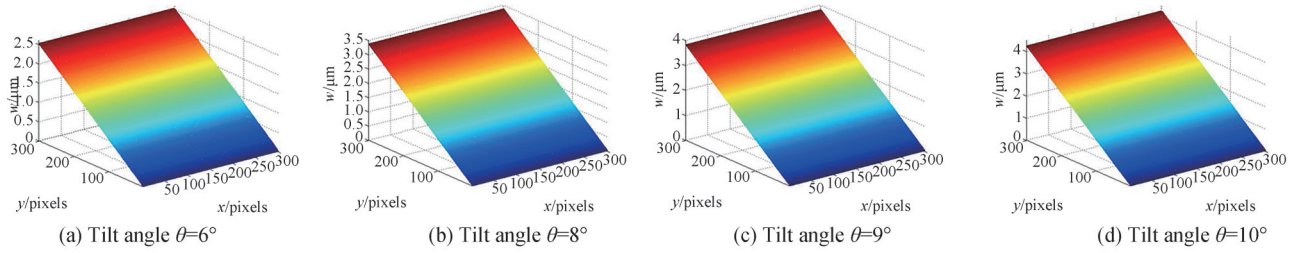


图6 应用实验结果

Fig. 6 Results of application experiment

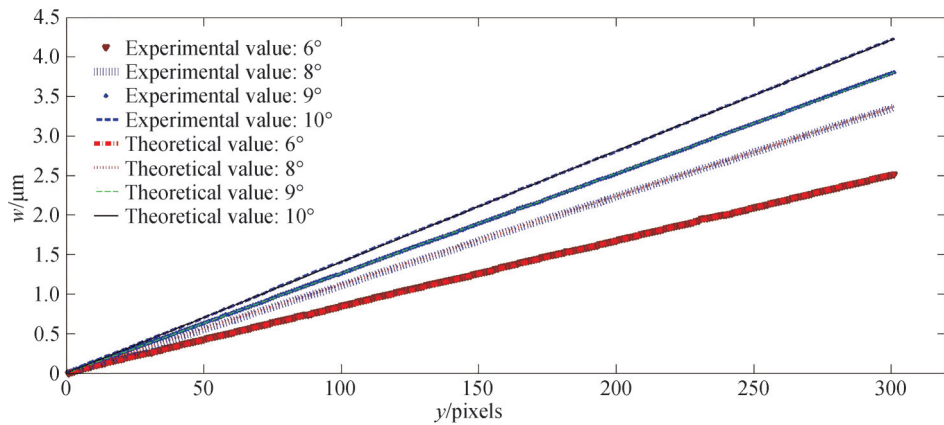


图7 $x=150$ 处实验结果与理论值对比

Fig. 7 Comparison cross-section data in y direction at $x=150$

表1 图7中 $y=149:152$ 处的实验值与理论值
Table 1 Experimental and theoretical values of Fig. 7 at $y=149:152$

Angle/(°)	Theoretical value/ μm	Experimental values/ μm	Relative error	Theoretical value/ μm	Experimental values/ μm	Relative error
6	1.247	1.251	0.32%	1.256	1.258	0.15%
6	1.264	1.266	0.16%	1.273	1.274	0.08%
8	1.668	1.662	0.36%	1.679	1.673	0.36%
8	1.691	1.685	0.35%	1.702	1.696	0.35%
9	1.881	1.879	0.11%	1.894	1.892	0.11%
9	1.906	1.904	0.10%	1.919	1.917	0.10%
10	2.094	2.097	0.14%	2.108	2.110	0.09%
10	2.122	2.125	0.14%	2.136	2.139	0.14%

为了便于定标,采用光流法和DIC法对倾斜小于 5° 的形变做了25次补充测量,测量有效区域为 $300\text{ pixels} \times 300\text{ pixels}$,角度的抽样间隔为 0.2° ,所有测量结果的最大离面位移值如图8所示,平均相对误差分别为 0.38% 和 0.43% 。可以看出,即使在倾斜角度较小时光流算法的结果依然能够保持一定的平滑性与稳定性。在实际生产过程中,光纤传像元件在经受热压、退火等热加工操作数小时甚至数天后仍会发生微纳米尺度形变而影响耦合性能;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,尤其是在温度变化前后该形变差异会导致材料表面粗糙度与平面度超标,使其无法满足使用需求^[3,20]。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的主要方法。这两类方法的检测分辨率均可达 1 nm 以下,重复测试的误差均在 $0.02\ \mu\text{m}$ 以内,具有较好的稳定性。然而探针法属于接触式测量,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。由于本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 $400\text{ pixels} \times 400\text{ pixels}$ 的图像只需十几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,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 $0.1\ \mu\text{m}$,能够满足光纤传像元件的测试需求^[20],因此该方法已用于光纤传像元件工业生产的形变与均匀度检测与监控过程之中。

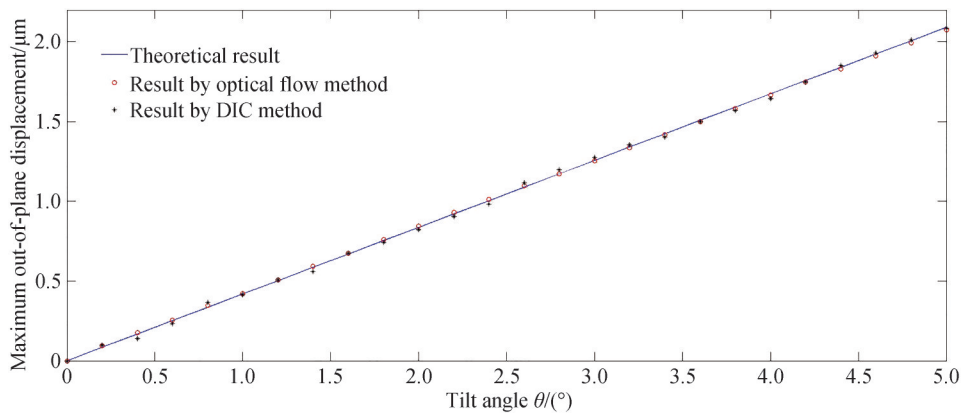


图8 不同倾斜角度下最大离面位移测量结果
Fig. 8 Results of maximum out-of-plane displacement for different tilt angles

4 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,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,适合于原位动态测量。实验结果证明:在50倍的纯光学放大显微镜下离面位移测量绝对误差为 $0.1\ \mu\text{m}$,相对误差均小于 2% 。目前该方法已被用于光纤传像元器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 Yonggang, GU Zhenan, ZHANG Yang, 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 Peng, JIA Jinsheng, YANG Fu, et al. Detection of blemish for fiber-optic imaging elements[J]. Optical Engineering, 2020, 59(5):053105.
- [3] ZHAO Ran, HUANG Yonggang, WANG Jiuwang, et al. Image spherizing based planeness detecting method for MCP[J]. Applied Optics, 2019, 58(3):554-560.
- [4] REN Jianguang, SONG Zhimin, LI Bing, et al. Structure feature and evolution mechanism of pores in different metamorphism and deformation coals[C]. Fuel, 2021, 283:119292.
- [5] SARKA M, TOMOHIRO A. Effect of native oxide on the crystal orientation contrast in SEM micrographs obtained at hundreds, tens and units of eV[J]. Ultramicroscopy, 2021, 220: 113114.
- [6] WANG Yunzhi XIE Fang, CHEN Longhui, et al. Absolute distance measurement system based on the selfmixing interferometry of a three-wavelength optical fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9):0912004.
王韵致,谢芳,陈龙辉,等.基于光纤三波长激光自混合干涉的绝对距离测量系统[J].光子学报,2019,48(9):0912004.
- [7] LESLIE J, SANTIAGO C, JORGE R, et al. Extending low-coherence interferometry dynamic range using heterodyne detection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 131:106106.
- [8] AZMI A, ABDULLAH A, NOOR M, et al. Dynamic bending and rotation sensing based on high coherence interferometry in multicore fiber[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 135:106716.
- [9] WAN Xinjun, LV Song, SONG Ke, et al. A specular stepped surface profile measurement system based on fringe reflection principle with micrometer-level height resolution[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4):0412001.
万新军,吕宋,宋可,等.一种微米级高度台阶镜面条纹反射的三维测量系统[J].光子学报,2020,49(4):0412001.
- [10] MACHINENI R, SPOORTHI G, VENGALA K, et al. End-to-end deep learning-based fringe projection framework for 3D profiling of objects[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2020, 199: 103023.
- [11] LIU Yanzhao, FU Yanjun, CAI Xiaoqi, et al. A novel high dynamic range 3D measurement method based on adaptive fringe projection technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128:106004.
- [12] GIBSON J. The perception of the visual world[M]. Oxford: Houghton Mifflin Press,1950.
- [13] SUN Ping, FAN Chao, DAI Qing, et al. A L-K local optical-flow-based coordinate profilometry by using the capture line in space[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9):0912003.
孙平,范超,代晴,等.基于L-K局域光流的空间视线坐标法面形测量技术[J].光子学报,2020,49(9):0912003.
- [14] ZHAO Ran, SUN Ping. Deformation-phase measurement by optical flow method[J]. Optics Communications, 2016, 371: 144-149.
- [15] SUN Ping, DAI Qing, TANG Yuxin, et al. Coordinate calculation for direct shape measurement based on optical flow[J]. Applied Optics, 2020, 59(1): 92-96.
- [16] DAI Qing, SUN Ping, LEI Zhifang, et al. Surface shape measurement technique using fringe-based optical flow[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11):1112004.
代晴,孙平,类智方,等.基于条纹光流的物体面形测量技术[J].光学学报,2019,39(11):1112004.
- [17] LEI Zhifang, SUN Ping, DAI Qing. Discussion on resolution and measuring range of typical optical flow algorithm in fringe displacement measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3):0320001.
类智方,孙平,代晴.典型光流算法在条纹位移测量中的分辨力和测量范围[J].光学学报,2020,40(3):0320001.
- [18] SHEALY D, HOFFNAGLE J. Laser beam shaping profiles and propagation[J]. Applied Optics. 2006, 45(21): 5118-5131.
- [19] LIANG Zhenning, ZHANG Jinxiu, QIU Longhui, et al. Studies on deformation measurement with non-fixed camera using digital image correlation method[J]. Measurement, 2021, 167:108139.
- [20] PAN Guizhi, HE Yeying, MIAO Kunzhi, et al. GJB1596-93, Specification for microchannel plate[S]. Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1993.
潘桂枝,何业英,缪坤治,等. GJB1596-93,微通道板规范[S].国防科学技术工业委员会,1993.