中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

全息散斑与事件视觉融合的三维位移测量

屈颖 张博洋 刘吉 武锦辉 姬翔峰 李凯圆

Three-dimensional displacement measurement via fusion of holographic speckle interferometry and event-based vision

QU Ying, ZHANG Bo-yang, LIU Ji, WU Jin-hui, JI Xiang-feng, LI Kai-yuan

引用本文:
屈颖, 张博洋, 刘吉, 等. 全息散斑与事件视觉融合的三维位移测量[J]. 中国光学, 2026, 19(6): 1−12. doi: 10.3724/CO.2026−0094
QU Ying, ZHANG Bo-yang, LIU Ji, *et al*. Three-dimensional displacement measurement via fusion of holographic speckle interferometry and event-based vision[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-12. doi: 10.3724/CO.2026-0094

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026−0094

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于曼彻斯特编码的图像式角位移测量系统

Image−based angular displacement measurement system based on Manchester coding

中国光学（中英文）. 2025, 18(4): 830 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0178

面向微光学元件表面形貌测量的涡旋相移数字全息技术

Vortex phase−shifting digital holography for micro−optical element surface topography measurment

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 852 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0180

基于插值超分辨的双目三维重建方法

Binocular 3D reconstruction method based on interpolation super−resolution

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 862 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0214

激光外差干涉皮米级平动测量技术研究

Laser heterodyne interferometry for picometer−level displacement measurement

中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 535 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0192

基于转动式二维激光扫描仪和多传感器的三维重建方法

3D reconstruction method based on a rotating 2D laser scanner and multi−sensor

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 663 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0159

彩色投影仪光强自适应高动态范围三维测量方法

Color projector light intensity adaptive high dynamic range 3D measurement method

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1219 https://doi.org/10.37188/CO.EN−2024−0038

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-12

全息散斑与事件视觉融合的三维位移测量

屈 颖[1,2], 张博洋[1,2*], 刘 吉[1,2], 武锦辉[1,3], 姬翔峰[1,2], 李凯圆[1,2]
（1. 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051）

摘要: 传统三维数字散斑干涉通常依赖多光束、多波长或多相机同步结构获取三维位移矢量, 存在光路复杂、维度耦合、动态过程同步困难等问题。针对上述限制, 本文提出一种数字全息散斑干涉与事件视觉融合的三维动态位移场测量方法。首先利用工业相机结合空间相移技术记录全息干涉图样, 实现物体表面法向微变形的高精度相位重建。然后引入事件相机异步感知表面散斑亮度变化获取面内位移场, 结合事件流进行时序累积与块匹配算法进行位移求解。最后将高灵敏度离面相位信息与面内位移数据融合, 实现完整三维位移场的重构。本文构建的数字全息散斑干涉-事件视觉融合系统能够稳定实现圆形薄板三维位移场测量。其中离面位移测量 RMSE 最低达到 0.47 μm, 面内位移测量 RMSE 最低达到 0.18 μm, 三维融合位移场 $RMSE_{3D}$ 最低达到 0.13 μm。该方法基本满足三维微小变形测量中高精度、稳定性好及抗干扰能力较强等要求。

关 键 词: 数字全息散斑干涉术; 事件相机; 块匹配; Kirchhoff-Love 薄板理论
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0094 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0094

Three-dimensional displacement measurement via fusion of holographic speckle interferometry and event-based vision

QU Ying[1,2], ZHANG Bo-yang[1,2*], LIU Ji[1,2], WU Jin-hui[1,3], JI Xiang-feng[1,2], LI Kai-yuan[1,2]
（1. *State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument*, *Taiyuan* 030051, *China*;
2. *College of Information and Communication Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *China*;
3. *College of Instrument and Electronics*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *boyangzhang@nuc.edu.cn*

Abstract: Traditional three-dimensional digital speckle interferometry generally relies on synchronized multi-beam, multi-wavelength, or multi-camera configurations to obtain three-dimensional displacement vectors, which often leads to complex optical setups, dimensional coupling, and difficulties in synchronizing dy-

收稿日期: 2026-05-18; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 山西省科技成果转化引导专项（No. 202404021301029）; 山西省基础研究计划资助项目（No. 202403021211089, No. 202403021222181）; 中北大学研究生科研基金（No. 20252127）
The Shanxi Special Project for Guiding the Transformation of Scientific and Technological Achievements (No. 202404021301029); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 202403021211089, No. 202403021222181); Scientific Research Foundation of North University of China(No. 20252127)

namic processes. To overcome these limitations, this paper proposes a three-dimensional dynamic displacement-field measurement method that integrates digital holographic speckle interferometry with event vision. First, holographic interference patterns are recorded by an industrial camera combined with a spatial phase-shifting technique, enabling high-precision phase reconstruction of out-of-plane micro-deformation on the object surface. Then, an event camera is introduced to asynchronously capture speckle-intensity variations on the surface for in-plane displacement measurement. The event stream is temporally accumulated, and a block-matching algorithm is used for displacement estimation. Finally, the highly sensitive out-of-plane phase information is fused with the in-plane displacement data to reconstruct the complete three-dimensional displacement field. Experimental results show that the proposed digital holographic speckle interferometry–event vision fusion system can stably measure the three-dimensional displacement field of circular thin plates. The minimum RMSE values reach 0.47 μm for out-of-plane displacement, 0.18 μm for in-plane displacement, and 0.13 μm for the fused three-dimensional displacement field. The proposed method generally satisfies the requirements of high precision, good stability, and strong anti-interference capability in three-dimensional micro-deformation measurement.

Key words: digital holographic speckle interferometry; event camera; block matching; Kirchhoff-Love thin plate theory

1 引 言

数字全息散斑干涉技术具有非接触、全场和亚波长相位灵敏度等优点，是无损检测、复合材料变形测量、全场位移测量的重要手段[1-4]。然而，传统三维数字散斑干涉系统为获取面内与面外位移矢量通常需配置复杂的多光路结构。面内面外结合系统或多面外系统[5-7]，往往依赖于多个激光光源、复杂的传感器排布及频繁的光学开关切换。这不仅降低了系统的集成度，更使其难以测量动态过程。

针对全场三维测量中多维解算与系统集成的需求，研究人员提出了多种改进方案。其中，多波长、多通道及同步相移技术是实现三维位移场同步获取的重要途径。Saucedo-A 等[8] 提出利用单台高分辨率单色传感器同步记录三波长全息图，通过光路设计在傅里叶频谱域提取各波长的相位差。Tang 等[9] 提出三波长彩色数字剪切散斑干涉系统，实现了动态三维变形场测量；Li 等[10] 基于三光束与空间相移方法，在单幅图像中同步获取面内与离面相关相位信息，并实现 6 个位移梯度分量求解；Zhou 等[11] 结合偏振干涉与相位测量偏折术，利用偏振相机完成单帧四步相移解调，为动态三维表面重构提供了新思路。然而，多波长或多通道复用仍易受光谱串扰、通道配准误差影响，限制了其三维相位解算精度。

为降低通道耦合与散斑噪声影响，空间载频、偏振复用和相位增强方法得到发展。Yan 等[12] 针对振动环境下的散斑干涉相位恢复问题，提出振动补偿与空间载频相位提取方法；Liu 等[13] 利用角度多样性照明抑制散斑失相关噪声；随后又提出基于偏振多样性的散斑噪声抑制方法，提高了相位条纹质量[14]。此外，Zhu 等[15] 提出多方向剪切同步偏振相移干涉系统，提高了相位获取效率和系统紧凑性。在多视角测量方面，Zhu 等[16] 基于深度学习多相机 DIC 实现全景变形测量，Qin 等[17] 提出点级优化的多相机立体配对方法。

总体来看，现有方法在测量维度、系统集成和动态适应性方面取得了一定进展[18]，但仍存在光路结构复杂、通道配准要求高、面内位移解算易受条纹对比度和频谱串扰影响[19]，以及多相机全局坐标统一困难等问题[20]。针对上述问题，本文提出一种将事件相机与传统全息散斑干涉技术深度融合的三维动态位移场测量新方法。这种双模态协同架构有效计算面内与离面测量位移，解决了复杂的多光束干涉结构，大幅降低了系统复杂性。

2　理论基础与模型构建

2.1　空间载波数字全息散斑干涉离面位移测量

数字全息散斑干涉技术是一种基于相干光干涉与散斑相位调制的全场非接触式位移测量方法。当相干激光照射粗糙物体表面时, 物体表面随机散射形成散斑场, 其复振幅中包含被测物体的相位信息。物体发生微小变形后, 表面散射点位置变化会引起光程差变化, 从而导致干涉相位发生改变。通过比较变形前后的相位差, 可实现亚波长级微位移测量。

本文采用的数字全息散斑干涉离面位移测量原理如图 1(彩图见期刊电子版)所示。PZT 位移驱动器对被测薄板施加法向加载后, 板面产生z向离面位移$w(x,y)$, 导致反射物光的往返光程发生变化。该光程变化表现为物光相位变化, 并通过物光与参考光的干涉记录在 CCD 采集的全息散斑图中。由于参考光是以一定倾角入射的, 系统将在单帧全息图中引入空间载波, 使物光相位信息能够在频域内与零级背景项分离。

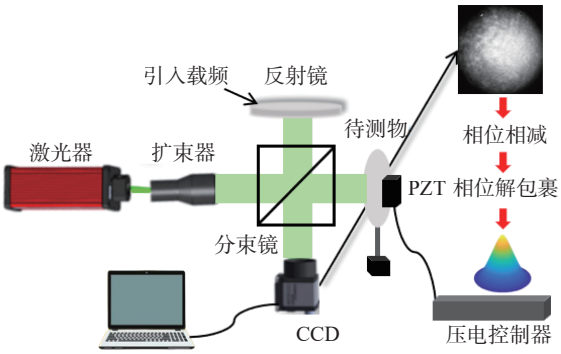


图 1　数字全息散斑干涉离面位移测量原理图

Fig. 1　Principle diagram of digital holographic speckle interferometry for out-of-plane displacement measurement

在离轴全息记录系统中, 假设物光的波前$O(x,y)$与带有特定倾斜角的参考光的波前$R(x,y)$在 CCD 靶面上发生干涉, 此时记录的单帧全息干涉图光强分布可表示为:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |O(x,y)+R(x,y)|^2 \\ &= |O(x,y)|^2+|R(x,y)|^2+ \\ &\quad O(x,y)R^*(x,y)+R(x,y)O^*(x,y) \quad , \end{aligned} \tag{1}$$

式中, 前两项为背景光强, 后两项相互共轭, 它们表示物光和参考光的复振幅之间的关系。为了便于从单幅图像中提取, 对式(1)进行二维快速傅里叶变换, 得到其频谱分布:

$$\begin{aligned} FT[I(x,y)] = A(f_x,f_y)+C(f_x-f_{kx},f_y-f_{ky})+ \\ C^*(f_x+f_{kx},f_y+f_{ky}) \quad . \end{aligned} \tag{2}$$

其中, $FT[\cdot]$表示二维快速傅里叶变换操作, f_x和f_y分别为x和y方向的空间频率自变量, f_{kx}和f_{ky}为参考光引入的空间载波频率, $A(f_x,f_y)$为位于频域中心低频区域的零级背景项, 对应于式 (1) 中前两项背景光强的傅里叶变换, $C(\cdot)$表示物光与参考光交叉干涉项$O(x,y)R^*(x,y)$的傅里叶变换, 即包含被测物表面原始散斑全息相位信息的一级谱项, $C^*(\cdot)$则表示其复共轭一级谱项。由于空间载频的引入, 这 3 部分频谱在频域中实现了有效分离。通过设计合适的带通滤波器窗口并选取其中一个一级谱项, 将其频谱中心平移至原点, 随后进行傅里叶逆变换。由选取合适的频域信息再进行傅里叶逆变换

$$FT^{-1}[C(f_x,f_y)] = o(x,y)\exp[i\phi(x,y)] \quad . \tag{3}$$

进行相位计算, 得到式(4):

$$\phi(x,y) = \arctan\frac{\mathrm{Im}[C(f_x,f_y)]}{\mathrm{Re}[C(f_x,f_y)]} \quad . \tag{4}$$

由于 arctan 函数的取值范围在$(-\pi,\ \pi)$之间, 直接计算得到的是包裹相位, 呈现为不连续的条纹。为了得到连续的位移场, 需要进行相位解包裹, $\psi(x,y)$为解包裹后的连续相位差分布, $2k(x,y)\pi$是相位解包裹引入的跳变补偿项。

$$\phi(x,y) = \psi(x,y)+2k(x,y)\pi \quad . \tag{5}$$

同理, 对变形后记录的全息图采用相同的解调流程, 可得到变形后的相位分布。将变形前后的相位分布相减, 即可得到由物体变形引起的相对相位差, 并由此获得反映物体表面变形的干涉条纹图。

当被测物体受到载荷作用发生微小变形时, 全息系统分别记录变形前后的相位分布。基于反射式全息干涉的几何关系, 物体表面的法向位移$w(x,y)$与变形前后的相位差$\Delta\phi$之间存在严格的线性关系, 即$w(x,y)=\dfrac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi(x,y)$。该模型表明, 利用离轴数字全息技术, 仅需单次曝光即可实现激光半波长量级精度的离面位移测量, 具备对动态

变形过程进行瞬态捕捉的能力。

2.2 基于事件的块匹配算法面内位移测量

事件相机是一类基于亮度变化异步响应的视觉传感器。与传统相机以固定帧率记录灰度图像不同，事件相机的每个像素独立检测局部亮度变化，仅当亮度变化超过设定阈值时才输出事件。由于事件相机输出的是异步稀疏事件流，需先在有限时间窗口内将事件流重构为事件切片。设第k个时间窗口为$[T_k, T_k+\Delta t]$，则事件切片可表示为

$$E_k(x,y)=\sum_{t_i\in[T_k,T_k+\Delta t]} p_i\delta_{x,x_i}\delta_{y,y_i} \quad , \tag{6}$$

其中，(x_i,y_i,p_i,t_i)为窗口内事件，δ_{x,x_i}和δ_{y,y_i}为离散 Kronecker 函数。保留正、负事件信息，构造正、负事件切片

$$\begin{aligned} E_k^+(x,y)&=\sum_{p_i=+1}\delta_{x,x_i}\delta_{y,y_i}\\ E_k^-(x,y)&=\sum_{p_i=-1}\delta_{x,x_i}\delta_{y,y_i} \end{aligned} \quad , \tag{7}$$

并得到有符号事件切片

$$E_k^s(x,y)=E_k^+(x,y)-E_k^-(x,y) \quad . \tag{8}$$

如图 2（彩图见期刊电子版）所示：动态散斑运动首先引起像素亮度变化并产生异步事件流；随后事件流按照时间窗口Δt累积为事件切片，对应式(6)~式(8)；最后事件切片被划分为多个局部子块，作为块匹配算法的输入。

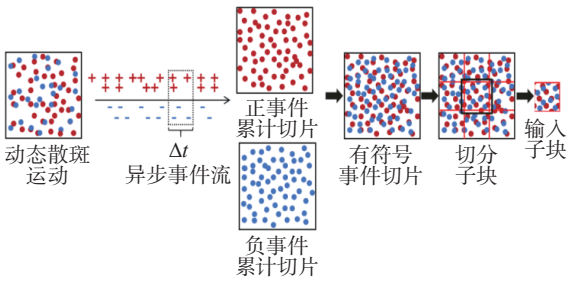


图 2 事件相机动态散斑采集与事件切片生成示意图

Fig. 2 Schematic illustration of dynamic speckle acquisition and event slice generation using an event camera

在获得相邻事件切片E_k和E_{k+1}后，将事件切片划分为尺寸为$M\times N$的局部子块。对于参考切片E_k中以$q=(x_q,y_q)^{\mathrm{T}}$为中心的子块，在当前切片E_{k+1}的搜索区域Ω_S内寻找最相似的候选子块。设候选像素位移为$d=(d_x,d_y)^{\mathrm{T}}$，平均绝对差代价函数定义为

$$J_{\mathrm{MAD}}(d)=\frac{1}{|\Omega_B|}\sum_{\mathbf{r}\in\Omega_B}\left|E_{k+1}(q+r+d)-E_k(q+r)\right| \quad , \tag{9}$$

其中，Ω_B为子块内像素集合，$\Omega_B=MN$。最优像素位移为

$$\widehat{d}=\arg\min_{d\in\Omega_S}J_{\mathrm{MAD}}(d) \quad . \tag{10}$$

该过程通过事件流时间切片、非重叠分块和相邻切片最佳块搜索获得运动向量。在获得像素位移$\hat{d}=(\hat{d}_x,\hat{d}_y)^{\mathrm{T}}$后，需要通过空间标定将其转换为被测物表面的实际面内位移。考虑像素尺寸、成像放大率、相机姿态和坐标轴非正交误差，可采用二维标定矩阵表示

$$\begin{bmatrix}\Delta U_x\\ \Delta U_y\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}_e\begin{bmatrix}\hat{d}_x\\ \hat{d}_y\end{bmatrix} \quad , \tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{K}_e$为事件相机图像坐标到被测物表面坐标的面内位移标定矩阵。

面内位移精度主要受块匹配误差、事件稀疏性、时间窗口和空间标定误差影响。

采用标量形式，写为

$$\sigma_U^2\approx k^2\sigma_d^2+d^2\sigma_k^2+\sigma_{\mathrm{event}}^2+\sigma_{\mathrm{time}}^2 \quad , \tag{12}$$

其中σ_U为系统最终重构得到的实际面内位移全场总测量不确定度，k为空间标定矩阵$\boldsymbol{K}_e$导出的像素尺寸转换系数，σ_d为局部块匹配算法带来的像素级位移识别误差标准差，d为通过块匹配计算得到的相对像素位移量，σ_k为空间标定矩阵不确定度引起的标定物理尺度转换误差标准差，σ_{event}为由事件流本身的异步稀疏特性及事件相机传感器本底噪声引入的测量不确定度标准差，σ_{time}为累计时间窗口Δt划分不合理所引起的时域累计不确定度。事件稀疏性对匹配误差的影响可近似表示为

$$\sigma_d^2\propto\frac{1}{N_{\mathrm{eff}}\rho_B\mathrm{SNR}_e^2} \quad . \tag{13}$$

其中，σ_d^2为块匹配像素误差的方差，N_{eff}为当前计算子块内的有效特征散斑数量，ρ_B为该子块局部区域内的累计事件密度，SNR_e为事件相机在当前测试条件下的等效信噪比。该比例关系表明，提

高有效散斑数、事件密度和事件信噪比可降低匹配误差, 但过长时间窗口会增加散斑去相关风险。

2.3　三维位移测量系统

为实现圆形薄板表面三维位移场测量, 本文搭建数字全息散斑干涉与事件视觉联合测量系统, 如图 3 所示。系统采用波长为 632.8 nm、功率为 200 mW 的 He-Ne 激光器作为相干光源。CCD 通道用于记录离轴全息散斑干涉图, 并基于空间载波相位解调方法获得z向离面位移$w(x,y)$。事件相机通道用于记录加载过程中散斑横向漂移产生的异步事件流, 并通过事件切片块匹配方法获得x、y方向面内位移$u(x,y)$和$v(x,y)$。被测件为铝合金圆形薄板, 直径为 120 mm, 厚度为 5 mm, 弹性模量为 71 GPa, 泊松比为 0.3。

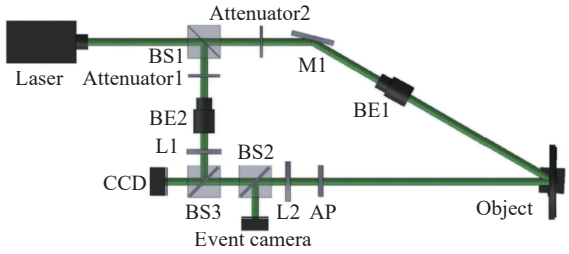


图 3　数字全息散斑干涉与事件视觉融合测量系统原理图

Fig. 3　Schematic diagram of the digital holographic speckle interferometry and event vision fusion measurement system

实验光路如图 4 所示, 激光器输出光束经分束镜 BS1 分为物光和参考光两路。物光经衰减片调节光强后, 由扩束镜 BE1 扩束并照射被测圆板表面。圆板表面在相干光照明下形成反射散斑场, 物光经矩形光阑 AP 和透镜 L2 后, 一部分散斑光经分束镜 BS2 引入事件相机, 用于记录散斑横向运动引起的事件流; 另一部分物光经 BS3 进入 CCD 成像通道。矩形光阑最小孔径为 1 mm, L2 焦距为 100 mm。CCD 相机采用海康机器人 MV-CS040-A0UM 黑白工业面阵相机, 分辨率为 2 048×2 048, 像元尺寸为 5.5 μm×5.5 μm, 采用 1 英寸 CMOS 全局快门传感器, 全分辨率下最高帧率为 90 fps, 并支持硬触发模式。

参考光支路经衰减片调节光强后, 由扩束镜 BE2 和焦距为 50 mm 的透镜 L1 进行扩束和波前调节。参考光以小角度倾斜方式与物光在 CCD 靶面处叠加, 从而在单幅全息图中引入空间载波。实验中通过调节参考光入射角, 使 CCD 图像傅里叶频谱中的零级项与正、负一级谱充分分离。物光与参考光强度通过衰减片分别调节, 以提高干涉条纹对比度并保证一级谱提取质量。

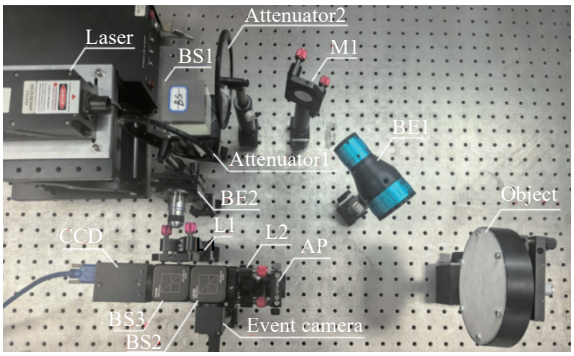


图 4　数字全息散斑干涉与事件视觉融合测量系统实物光路图

Fig. 4　Optical setup photograph of the digital holographic speckle interferometry and event vision fusion measurement system

事件相机采用 PROPHESEE EVK4, 分辨率为 1 280×720, 像元尺寸为 4.86 μm×4.86 μm。事件相机与 CCD 相机对准圆板同一有效测量区域。加载过程中, 圆板表面散斑在事件相机成像平面内发生横向漂移, 事件相机输出由(x,y,p,t)构成的事件流。

实验中根据 CCD 采集时刻和 PZT 加载状态截取对应时间段的事件流, 并累积为事件切片。随后对相邻事件切片进行局部块匹配, 得到散斑横向漂移的像素位移。该像素位移经成像尺度和坐标方向标定后, 转换为被测圆板表面的面内位移$u(x,y)$和$v(x,y)$。

为实现定量变形输入, 本文采用 CoreMorrow FPSt 150/7/160 M14 压电位移驱动器对圆板中心施加法向位移加载。该型号 PZT 标称行程约为 152 μm, 刚度约为 6 N/μm, 推/拉力为 1 200 N/200 N, 静电容量约为 15 μF, 谐振频率约为 5 kHz。圆形铝板放置于环形槽内, 并由环形压圈夹紧固定。PZT 前端安装球头压头, 压头轴线与圆板法线重合, 并对准圆板几何中心。PZT 中心加载与圆板夹具结构如图 5 所示。

为验证 PZT 连续动态过程的追踪能力, 实验控制 PZT 以 10 μm/s 的恒定速率对圆形薄板进行连续中心加载, 加载范围为 0~150 μm。结果见图 6(彩图见期刊电子版), 全面验证本系统在三维变形测量中的动态追踪能力。

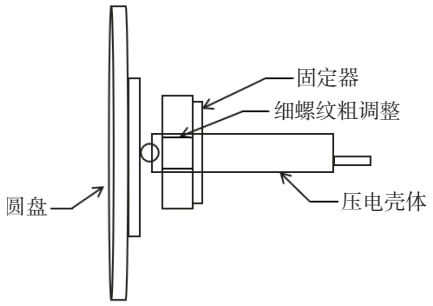


图 5 PZT 中心加载与圆板夹具结构图

Fig. 5 Structural diagram of the PZT central loading configuration and circular plate fixture

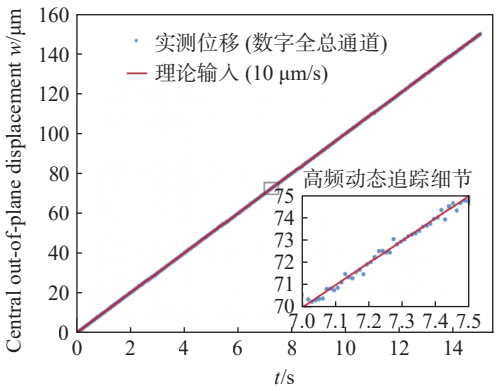


图 6 PZT 中心连续加载实验结果

Fig. 6 Continuous loading experimental results at the PZT center

本文加载步长设为 5 μm，加载序列为 0、50、100、150 μm。CCD 通道和事件相机通道的数据采集方式不同。CCD 相机记录加载稳定状态下的离轴全息图，事件相机记录加载变化过程中的散斑运动事件流。因此，在分级加载实验中，CCD 采集第 j 级稳定状态下的全息图，事件相机记录从第 $j-1$ 级到第 j 级加载过程中的事件流。事件相机得到的增量面内位移按加载级次累积为

$$\begin{cases} u^{(j)}(x,y)=\sum_{m=1}^{j}\Delta u^{(m)}(x,y) \\ v^{(j)}(x,y)=\sum_{m=1}^{j}\Delta v^{(m)}(x,y) \end{cases} . \tag{14}$$

由于 CCD 相机和事件相机成像坐标系不同，三维位移融合前需要进行空间配准。设事件相机图像坐标为 (x_e,y_e)，CCD 图像坐标为 (x_c,y_c)。在两相机观测同一近似平面参考区域的条件下，可采用平面单应矩阵建立坐标映射关系

$$s\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{H}_{ec}\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ 1 \end{bmatrix} , \tag{15}$$

其中，$\boldsymbol{H}_{ec}$ 为事件相机坐标到 CCD 坐标的映射矩阵，s 为比例因子。完成空间配准后，事件相机获得的面内位移场可统一到 CCD 全息相位图坐标系中。完成 CCD 与事件相机共同视场调整和空间配准；然后采集未加载状态下的参考全息图和背景事件数据；最后控制 PZT 按 5 μm 步长加载，在加载稳定后采集 CCD 全息图，并记录对应加载过程中的事件流。经过空间配准和时间对应后，3 个位移分量组合为

$$\boldsymbol{U}^{(j)}(x,y)=\begin{bmatrix} u^{(j)}(x,y) & v^{(j)}(x,y) & w^{(j)}(x,y) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} . \tag{16}$$

该系统以离轴数字全息散斑干涉通道承担离面位移解算，以事件视觉通道承担面内散斑运动提取。PZT 中心加载提供可控变形输入，空间配准和时间对应保证两类测量结果在同一坐标系下融合，为圆形薄板三维位移场重构提供实验基础。

2.4 圆形薄板理论位移场获取与实验对比方法

为评价本文三维位移测量结果的准确性，建立与 PZT 中心加载相对应的理论参考位移场。根据 2.3 节所述实验条件，圆形铝薄板边缘由环形压圈夹紧，可近似为固支边界。PZT 通过球头压头对圆板中心施加法向位移加载，可近似为轴对称中心加载问题。本文采用 Kirchhoff-Love 圆形薄板模型计算理论参考场。

理论计算中以 PZT 闭环反馈位移经标定修正后的中心加载量作为理论模型输入，记为 w_0，即

$$w(0)=w_0 . \tag{17}$$

对于边缘近似固支的圆形薄板，边界条件可写为

$$w(a)=0,\left.\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}r}\right|_{r=a}=0 , \tag{18}$$

其中，a 为圆板半径，r 为径向坐标。在中心位移加载条件下，圆板离面位移可写为归一化形式

$$w_{\mathrm{th}}(r)=w_0\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2+2\left(\frac{r}{a}\right)^2\ln\frac{r}{a}\right],0\leqslant r\leqslant a . \tag{19}$$

当 $r\to 0$ 时，根据洛必达法则可知极限 $2\left(\frac{r}{a}\right)^2\ln\frac{r}{a}=0$ 因此离面位移能够连续收敛至中心最大加载量，即满足中心边界条件 $w_{\mathrm{th}}(0)=w_0$；当 $r=a$ 时直接代入式 (19) 可知边缘位移满足

$w_{\mathrm{th}}(a)=0$。对其求导后边缘径向转角 $\left.\dfrac{\mathrm{d}w_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}r}\right|_{r=a}=0$, 严格满足式 (18) 所示的固支边界条件。因此, 式(19)可作为本文圆板中心加载量加载下离面位移$w_{\mathrm{th}}(r)$的理论参考。由于实际球头压头存在有限接触半径, 中心接触区域可能受到局部压痕和接触刚度影响, 后续误差评价时可根据压头尺寸对中心小区域进行屏蔽处理。

在 Kirchhoff-Love 薄板运动学假设下, 板内距离中面z处的径向面内位移由中面转角决定, 可表示为

$$u_r(r,z)=-z\cdot\frac{\mathrm{d}w_{\mathrm{th}}(r)}{\mathrm{d}r}\quad . \tag{20}$$

事件相机观测的是圆板上表面散斑运动, 故取$z=\dfrac{h}{2}$。由式(19)可得

$$\frac{\mathrm{d}w_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}r}=\frac{4w_0 r}{a^2}\ln\frac{r}{a}\quad . \tag{21}$$

将上表面的径向面内位移转换到直角坐标系, 可得

$$\begin{cases}u_{\mathrm{th}}(x,y)=u_{r,\mathrm{th}}(r)\cdot\dfrac{x}{r}\\ v_{\mathrm{th}}(x,y)=u_{r,\mathrm{th}}(r)\cdot\dfrac{y}{r}\end{cases}\quad . \tag{22}$$

在圆心处, 由轴对称性取$u_{\mathrm{th}}(0,0)=0$、$v_{\mathrm{th}}(0,0)=0$。理论位移方向与实验相位解调方向保持一致, 理论场计算时以圆板几何中心为坐标原点, 实验数据中的圆心位置由圆板边界拟合确定。由此, 每一级 PZT 加载量均可对应得到理论三维位移场

$$U_{\mathrm{th}}(x,y)=\begin{bmatrix}u_{\mathrm{th}}(x,y) & v_{\mathrm{th}}(x,y) & w_{\mathrm{th}}(x,y)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\quad . \tag{23}$$

对于任一位移分量$q\in\{u,v,w\}$, 相对误差定义为

$$\varepsilon_q=\frac{\|q_{\mathrm{meas}}-q_{\mathrm{th}}\|_2}{\|q_{\mathrm{th}}\|_2}\times100\%\quad , \tag{24}$$

式 (24) 所定义的相对误差ε_q基于全场计算。在数学上, 该相对误差等价于全场均方根误差RMSE_q与理论位移场在有效统计区域内的空间均方根值$\mathrm{RMS}_{\mathrm{th}}$之比。由于固支圆板的位移从中心向边缘逐渐衰减, 全场综合基准$\mathrm{RMS}_{\mathrm{th}}$将显著小于中心点的峰值位移$\omega_0$。

均方根误差定义为

$$\mathrm{RMSE}_q=\sqrt{\frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p}\left[q_{\mathrm{meas}}(x_i,y_i)-q_{\mathrm{th}}(x_i,y_i)\right]^2}\quad . \tag{25}$$

3　实验结果与讨论

3.1　离面位移测量结果与分析

为验证数字全息散斑干涉通道的离面位移测量效果, 本文对 CCD 采集的离轴全息图进行频谱检查。图 7(彩图见期刊电子版)给出了典型加载状态下的全息图、傅里叶频谱及相位差恢复结果。频谱中零级项与两侧一级谱分离明显, 所选一级谱能够被带通滤波窗口完整覆盖, 且未与零级项或共轭谱发生明显重叠, 光路满足空间载波相位解调要求。后续各加载状态均选取同一侧一级谱, 并采用相同滤波策略进行处理, 保证相位差计算的一致性。

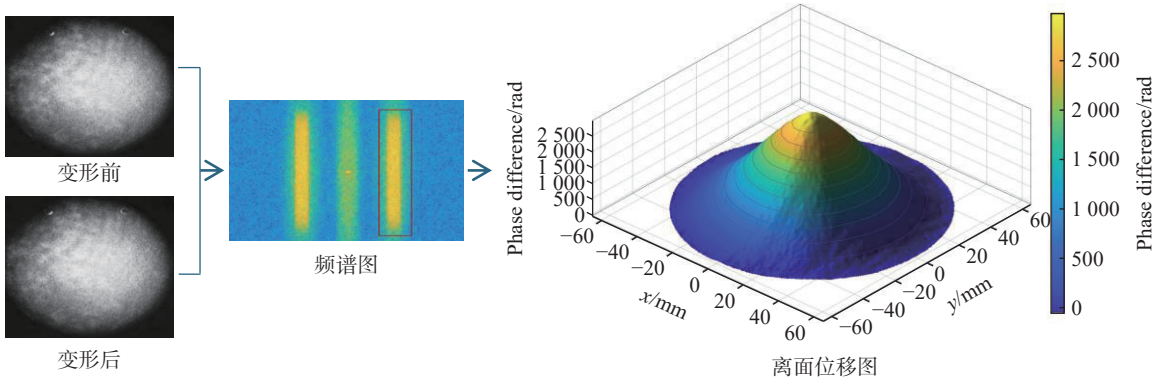
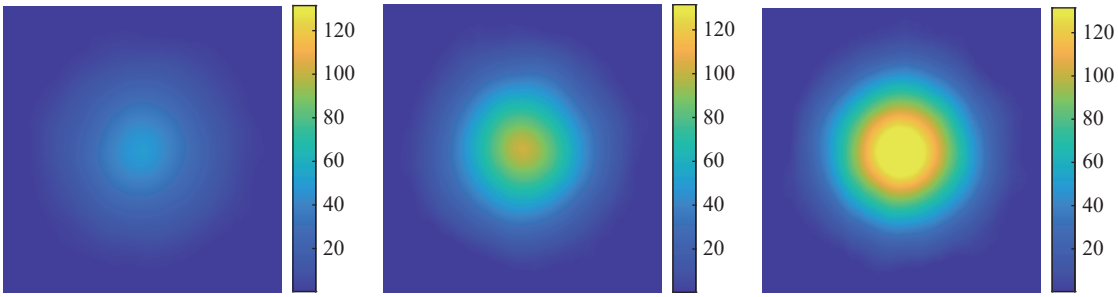


图 7　全息频谱分离与相位差恢复结果

Fig. 7　Holographic spectrum separation and phase-difference reconstruction results

根据恢复得到的连续相位差，计算圆板表面的z向离面位移。图 8(彩图见期刊电子版)给出了不同 PZT 加载量下的离面位移场。为便于对比，各子图采用统一色标随着加载量由 50 μm 增加至 150 μm，离面位移幅值逐渐增大，最大位移区域位于压头作用位置附近，并沿径向向边缘衰减，整体呈现中心加载圆板的轴对称变形特征。



(a) PZT=50 μm (b) PZT=100 μm (c) PZT=150 μm

图 8 不同 PZT 加载量下的离面位移场

Fig. 8 Out-of-plane displacement fields under different PZT loading levels

图 9 给出了不同加载量下径向平均结果与理论对比曲线。实验曲线与理论曲线整体变化趋势一致，均为中心位移较大并随半径增大逐渐衰减、边界附近趋近于零的分布特征，表明全息通道能够准确反映中心加载条件下的离面变形规律。

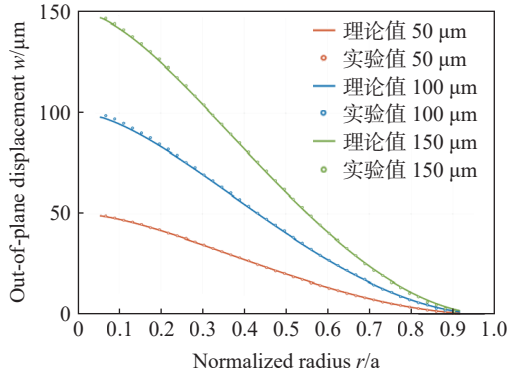


图 9 离面位移径向平均结果与理论值对比

Fig. 9 Comparison between the radially averaged out-of-plane displacement results and theoretical values

表 1 给出了离面位移测量误差统计结果。误差统计区域排除了中心压头接触区、边缘夹持区以及相位质量较差区域，以减小局部接触、边界约束和低信噪比数据对整体评价的影响。

离面位移误差主要来源于频域滤波窗口选取、相位解包裹、散斑去相关、压头有限接触面积以及实际边界约束与理想固支边界之间的差异。频谱分离、位移云图和径向平均结果均表明，数字全息散斑干涉通道能够稳定获得圆板在不同加载状态下的$w(x,y)$离面位移分量。

表 1 离面位移测量误差统计

Tab. 1 Statistical results of out-of-plane displacement measurement errors

PZT加载量/μm	最大面内位移/μm	RMSE/μm	相对误差/%
50	49.62	0.47	2.46
100	99.86	1.01	2.62
150	150.16	1.30	2.25

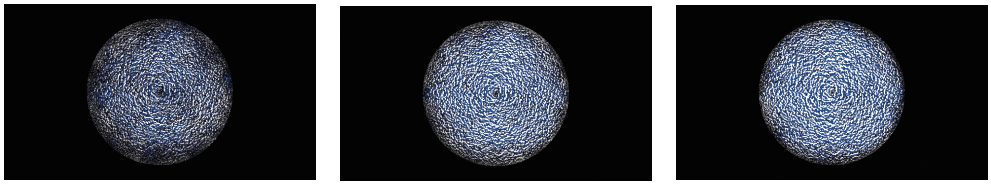
3.2 面内位移测量结果与分析

为验证事件相机通道对动态形变的面内位移追踪能力，本文对 PZT 连续加载过程中采集的异步事件流进行了切片重构与特征分析。图 10(彩图见期刊电子版)给出了不同 PZT 中心加载量下累积的散斑事件切片，其中蓝色像素代表光强变暗，白色代表光强变亮。结果直观表明，随着 PZT 加载量从 50 μm 增加至 150 μm，固支圆板表面的面内径向位移显著增大，散斑图案横向漂移幅度增大，产生更高密度的事件响应。同时，由于圆板中心的面内位移趋近于零，该区域的事件触发极其稀疏，事件密度的空间分布规律与物理变形特征高度一致。

在获得事件切片后，采用局部块匹配算法计算相邻微小加载级次间的散斑位移增量，并在剔除低事件密度和高残差等异常向量后，通过全场累积与邻域插值，重构出不同加载状态下的面内位移向量场，如图 11(彩图见期刊电子版)所示。所有的位移向量均严格以圆心为发散点，呈高度对称的放射状分布。向量箭头的长短在中心点为

零, 向外延展先增大后在边缘处减小。此外, 对比图 10(a)~10(c) 可知, 随着 PZT 加载深度的增加, 面内位移向量的幅值呈显著的比例放大趋势, 充分验证了事件块匹配方法在处理不同尺度面内位移测量时的有效性与鲁棒性。

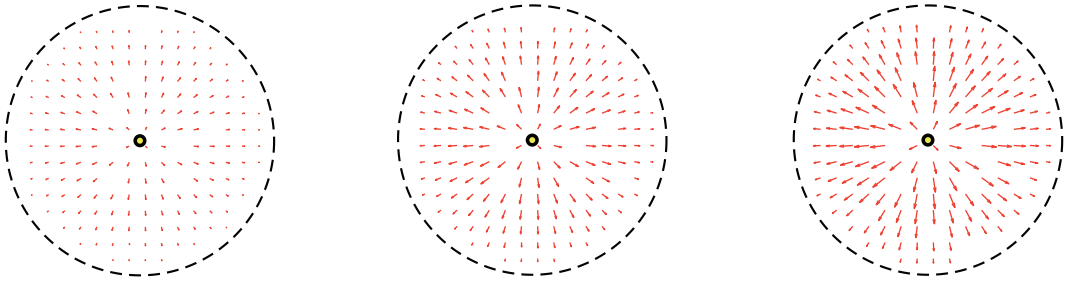
由图 12(彩图见期刊电子版)可见, 随着 PZT 加载量增加, 面内位移幅值 $U_{\parallel}$ 整体增大。根据 2.4 节理论模型, 圆板中心加载时上表面面内位移在圆心和固支边界附近较小, 并在中间径向区域达到较大值。



(a) PZT=50 μm　(b) PZT=100 μm　(c) PZT=150 μm

图 10　不同 PZT 加载量下的累计事件切片

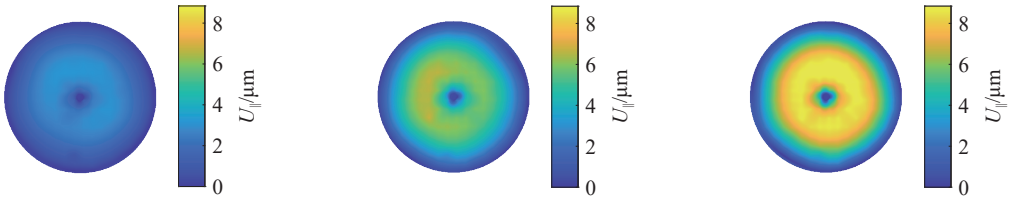
Fig. 10　Cumulative event slices under different PZT loading levels



(a) PZT=50 μm　(b) PZT=100 μm　(c) PZT=150 μm

图 11　不同 PZT 加载量下的面内位移向量

Fig. 11　In-plane displacement vectors under different PZT loading levels



(a) PZT=50 μm　(b) PZT=100 μm　(c) PZT=150 μm

图 12　不同 PZT 加载量下的面内位移幅值场

Fig. 12　In-plane displacement magnitude fields under different PZT loading levels

为进一步评价面内位移测量结果, 将实验得到的面内位移幅值与理论参考值进行对比

$$U_{\parallel,\mathrm{th}}(x,y)=\sqrt{u_{\mathrm{th}}^2(x,y)+v_{\mathrm{th}}^2(x,y)}\quad .\qquad (26)$$

图 13(彩图见期刊电子版)给出了不同加载量下 $U_{\parallel}$ 的径向平均结果与理论值对比结果。实验曲线与理论曲线在整体趋势上保持一致, 说明事件相机通道能够反映圆板表面的面内运动。局部偏差主要与事件密度不均、块匹配误差、散斑去相关、空间配准误差以及中心接触区域扰动有关。离面变形引起的散斑去相关会表现为局部匹配残差增大, 本文通过事件密度筛选、匹配残差约束和有效区域选取进行抑制。

表 2 给出了面内位移测量误差统计结果。误差统计时排除中心压头接触区、边缘夹持区和事件密度不足区域, 以降低无效匹配和局部接触误差对整体评价的影响。

事件相机通道能够在加载过程中提取圆板表面散斑横向运动信息, 并为三维位移场融合提供 $u(x,y)$、$v(x,y)$ 面内分量。

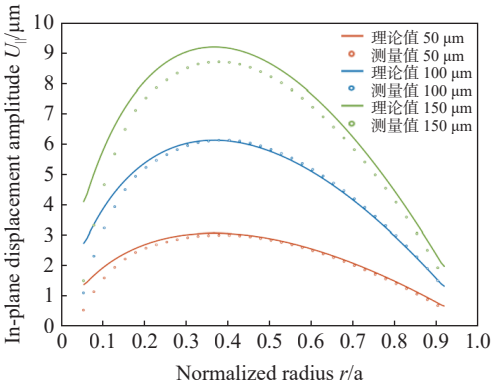


图 13 面内位移径向平均结果与理论值对比

Fig. 13 Comparison between the radially averaged in-plane displacement results and theoretical values

表 2 面内位移测量误差统计

Tab. 2 Statistical results of in-plane displacement measurement errors

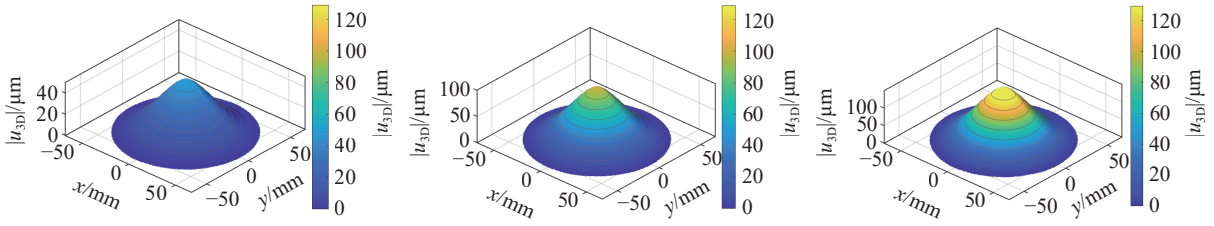
PZT加载量/μm	最大面内位移幅值/μm	有效匹配比例值/%	RMSE/μm	相对误差/%
50	3.25	95.58	0.18	8.18
100	6.76	94.48	0.32	7.12
150	9.20	92.71	0.51	7.64

3.3 三维位移场融合与精度分析

经空间配准、时间对应和有效区域筛选后，数字全息通道获得的离面位移$w(x,y)$与事件相机通道获得的面内位移$u(x,y)$、$v(x,y)$被统一到同一测量坐标系中，形成圆板表面的三维位移场。

图 14（彩图见期刊电子版）给出了不同 PZT 加载量下的三维位移场融合结果。由图 14 可见，圆板离面位移在中心加载区域附近较大，并沿径向向边缘逐渐衰减；面内位移呈现与中心加载弯曲相对应的径向分布特征。随着 PZT 加载量增加，三维位移场整体幅值同步增大，说明数字全息通道与事件相机通道在不同加载状态下具有一致的响应规律。

为评价三维融合结果的整体精度，本文在第 2.4 节误差评价方法的基础上，将单分量误差扩展为三维位移矢量误差。对于同一测量点，三维误差定义为实验位移矢量与理论参考位移矢量之间的欧氏距离，并按照 RMSE 和相对误差定义，对有效测量区域内的e_{3D}进行统计，得到三维均方根误差 RMSE_{3D} 和三维相对误差ε_{3D}。

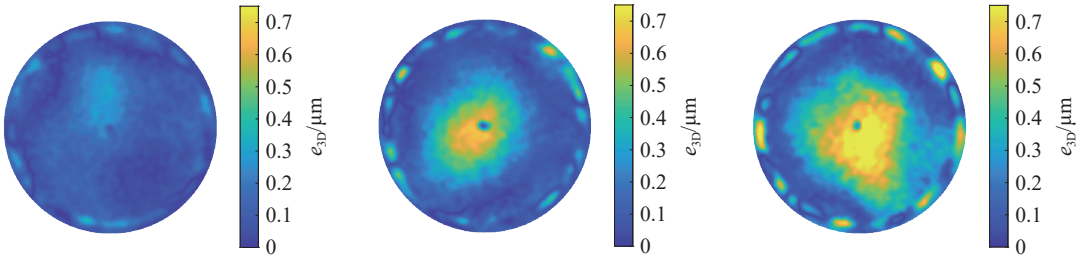


(a) PZT=50 μm (b) PZT=100 μm (c) PZT=150 μm

图 14 不同 PZT 加载量下的三维位移幅值曲面

Fig. 14 Three-dimensional displacement magnitude surfaces under different PZT loading levels

图 15（彩图见期刊电子版）给出了典型加载状态下的三维位移误差分布。可以看出，实验三维位移场与理论参考场在整体空间分布上保持一致，较大误差主要集中在中心压头接触区、边缘夹持区以及事件有效匹配不足的局部区域。中心区域误差主要与球头压头有限接触面积和局部压痕有关，边缘区域误差主要与实际夹持条件偏离理想固支边界有关。



(a) PZT=50 μm (b) PZT=100 μm (c) PZT=150 μm

图 15 不同 PZT 加载量下的三维位移误差分布

Fig. 15 Three-dimensional displacement errors distributions under different PZT loading levels

表 3 汇总了不同加载量下三维融合位移场的整体误差统计结果。与表 1 和表 2 中的分量误差统计不同, 表 3 仅给出三维矢量误差指标, 用于评价系统整体测量精度。误差统计区域排除中心压头接触区、边缘夹持区、相位质量较差区域以及事件有效匹配不足区域。

表 3　三维位移场融合精度统计

Tab. 3　Three-dimensional displacement field fusion accuracy statistics

PZT加载量/μm	$RMSE_{3D}$/μm	ε_{3D}/%	最大三维误差/μm	有效测量点比例/%
50	0.13	0.63	0.36	79.35
100	0.26	0.64	0.69	78.14
150	0.37	0.63	0.98	80.37

为了进一步评估本方法在实际测量中的重复性与系统稳定性, 实验在完全相同的光学系统配置与环境条件下进行, 针对每种解 PZT 加载量分别进行了 3 次独立的重复测量。表 4 汇总了多次测量的三维位移均方根误差以及最大三维误差的统计结果, 数据以“平均值标准差”的形式表示。

表 4　不同加载量下 3 次重复测量的 $RMSE_{3D}$ 数据与统计结果

Tab. 4　Raw data and statistical results of $RMSE_{3D}$ for 3 repeated measurements under different indentation depths

PZT加载量/μm	测量1/μm	测量2/μm	测量3/μm	统计结果(平均值±标准差)
50	0.13	0.16	0.14	0.14±0.01
100	0.26	0.31	0.27	0.28±0.03
150	0.37	0.42	0.43	0.40±0.04

本文构建的数字全息散斑干涉与事件视觉融合系统能够在同一加载条件下获得$u(x,y)$、$v(x,y)$和$w(x,y)$3 个位移分量。三维融合结果与理论参考场在空间分布和加载响应趋势上保持一致, 能够实现圆形薄板三维位移场的高精度重构。

3.4　误差来源定量分析

针对面内与离面位移的测量误差, 结合本系统的硬件参数与算法模型进行定量分析。在面内位移计算中, 根据式 (12) 的误差传播模型, 由于本文事件相机等效信噪比高且有效匹配比例大于 92%(见表 2), 块匹配误差$k^2\sigma_d^2$对总方差的贡献被有效抑制在 15% 以下。主要不确定度来源于空间标定误差转换$d^2\sigma_k^2$以及事件流稀疏分布引入的时域窗口离散误差σ_{time}^2, 二者约占面内总误差的 65% 以上。对于离面位移测量, 其 RMSE 最低为 0.47 μm(见表 1), 误差主要来源于 CCD 相机散斑图的空间载频滤波窗口截断效应, 以及实际夹具并非理想刚性固支所导致的物理边界条件偏离。总体而言, 三维融合误差 $RMSE_{3D}$ 为 0.13 μm, 稳定在亚微米量级, 系统误差源分布合理且处于可控范围内。

4　结　论

本文针对传统三维形变测量中多光路耦合光路复杂的局限, 及多相机同步困难等难题提出并验证了一种数字全息散斑干涉与事件视觉深度融合的三维动态位移测量方法。系统通过单帧离轴全息高灵敏解调离面位移, 结合事件相机微秒级异步追踪面内散斑漂移, 实现了多维异构数据的精准融合。圆形薄板中心加载实验表明, 系统的离面、面内及三维融合位移均方根误差分别低至 0.47 μm、0.18 μm 和 0.13 μm。该双模态协同架构在保证亚微米级全场高精度三维重构的同时, 显著降低了干涉光路的复杂性, 为复合材料动态形变分析与检测提供了具备强鲁棒性的新型测量手段。

参考文献:

[1] CHABAN A, TORNARI V, ANDRIANAKIS M, *et al*.. Digital holographic speckle pattern interferometry in support of ongoing conservation: the case of Giotto’s wall paintings in the Bardi Chapel, Florence[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2026, 77: 140-148.

[2] MARDAN DEZFOULI A, DEMOLI N, ABRAMOVIĆ D, *et al*.. Digital holographic interferometry for micro-deformation analysis of Morpho butterfly wing[J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 851.

[3] BIANCO G, BRUNO L, GIRKIN C A, *et al*.. Full-field displacement measurement of corneoscleral shells by combining multi-camera speckle interferometry with 3D shape reconstruction[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of*

Biomedical Materials, 2020, 103: 103560.

[4] KOSMA K, TORNARI V. The application of digital holographic speckle pattern interferometry to the structural condition study of a plaster sample[J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 894.

[5] 王永红, 包凤卿, 张肖, 等. 数字散斑干涉三维变形测量技术研究进展[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 681-689.
WANG Y H, BAO F Q, ZHANG X, *et al*.. Three-dimensional deformation measurement based on digital speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 681-689. (in Chinese).

[6] 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): 603010.
YAN H, LONG J, LIU CH 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): 603010. (in Chinese).

[7] GU G Q, WANG K F, WANG Y F, *et al*.. Synchronous triple-optical-path digital speckle pattern interferometry with fast discrete curvelet transform for measuring three-dimensional displacements[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 80: 104-111.

[8] QIN J, GAO ZH, WANG X, *et al*.. Three-dimensional continuous displacement measurement with temporal speckle pattern interferometry[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2020.

[9] TANG X, YE X, LI ZH S, *et al*.. A novel tri-wavelength color digital shearing speckle pattern interferometry system for dynamic 3D deformation measurement[J]. *Optics Communications*, 2025, 592: 132250.

[10] LI J R, YAO Y F, ZHAO Q H, *et al*.. Simultaneous measurement of six displacement gradients using Digital Shearography[J]. *Measurement*, 2025, 240: 115520.

[11] ZHOU X, JIA SH H, ZHANG H J, *et al*.. Single-frame fringe pattern analysis with synchronous phase-shifting based on polarization interferometry phase measuring deflectometry (PIPMD)[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181: 108406.

[12] YAN P ZH, WANG Y H, DING M H, *et al*.. Phase retrieval in speckle pattern interferometry under vibrational environments[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 194: 109172.

[13] LIU X W, DING M H, YAN P ZH, *et al*.. Angular diversity illumination method for effective suppression of speckle decorrelation noise in speckle interferometry[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(12): 4058-4061.

[14] LIU X W, DING M H, WANG Y H, *et al*.. Polarization diversity-based speckle noise suppression method in speckle pattern interferometry[J]. *Optics Communications*, 2026, 602: 132778.

[15] ZHU Y H, TIAN A L, WANG H J, *et al*.. A novel multiple directional shearing interferometry system with synchronous polarization phase shifting[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 2775.

[16] ZHU K Y, LIU Y ZH, REN X CH, *et al*.. Panoramic deformation measurement and crack identification in concrete with deep-learning-based multi-camera DIC[J]. *Measurement*, 2025, 256: 118133.

[17] QIN W X, WANG F Y, HU SH P, *et al*.. Multi-camera 3D digital image correlation with pointwise-optimized model-based stereo pairing[J]. *Sensors*, 2025, 25(18): 5675.

[18] ZHANG X, WANG Z, LIU M N, *et al*.. Three-dimensional nano-displacement measurement by four-beam laser interferometry[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, 7(1): 10.

[19] BAI Y J, ZHANG Z H, FU SH, *et al*.. Recent progress of full-field three-dimensional shape measurement based on phase information[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2024, 7(1): 9.

[20] ÇAPUNAMAN Ö B, MOHSENI A, DOMBROVSKIJ D, *et al*.. A robotic framework for high-throughput and multi-view 3D digital image correlation (3D-DIC): increasing measurement volume and versatility for deformation analysis[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2026, 99: 103187.

作者简介：



张博洋（1991—），男，江苏南通人，博士，讲师，2021 年于美国奥克兰大学获得博士学位，主要从事光测实验力学、无损检测等方向的研究。E-mail: boyangzhang@nuc.edu.cn