

文章编号 1004-924X(2025)15-2354-11

多通道数字图像相关的柔性屏多层应变同步测量

李骏睿*, 曾湘文, 周 露, 宋浩林, 王永红

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 随着以折叠屏手机为代表的柔性屏产业快速兴起, 实现柔性屏在弯折状态下各层结构变形与应力分布的同步测量, 已成为结构设计与性能测试中亟需突破的核心技术难题。基于多通道数字图像相关(DIC)技术, 结合荧光标记与屏幕显示, 利用彩色多通道光学测量系统, 实现了柔性折叠屏在动态弯折过程中的多结构层变形与应变场的同步测量。在多层散斑图案制备方面, 显示层通过自身发光机制直接呈现红色散斑图案, 表面保护层采用喷涂荧光粉末生成蓝色散斑, 实现了对量产柔性屏的无损荧光散斑制备; 此外, 在制造阶段在任意中间结构层掺杂绿色荧光粉末可进一步拓展对任意结构层的变形同步测量。不同颜色的散斑由彩色相机系统同步采集并光谱分离, 随后通过 DIC 算法分别解算各结构层的全场变形与应变分布。所构建的测量系统面内与面外变形测量精度分别达到 $1\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$, 可满足柔性屏结构设计与性能测试中对多层材料同步测量的高精度需求。实验结果表明, 该方法能够高精度同步获取柔性屏各层的变形与应变分布, 为柔性屏可靠性研究提供了可靠的无损检测工具。

关键词: 数字图像相关; 柔性屏; 显示散斑; 荧光散斑; 应变测量

中图分类号: TH74; O348.1 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253315. 2354 **CSTR:** 32169. 14. OPE. 20253315. 2354

Synchronous multilayer strain measurement of flexible displays based on multi-channel digital image correlation

LI Junrui*, ZENG Xiangwen, ZHOU Lu, SONG Haolin, WANG Yonghong

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: lijunrui@hfut.edu.cn

Abstract: With the rapid expansion of the flexible display industry, represented by foldable smartphones, simultaneous measurement of deformation and stress distribution across multiple structural layers under bending has become a critical challenge for structural design and performance evaluation. A color multi-channel optical measurement system, integrating multi-channel Digital Image Correlation (DIC) with fluorescent labeling and the screen's own display, is presented to enable, for the first time, synchronous measurement of deformation and strain fields in multiple structural layers of a foldable screen during dynamic bending. The display layer produces red speckle patterns via intrinsic luminescence, while the surface protective layer is endowed with blue fluorescent speckles by spray-coating a UV-excited powder, enabling

收稿日期: 2025-05-10; 修订日期: 2025-06-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52205562, No. 52375536); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. JZ2025HG TB0197)

non-destructive speckle application compatible with mass-produced flexible screens. Incorporation of green fluorescent powder into intermediate structural layers during manufacturing further permits synchronous measurement of additional layers. Color-speckle images are captured simultaneously by a color camera system and spectrally separated. Full-field deformation and strain distributions for each structural layer are then computed independently using DIC algorithms. The system attains in-plane and out-of-plane deformation measurement accuracies of $1\text{ }\mu\text{m}$ and $5\text{ }\mu\text{m}$, respectively, satisfying the high-precision requirements of multilayer material characterization in flexible-screen design and testing. Experimental results confirm that the proposed method accurately and synchronously retrieves deformation and strain fields for each layer of a flexible display, offering an innovative, non-destructive testing tool for reliability assessment of flexible displays.

Key words: digital image correlation; flexible display screen; displayed speckle; fluorescent speckle; strain measurement

1 引 言

随着显示技术的不断发展与广泛应用,柔性有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)显示屏逐渐成为现代电子设备的核心组件,尤其在智能手机、可穿戴设备等领域展现出独特的优势^[1]。柔性屏不仅具备轻薄、低能耗的特点,还拥有可弯曲、耐用的特性,极大地拓宽了设备的设计与使用可能性^[2]。然而,在实际使用中,柔性屏在频繁弯折时易出现应变集中、膜层分离等问题,从而影响其使用寿命和性能。因此,研究柔性屏在弯折过程中的应变分布,尤其是不同层的应变同步测量,显得尤为重要。

柔性 OLED 显示屏由多个膜层构成,膜层主要包括盖板层、触控层、偏光层、OLED 显示层、薄膜封装层和背板层等,这些膜层通过光学透明胶(Optical Clear Adhesive, OCA)进行贴合^[3-4]。然而,当柔性屏在外力作用下变形时,各膜层间难以协调一致,导致局部应力过大,严重时甚至会造成膜层脱离及不可逆损伤,此类问题已成为行业发展的研究重点^[5]。因此,需要对柔性屏的多个膜层变形进行同步测量,从而实现对柔性屏结构可靠性的定量分析。针对这一问题,2018年,刘正周等^[6]进行了可折叠 OLED 屏幕的弯折应力仿真,理论上获得了柔性屏应变分布情况。2021年,郑宏兵等^[7]利用数值模拟方法研究了弯

折区域堆叠结构和贴附偏移对金属层应力的影响,并于2024年^[8]基于正交试验和有限元分析,探讨了不同堆叠设计及贴附误差等因素对屏幕端部非显示区域(Chip On Film, COF)金属层应力的影响,进而提出了COF区域的优化设计方案,为相关参数的区间控制提供了依据。2022年,黄志豪等^[9]借助内聚力模型提出了一种柔性屏贴合方法,并通过建立仿真模型对贴合过程进行模拟,分析了贴合过程中的应力变化。2024年,胡小飞等^[10]在考虑黏弹性、塑性及几何非线性基础上,对折叠屏的折痕形成过程进行了仿真研究,探讨了OCA胶层设计参数对折叠屏残余应力及折痕的影响。然而,上述研究大多基于理想边界条件和简化模型进行推演,仿真结果在一定程度上难以反映实际器件在真实使用环境下的复杂应变分布。为此,亟需引入具备高空间分辨率和全场测量能力的实验技术,实现对柔性 OLED 显示屏多膜层同步应变行为的精确表征。

在诸多应变测量技术中,数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法因其非接触、高精度及可实现全场位移与应变测量的显著优势,近年来广泛应用于材料力学行为分析和检测领域^[11-12]。DIC技术通过捕捉载荷前后的图像并分析图像中自然或人工散斑的空间迁移,能够重构变形表面的位移与应变场分布。2024年,本团队^[13]提出了利用DIC技术实现柔性屏全场应变测量,通过表面喷涂随机散斑配合柔性屏上显

示散斑实现柔性屏变形及应变的全场测量。然而,该方法虽然实现了显示层与保护层应变的全场测量,但由于存在表面散斑对显示层散斑的遮挡,显示层与保护层均只能实现一半结构的测量,并要求柔性屏各位置的结构变形与应变保持一致,因而缺乏对柔性屏不同层的变形与应变分布同步测量的能力。

针对以上问题与挑战,本文提出一种基于多通道数字图像相关的新型多层应变同步测量方法,通过柔性屏不同膜层上进行荧光散斑标记并结合显示层上的显示不同颜色通道的散斑图案,通过多通道彩色相机同步采集彩色图像将散斑图案分离,进而通过不同色彩散斑图样变化表征柔性屏幕在弯折过程中各膜层的变形信息。基于不同通道分离后的散斑图像,采用三维数字图像相关算法进行图像匹配和解算分析,实现多层的变形场数据同步获取,进一步基于变形场计算全场应变,实现柔性屏不同结构层应变的同步测量。这为研究柔性屏在实际使用中的力学行为提供了可靠的实验数据支持,从而为柔性屏的设计优化、寿命评估及故障预防提供科学依据,提高柔性屏产品的性能和稳定性。

2 测量原理

2.1 数字图像相关原理

DIC 技术是一种基于图像分析的全场位移与应变测量方法。它通过对物体在加载前后的

表面图像进行对比分析,追踪表面纹理或特征点在变形过程中的位移变化,进而计算出整个表面的位移场和应变场分布^[14]。

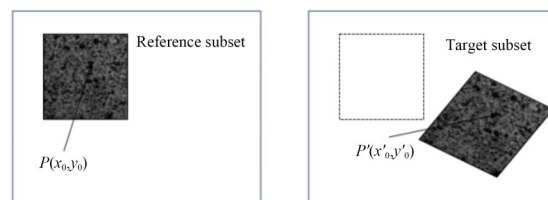


图1 数字图像相关原理

Fig. 1 Principle of digital image correlation

如图1所示,DIC的实质是在变形图像上找到与参考图像上点 $P(x_0, y_0)$ 相关性最大的点 $P'(x'_0, y'_0)$ 。由于单点匹配存在较大的误差,DIC匹配时通常需要在参考图像上选取 $(2m+1) \times (2m+1)$ 的正方形子区进行计算。图中的参考子区是初始状态下的一个局部区域,目标子区是加载后的对应区域,匹配算法需要找到目标图像中使灰度分布最接近参考子集的位置。通常在实际的计算中将参考图像中间的待计算区域划分成网格形式,计算每个网格节点的位移,可以得到物体表面的全场位移信息。因此,时序图像子区的灰度信息匹配对于DIC技术至关重要,根据研究表明,零均值归一化互相关函数(Zero-mean Normalized Cross Correlation, ZNCC)的计算效率高、对光照变化不敏感并且性能稳定,因此,这里选为首选相关函数。ZNCC的表示形式是:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2 \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

其中: $f(x_i, y_i)$ 表示参考子区域的灰度值, $g(x'_i, y'_i)$ 表示目标子区域的灰度值, $\bar{f}$ 和 $\bar{g}$ 分别表示参考子区域和目标子区域的平均灰度值。 C_{ZNCC} 值越接近于1,表示图像相关性越好。

DIC技术不仅可以测量物体的刚体位移,还能有效捕捉形变特征。然而,在实际变形测量过程中,子区的中心点位置可能会发生偏移,且子

区的形状也会出现不规则变化。这些变化会导致相关系数的计算结果降低,从而使匹配的相关性水平下降,甚至出现匹配误差或错误匹配的情况。为了确保在物体发生不规则形变时,采集的图像仍能正确匹配,本研究需要形函数模型。根据研究,使用一阶形函数可以有效解决大多数物体的常规变形测量问题。图2中, P 点为参考子

集内的中心点, Q 点为参考子集内任意一点, P' 和 Q' 分别为形变子集内与参考子集内 P 点和 Q 点的对应点。由图 2 可知, 一阶形函数可以表示为:

$$\begin{cases} x'_1 = x_0 + u + dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \\ y'_1 = y_0 + v + dy + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \end{cases} \quad (2)$$

为提高匹配效率, 本文采用了快速 ZNCC 方法进行整像素定位计算。其实现过程是通过预先计算若干图像灰度分布的相关矩阵, 在后续计算中直接使用这些矩阵, 避免了复杂的乘法运算。这样不仅确保了逐点搜索法的精度, 还显著提升了运算效率。

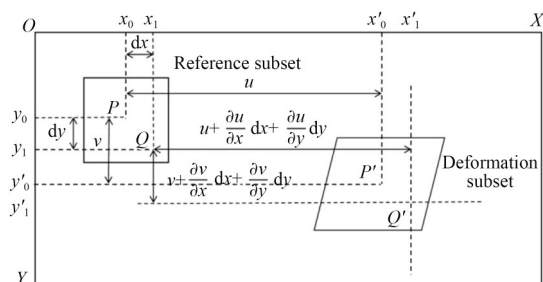


图 2 一阶形函数模型

Fig. 2 First-order shape function

本实验采用双相机系统从不同角度同步拍摄柔性屏上的随机散斑图案来实现三维数字图像相关测量。通过双目立体成像标定确定双相机的内外参数(如焦距、畸变、相对位置等), 建立三维空间坐标与二维图像像素的映射关系。如图 3 所示, $A(X, Y, Z)$ 为世界坐标

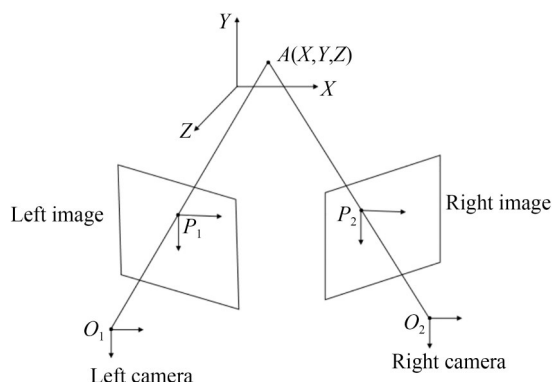


图 3 双目视觉示意图

Fig. 3 Schematic of stereo vision

系上一物点, P_1, P_2 分别为左右相机对 A 采集到的点, O_1, O_2 为两个相机的光心。根据双目立体视觉原理, A 是直线 O_1P_1 和直线 O_2P_2 的交汇点, 通过直线的交点可以重构待测点 A 的三维坐标。

由此可对左侧图像子区域进行左右相机匹配, 重建参考三维坐标 A , 将同一子区分别与变形后的左右图像匹配, 重建变形后的三维坐标 A' 。之后再逐点计算位移矢量, 遍历所有点后得到全场位移数据。

2.2 柔性屏多层应变的同步测量

在传统的 DIC 测量中, 物体表面的纹理通常通过喷涂随机散斑图案实现。然而, 当测量对象具有复杂表面特性(如光滑、透明或反光表面)时, 普通散斑难以形成足够清晰的纹理, 导致测量精度下降。而传统喷涂散斑又会遮挡包括显示层在内的柔性屏内层结构。为此, 本文采用荧光标记技术, 通过在待测物体表面喷涂透明荧光粉末, 在激发光源下产生特定波长的高对比度荧光纹理图案, 进而通过该波段散斑图案表征荧光粉末所在层的变形信息^[15]。

进一步地, 为实现柔性屏多层结构的同步测量, 本文结合多通道成像技术, 将由荧光材料标记并显示的散斑图案与显示层直接显示的散斑图样通过不同光谱进行区分, 使每层信号通过其独立的光谱特性进行图像分离^[16]。在验证实验中, 通过同步采集表层保护层由荧光散斑标记的蓝色散斑与最底层 OLED 显示层显示的红色散斑, 实现对任意柔性屏幕在弯折过程中表层与显示层应变的无损测量。在此基础上, 仅需在柔性屏制备过程中选用具有不同发射波长(如绿色波段)的荧光材料标记任意膜层并形成散斑图案, 即可实现对任意多层结构的位移与应变信息的同步测量。因此, 本方法不仅可在表层与显示层散斑叠加条件下实现任意量产屏幕的形变同步测量, 还可在研发生产过程中通过预掺杂荧光剂, 实现内层散斑的独立成像, 最终完成对柔性屏多层结构位移与应变的精确测量与分析。

在多通道数字图像相关技术中, 不同发射波长的散斑图案可以被独立通道捕捉, 避免信

号混叠。图 4 为本研究使用的彩色相机的光谱响应,相机采用棱镜分光系统,将入射光线通过光学棱镜物理分割为红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色,并分别投射到 3 个独立的 CMOS 传感器上。每个传感器仅接收对应波长的光信号,从而直接捕获完整的 RGB 三通道数据,无需依赖滤光片或色彩插值算法。将彩色相机捕获的多层信息分离之后,系统可以捕捉来自不同材料层的光学响应,为多层应变场的同步测量提供支持。

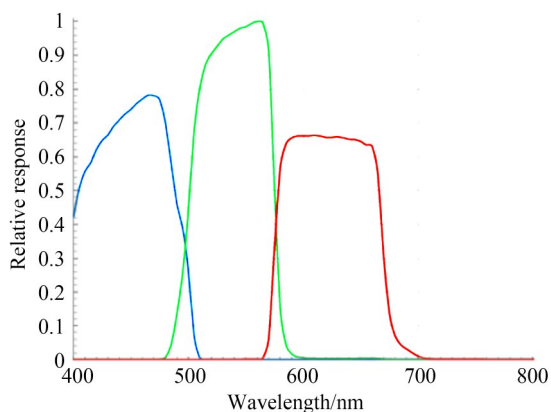


图 4 所使用彩色相机的光谱响应

Fig. 4 Spectral response of selected color camera

3 位移场测量的不确定度分析

在三维 DIC 技术中,系统变形测量的不确定度分析是保障结果可靠性的核心环节。测量过程涉及复杂的程序,其中对不确定度影响的主要环节有相机标定环节、图像匹配环节等。

张等提出的经典标定方法^[17]在三维数字图像相关技术中广泛用于立体相机系统标定。该方法需要先拍摄具有预设控制点图案的标定靶标在多个位姿下的图像,再配准各图像中的控制点。在其计算初期基于几何约束条件对立体视觉系统的初始参数进行估计,后期通过最小化控制点对的重投影误差优化求解最优参数组合。该标定算法的输入仅需标定靶标的物理参数信息及匹配后的控制点对坐标。由于匹配过程中不可避免受到噪声干扰,测量结果存在误差,最终影响标定参数的精度。根据朱等^[18]的结论,可以使用控制点的重投影误差的标准差 σ_e 来估算

标定参数的不确定度 σ_θ 。 σ_e 的表达式为:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [m_i - \hat{m}(\theta, X_i)]^2}{N - P}, \quad (3)$$

式中: m_i 是控制点的匹配坐标, $\hat{m}(\theta, X_i)$ 是基于标定参数 θ 的控制点重投影坐标, N 是所有标定图像中控制点的总数量, P 是标定参数的总数量。

σ_θ 由 σ_e 以及优化标定参数的目标函数的 Jacobin 矩阵与 Hessian 矩阵决定。目标函数可表示为:

$$\arg \min_{\theta} \varphi(\theta) = \sum_{i=1}^N \|m_i - \hat{m}(\theta, X_i)\|^2. \quad (4)$$

σ_θ 可表示为:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\text{diag} \left\{ \left[\left[\frac{\partial \hat{m}}{\partial \theta} \right]^T \frac{\partial \hat{m}}{\partial \theta} \right]^{-1} \right\} \sigma_e^2}. \quad (5)$$

使用 IC-GN (Inverse Compositional Gaussian-Newton) 算法对图像进行亚像素匹配,此过程中图像噪声、散斑图案质量、子区尺寸和插值算法等都会影响位移测量精度。在使用高阶插值算法与低通滤波器的情况下,插值算法对测量不确定度的影响可以忽略。在形函数不出现欠匹配且子区尺寸确定的情况下,根据参考文献^[19],由噪声影响的图像匹配过程中测量不确定度为:

$$\sigma(u) = \frac{\sqrt{2} \sigma}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_x^2(x_i, y_j)}, \quad (6)$$

$$\sigma(v) = \frac{\sqrt{2} \sigma}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_y^2(x_i, y_j)}, \quad (7)$$

式中: $\sigma(u)$, $\sigma(v)$ 分别代表 u , v 方向的不确定度, σ 可以通过对参考图像使用 Laplacian 算子求得, f_x, f_y 为图像分别在两个方向上的梯度。

在本研究中,两个相机的夹角为 20° ,感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 的尺寸为 $1400 \text{ pixel} \times 1500 \text{ pixel}$,对应的测量区域约为 $93 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。DIC 分析中,子区大小设为 21×21 像素,步长为 11 像素,以兼顾匹配精度与计算稳定性。根据 Sutton 等^[20]对中对数字图像相关测量精度的分析,DIC 系统可分别达到面内 0.01 像素、面外 0.05 像素的位移测量精度。结合

式(8)与系统参数,本实验系统对应的位移测量精度可达面内 $1\ \mu\text{m}$ 、面外 $5\ \mu\text{m}$,满足柔性结构微小变形的测量需求。

$$\sigma_m = M\sigma_p, \quad (8)$$

式中: σ_m 为面内或面外的测量误差; M 为成像倍率,是视场内实际长度与其对应像素数量的比值; σ_p 为位移测量的亚像素精度。

4 基于测得位移场的应变场计算

应变场是表征材料变形程度的关键物理量,直接反映了物体内部因外力作用而产生的几何畸变。柔性屏在弯折过程中易因层间协同变形不足导致应力集中,而应变场的分布可精确揭示高应变梯度区域。为优化结构设计、预防膜层剥离或断裂提供关键信息,因此需由系统的位移场计算应变场^[21]。

由于对位移场进行数值差分会显著放大噪声,应变场的计算精度较低,特别是在高频噪声或位移场波动较大的情况下。因此,本文使用在计算点拟合切平面并结合SG(Savitzky-Golay)拟合求解应变张量^[22],从而显著降低噪声的影响。为构建目标点的局部位移场模型,首先需筛选计算点 P 的邻域点,邻域搜索策略采取半径搜索与近邻(K-Nearest Neighbors, KNN)搜索,半径搜索以目标点为中心,在给定半径内搜索邻域点,确保空间连续性。近邻搜索适用于若半径内点数不足最小阈值,切换为KNN搜索以固定数量补充邻域点。之后采用KD树(K-Dimensional Tree)加速邻域搜索。然后,使用最小二乘法,利用邻域中所有的点拟合出过点 P 的切平面,建立局部平面坐标系。由此将三维位移场投影到局部二维坐标系,转化为二维DIC应变的计算问题。之后需要对目标点位移梯度进行计算:在以点 P 为中心的邻域内用二维SG滤波器拟合位移场:

$$\begin{cases} u(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y \\ v(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases}, \quad (9)$$

式中: u, v 为切平面局部坐标系下的位移, a_0, b_0 为待拟合常数, a_1, a_2 分别是 $\partial u/\partial x, \partial u/\partial y$ 的估计值, b_1, b_2 分别是 $\partial v/\partial x, \partial v/\partial y$ 的估计值,可以使

用最小二乘法拟合参数。

最后,通过位移梯度数据计算应变,小变形假设下计算其Cauchy应变,其张量分别为:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_1 \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_2 \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = b_1 + a_2 \end{cases}. \quad (10)$$

大变形假设下计算其Green-Lagrange应变,应变张量分别为:

$$\begin{cases} E_{xx} = a_1 + \frac{1}{2}(a_1^2 + b_1^2) \\ E_{yy} = b_2 + \frac{1}{2}(a_2^2 + b_2^2) \\ E_{xy} = \frac{1}{2}(a_2 + b_1) + \frac{1}{2}(a_1a_2 + b_1b_2) \end{cases}. \quad (11)$$

主应变是应变张量的特征值,表示在某一点沿特定方向(主方向)的正应变。当坐标系旋转到主方向时,剪应变分量为零,同时正应变达到极值,本研究中由于柔性屏在弯折过程中主要受到压应变,即工程主应变2。因此,后续云图采用工程主应变2表征柔性屏的应变分布。

5 测量实验与结果

5.1 实验系统

实验系统装置如图5所示,柔性屏样品固定在支撑平台上,其表层为喷涂的蓝色荧光散斑,显示层为屏幕自发光红色散斑支撑平台可围绕旋转轴进行弯折操作,支撑板两侧的对称性确保了加载过程的均匀性,避免了非对称加载对应变测量的影响。如图6所示,实验中在柔性屏表层喷涂了蓝色的荧光散斑,而显示层上通过屏幕显示出红色散斑以同时测量柔性屏表层与显示层的全场应变。采用紫外光源作为激发光源,用于激发柔性屏上的荧光标记材料,使其发射对应波长的荧光。紫外光以适当角度照射到柔性屏样品上,以确保荧光信号清晰。

系统中布置两台相机(相机1和相机2),分别从不同视角采集柔性屏在弯折过程中的图像。通过调整双相机位置,使屏幕位于相机视窗中

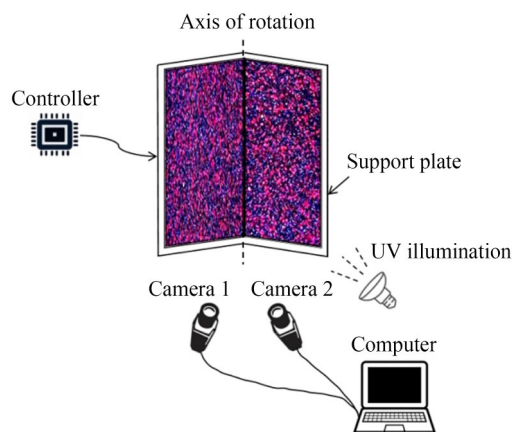


图 5 柔性屏多层应变同步测量实验系统示意图

Fig. 5 Schematic of synchronous multilayer strain measurement experimental system for flexible displays

心,确保图像清晰。加载开始前,先拍摄一组柔性屏未加载状态下的参考图像作为基准,然后通过支撑板逐步驱动柔性屏弯折,加载过程中双相机同步采集屏幕的散斑图像,直至弯折结束。结合数字图像相关算法对采集到的散斑图进行分析,提取柔性屏各层在加载过程中产生的位移场与应变场。

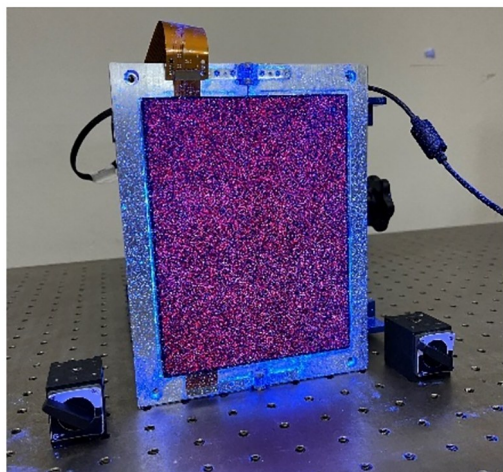


图 6 喷涂散斑与显示散斑

Fig. 6 Image of sprayed speckle and displayed speckle

实验装置如图 7 所示,所使用的相机型号为 JAI Apex AP-3200T-USB。它是一款基于 3 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 棱镜的工业 RGB 相机,可将彩色图像的各颜色分量分开。

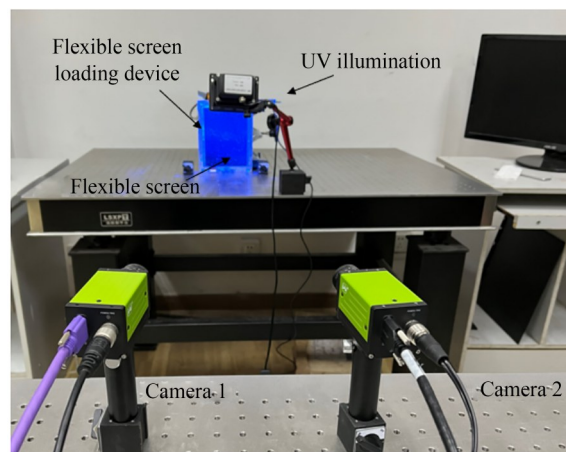


图 7 柔性屏多层应变同步测量实验装置

Fig. 7 Experimental setup for synchronous multilayer strain measurement of flexible displays

5.2 实验结果

图 8 为柔性屏加载过程中 3 个折叠状态的工程主应变 2 云图(体现压应变)。从图 8(a)可以看出,折叠前(两折叠平面夹角为 180°)表层的应变分布较为均匀,未显示出明显的应变集中现象,说明表层处于初始无负载状态。在折叠中期(两折叠平面夹角为 90°),由图 8(b)可见表层的应变分布发生变化,局部区域出现应变集中现象,而显示层在折叠过程中产生了较大的应变梯度,尤其是在靠近折叠轴的区域,应变变化更加显著。由图 8(c)可以看出,在折叠加剧的阶段(两折叠平面夹角为 70°),表层应变分布更加复杂,部分区域的应变进一步集中,并且显示层的应变梯度进一步增大,折叠轴附近区域的应变变化尤为明显。这是由于内层在弯折时承受的压缩应力较大,从而导致应变值更高。

在折叠过程中,表层和显示层均出现了明显的应变集中区域,其中显示层的应变集中现象更加突出。这与柔性屏的多层结构特点有关。由于两个膜层的材料属性与厚度不同,因此在折叠过程中存在应变不匹配现象。表层的应变集中区域相对分散,应变值整体较小,显示层的应变集中现象更为显著,应变梯度较大。这可能是因为显示层位于结构中更底层的位置,受到的弯曲和压缩应力更大,在整个折叠过程中,可以观察到应变分布逐步由均匀过渡到集中。这种变化过程说明,柔性屏的膜层在弯折加载下逐步从初

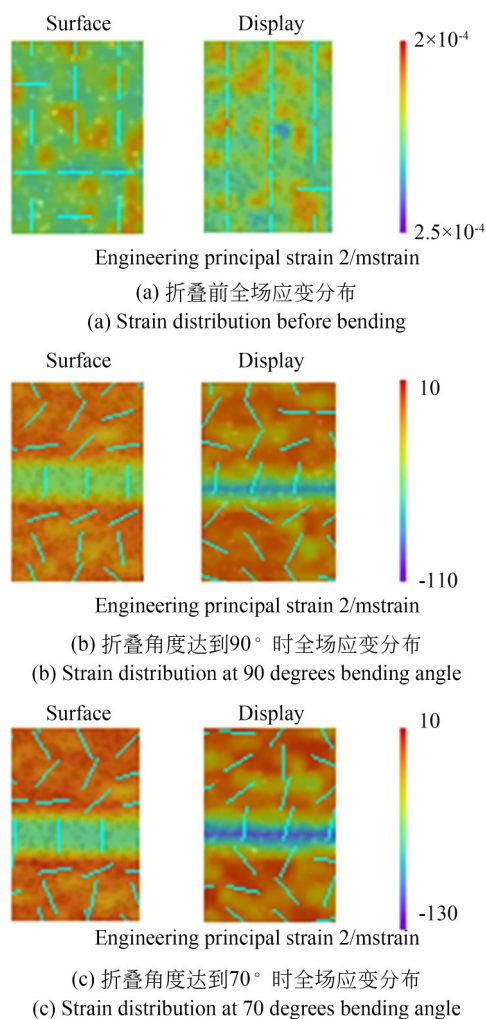


图 8 工程主应变 2 云图

Fig. 8 Cloud map of engineering principal strain 2

始无应力状态进入复杂应力状态,特别是靠近折叠轴的区域最易出现应变集中。

在实验中,为进一步定量分析柔性屏不同膜层的应变分布规律,结合应变场测量云图,从云图中选取了一条穿过折叠轴的纵向截线(沿弯折方向的中心线),提取表层与显示层的应变数据,并绘制应变曲线进行对比分析,如图 9 所示。由于系统受噪声影响较大,因此对系统的噪声进行了平滑处理。在折叠中两个中间过程的应变曲线如图 10 所示。

从图 10 可以看出,表层与显示层的应变分布规律与应变云图中的特征保持一致,均表现出折叠轴附近的应变集中现象。表层和显示层的应变幅值差异较大,显示层的最大应变的幅值显著高于表层,这也符合多层结构弯折过程中的物理

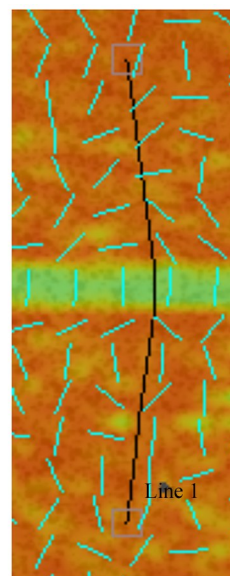


图 9 跨折叠区域截取的表征应变分布的采样线

Fig. 9 Sampled line to demonstrate strain distribution crossing bending direction

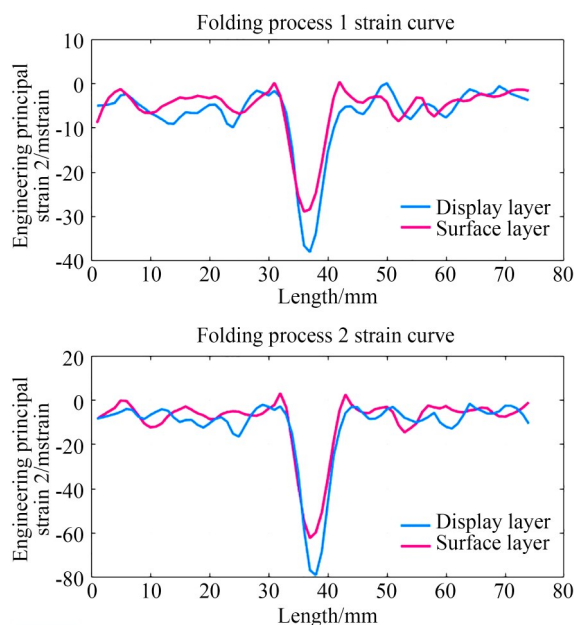


图 10 在应变场测量中采样线上的应变

Fig. 10 Strain on sampling line in strain field measurements

特性。这种差异性反映了柔性屏各膜层在受力特性上的不一致性,尤其是在靠近折叠轴的区域,各层间的应变不匹配现象更为突出。通过应变曲线的定量分析,实验进一步验证了多层应变同步测量方法的有效性,同时也为深入理解柔性屏在弯折过程中的力学行为提供了重要的参考

依据。这一结果将有助于柔性屏在实际应用中的结构优化和性能提升。

6 结 论

本文提出了一种基于多通道 DIC 技术的柔性屏多层同步应变测量方法。该方法有机融合了显示层显示散斑、表面荧光喷涂及中间层荧光掺杂 3 种散斑制备方式,通过 3D-DIC 算法对散斑进行计算,在同一测量周期内实现对保护层、OLED 显示层及任意中间层的应变分布进行非接触式同步测量。该测量方法结合彩色多通道成像技术可以分别解算各通道下的亚像素位移场与应变场。实验中系统在面内与面外的变形测量精度分别达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $5\text{ }\mu\text{m}$,充分满足柔性屏结构设计与性能测试中对多层同步测量的需求。实验结果表明,在弯折过程中,柔性显示屏各膜层的应变分布存在显著差异:表层整体应变水平低于显示层,且在靠近折叠轴区域出现局部应变集中;而显示层则表现出更陡峭的应变梯度,折叠轴附近易形成明显的应变集中区,这一现象是压缩与弯曲耦合作用下的典型力学响应。上述发现揭示了多层复合结构在折叠变形过程

中的复杂力学行为,为基于实验数据的柔性屏力学性能优化提供了重要参考。通过对应力分布的均匀化设计,可有效降低应变集中风险,从而提升器件的可靠性与使用寿命。该方法克服了传统散斑技术在复杂结构应用中的局限性,具有较高的信噪比和精确度。

在未来的研究中,可以进一步与制造商合作,通过在中间层掺杂绿色荧光剂,与表层(蓝色荧光散斑)和显示层(红色显示散斑)形成更多通道的同步测量研究,在硬件上可引入多相机同步拍摄,从不同角度获取图像,弥补盲区并通过多视点融合增强测量稳定性。此外,还可构建自动化加载与采集平台,通过按预设弯折循环同步触发相机,实时记录各层应变随循环次数的变化,实现在线疲劳性能评估。

作者贡献声明:

李骏睿:测量方法提出,实验设计及指导;

曾湘文:实验测量、数据整理分析与论文撰写;

周露:论文审核与编辑,数据整理;

宋浩林:实验数据分析;

王永红:研究执行管理和协调。

参考文献:

- [1] KARL L. Efficient and flexible solution[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12): 716-718.
- [2] LEE S M, CHO Y, KIM D Y, *et al.* Enhanced light extraction from mechanically flexible, nano-structured organic light-emitting diodes with plasmonic nanomesh electrodes[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1240-1247.
- [3] 薛宗伟. 基于 Abaqus 的光学胶动态力学行为分析[J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(S2): 404-407.
XUE Z W. Analysis on dynamic mechanical behavior for optical adhesive based on Abaqus[J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(S2): 404-407. (in Chinese)
- [4] 孙金媛,黄家健,周华俊,等. 膨胀单体改性液态光学胶的制备及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(2): 155-159.
SUN J Y, HUANG J J, ZHOU H J, *et al.* Preparation of modified liquid optical clear adhesives containing spiro-orthocarbonate expanding monomer[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(2): 155-159. (in Chinese)
- [5] TU H, ZHU C Y, GAO Z R, *et al.* Calibration of coherent optical fiber bundle with LCD screen for deformation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107372.
- [6] 刘正周,廖敦明,贾永臻,等. 可折叠 OLED 屏幕的弯折应力仿真[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(7): 555.
LIU ZH ZH, LIAO D M, JIA Y ZH, *et al.* Stress simulation of foldable OLED screen bending[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(7): 555. (in Chinese)
- [7] 郑宏兵,汪洋,王宁,等. 基于 COF 区弯折的柔性屏金属层应力影响因素分析[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1121-1127.
ZHENG H B, WANG Y, WANG N, *et al.* Analysis of metal layer in flexible screen on COF bending[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Dis-*

- plays, 2021, 36(8): 1121-1127. (in Chinese)
- [8] 郑宏兵, 胥奇, 梁钊, 等. 柔性屏 COF 弯折结构的正交试验优化设计[J]. 液晶与显示, 2024, 39(9): 1205-1213.
ZHENG H B, XU Q, LIANG ZH, *et al.* Optimization of flexible-screen COF bending structures by orthogonal design of experiment[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(9): 1205-1213. (in Chinese)
- [9] 黄智豪, 王金彪, 高浩宇, 等. 基于内聚力模型的柔性屏贴附及影响因素[J]. 液晶与显示, 2022, 37(7): 840-848.
HUANG ZH H, WANG J B, GAO H Y, *et al.* Simulation and influencing factor of flexible screen based on cohesion model[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(7): 840-848. (in Chinese)
- [10] 胡小飞, 龙震华, 孙直. 含超薄胶层柔性屏折叠行为的数值模拟[J/OL]. 工程力学, 2024: 1-8. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GCLX20241223005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
HU X F, LONG Z H, SUN Z. Numerical simulation of folding in flexible screens with ultra-thin adhesive layers [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2024: 1-8. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GCLX20241223005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [11] 刘辉, 梁晋, 叶美图, 等. 基于数据映射优化的航空机匣变形测量偏差比对[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20): 2930-2942.
LIU H, LIANG J, YE M T, *et al.* Comparison of deviation in aircraft casing deformation measurement based on data mapping optimization[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(20): 2930-2942. (in Chinese)
- [12] LI J, DAN X, XU W, *et al.* 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 95: 1-7.
- [13] 李骏睿, 王欢庆, 潘万林, 等. 基于数字图像相关的柔性屏弯折应变测量分析(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(3): 0312001.
LI J R, WANG H Q, PAN W L, *et al.* Analysis of flexible screen bending strain measurement based on digital image correlation(invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(3): 0312001. (in Chinese)
- [14] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 556-567.
PAN B, XIE H M, LI Y J. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(6): 556-567. (in Chinese)
- [15] WANG Y, GAO Z, FANG Z, *et al.* Rotating vibration measurement using 3D digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2023, 63(3): 565-579.
- [16] 赵华涛, 唐新桥, 陈振宁. 基于多光谱数字图像相关的全场厚向应变测量[J]. 光学学报, 2024, 44(11): 1112001.
ZHAO H T, TANG X Q, CHEN ZH N. Full-field thickness-direction strain measurement based on multispectral digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(11): 1112001. (in Chinese)
- [17] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] ZHU L M, LUO H G, ZHANG X. Uncertainty and sensitivity analysis for camera calibration[J]. *Industrial Robot*, 2009, 36(3): 238-243.
- [19] WANG B, PAN B. Random errors in digital image correlation due to matched or overmatched shape functions [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 1717-1727.
- [20] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [21] 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1061-1069.
ZHU F P, GONG Y, BAI P X, *et al.* Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1061-1069. (in Chinese)

- [22] 刘刚, 龚钰权, 张禾, 等. 基于小波变换优化 EEMD 结合 SG 的红外光谱降噪算法[J]. 红外技术, 2024, 46(12): 1453-1458.
- LIU G, GONG Y Q, ZHANG H, *et al.* Infrared

spectral noise reduction algorithm based on wavelet transform optimized EEMD combined with SG [J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(12): 1453-1458. (in Chinese)

作者简介:



李骏睿(1990—),男,博士,副研究员,2019年于美国奥克兰大学获得博士学位,2019年至2021年在美国密西西比大学国家物理声学中心担任博士后研究员,主要研究领域为全场光学精密测量技术,包括数字图像相关、激光散斑干涉、激光多普勒技术等方面。E-mail: lijunrui@hfut.edu.cn