文章编号:1001-4888(2025)06-0711-10

栅线投影与数字图像相关融合的高精度测量方法*

陈振锟[1], 陈元强[1], 王栋梁[1], 刘聪[1], 刘晓鹏[2]
(1. 南京理工大学 物理学院, 江苏南京 210094; 2. 山东科技大学 计算机科学与工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 栅线投影轮廓术(Fringe Projection Profilometry, FPP)与数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)2 种方法相融合的测量系统,结合了前者的时域测量和后者的空域测量优势,可实现时空域的高精度测量。在融合系统中,散斑图像噪声会严重影响系统测量精度,为此,本文提出了一种逐像素点的散斑图像噪声迭代抑制方法,并通过理论推导深入分析了该方法的降噪机理。首先,利用数值仿真分别研究了图像序列数量及噪声水平对方法性能的影响;然后,通过楔形块纯平移实验和亚克力梁四点弯实验进一步验证了方法的有效性;最后,实验结果与传统三维数字图像相关(Three-Dimensional Digital Image Correlation, 3D-DIC)方法的结果对比表明,本文方法能够显著降低散斑噪声所引起的测量误差。数值仿真和实验结果证明了本文所提出的方法可以有效提高位移与应变测量的精度。

关键词: 数字图像相关; 栅线投影轮廓术; 高精度三维测量; 噪声迭代抑制
中图分类号: O348.1 **文献标志码**: A DOI: 10.7520/1001-4888-25-076

0 引言

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法由于具有无损、非接触、高精度等优点,目前已在航空航天、土木工程、机械加工、汽车制造等领域的变形及损伤研究中被广泛应用[1-3]。它利用物体表面的自然纹理或人工喷制的散斑,通过图像子区间的相关计算实现空间点的精确匹配,从而实现被测物体的三维位移和变形测量。然而,由于 DIC 方法存在着空间子区上的平滑性,当物体表面的形貌或变形较为复杂时,会导致测量精度下降。栅线投影轮廓术(Fringe Projection Profilometry, FPP)可以采用时域相移法对复杂形貌物体进行逐像素点高精度三维形貌测量[4-6],然而,它无法对物体表面的点进行标记,难以实现三维变形测量。因此,可以结合 2 种方法的时空域测量优点,实现物体的高精度三维形貌和变形测量[7-9]。在实际融合测量过程中,因为散斑图像中的噪声会直接影响图像子区相关计算与相位信息提取的准确性,所以图像噪声成为制约 FPP 与 DIC 融合系统测量精度的关键因素之一。

学者们在噪声去除方面进行了大量研究,传统的去噪算法主要有基于频域的小波变换[10]和基于空域的滤波法[11]等。基于频域的算法要求噪声信息和散斑信息在频谱上有所区分,然而,噪声与散斑在图像中都较为复杂,难以通过频域分离实现散斑图像的噪声抑制。基于空域的滤波法则会丢失一部分散斑图像的纹理特征,在去除噪声的同时会滤除散斑图像的部分信息,降低散斑图像的对比度及 DIC 方法的测量精度。CHENG 等[12]提出一种融合 DIC 与深度学习的方法,并在模型训练中引入不同强度的随机噪声,从而增强了该方法的抗噪声能力。但是,基于深度学习的去噪方法需要进行预训练,计算

* **收稿日期**: 2025-04-07; **修回日期**: 2025-05-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(11802132);中央高校基本科研业务费专项资金项目(30923011022);江苏省自然科学基金项目(BK20231454);中国博士后科学基金项目(2020M671493);江苏省博士后科研资助计划项目
通信作者: 刘聪(1988—),男,博士,副教授。主要研究领域:光测实验固体力学。Email: LiuC@njust.edu.cn

资源消耗较高。YE 等[13]通过引入应变滤波器对 DIC 方法计算出的位移场进行平滑处理,提高了应变测量精度。但是,当前针对散斑图像本身高效噪声抑制方法的研究仍较为缺乏,有待进一步深入研究。

为了抑制散斑图像噪声,本文基于 DIC 方法可以实现图像子区中心的高精度定位的优势,通过将 FPP 与 DIC 方法融合,提出了一种逐像素点的散斑图像噪声迭代抑制方法(简称去噪方法)。本文所提出的去噪方法通过参考图像与变形图像的高精度子区灰度对应,实现参考图像和变形图像的噪声抑制。

1 基本原理

图 1 为 FPP 与 DIC 的融合测量系统示意图,该系统主要由 1 台黑白工业相机与 1 台彩色投影仪组成。首先在被测物体表面通过水转印的方式制备红蓝散斑,投影仪投射黑白栅线图案时,相机采集到的为栅线图像,如图 1(a)所示;投影仪投射红色图案时(彩色图参见 http://sylx.ustc.edu.cn),相机采集到的是物体表面的散斑图像,如图 1(b)所示。

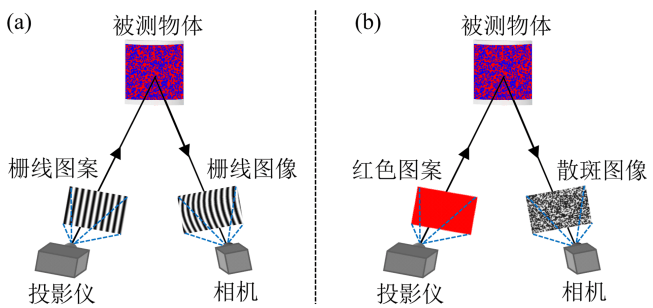

图 1 FPP 与 DIC 融合测量系统示意图:(a)相机采集栅线图像过程;(b)相机采集散斑图像过程

Fig. 1 Schematic diagram of the combined FPP and DIC measurement system: (a)camera-based fringe images acquisition process;(b)camera-based speckle images acquisition process

本系统的完整测量流程如图 2 所示,主要分为系统标定、相位求解(见 1.1 节)、三维坐标求解(见 1.2 节)、逐像素点噪声迭代抑制(见 1.3 节)、三维位移和应变求解(见 1.4 节)。

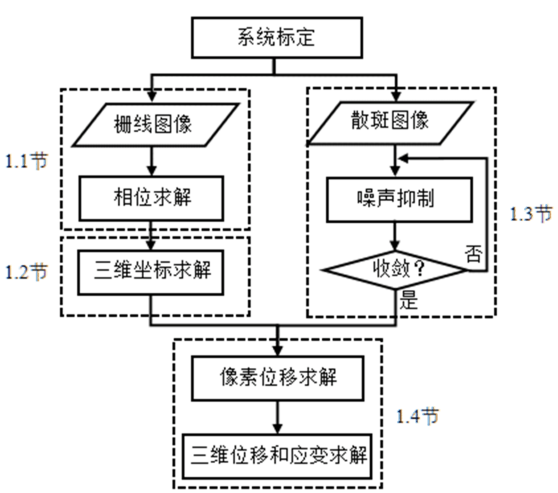

图 2 FPP 与 DIC 融合系统测量步骤流程图

Fig. 2 Flowchart of the measurement procedure for the combined FPP and DIC system

1.1 相位求解

栅线投影法需要从相机采集的栅线图像中提取出相位信息。目前,常用的相位求解方法主要有傅里叶变换法及相移法等。傅里叶变换法仅需单幅栅线图像即可得到相位值,但需要恰当选取一阶频域窗口。而相移法可以通过多幅时域相移栅线图像进行逐像素点相位计算,并用于高精度测量。因此,本文采用相移法将正弦光栅图案投影至物体表面,相机采集到的变形光栅图像的灰度为

$$I_i(u_c,v_c)=I_a(u_c,v_c)+I_b(u_c,v_c)\cos[\varphi_w(u_c,v_c)+\varphi_i] \tag{1}$$

式中:(u_c,v_c)为相机采集的相移图像中像素点的坐标;$I_i(u_c,v_c)$为相机采集的第 i 步($i=1,2,3$)相移图像中像素点(u_c,v_c)的灰度值;$I_a(u_c,v_c)$和 $I_b(u_c,v_c)$分别为该点的背景灰度与调制灰度;$\varphi_w(u_c,v_c)$为待求解的相位值;φ_i 为相移的相位值。在本文所用的三步相移法中,$\varphi_i=(i-1)2\pi/3$,$i=1,2,3$。通过最小二乘法计算出被测物体表面的相位分布,如式(2)所示

$$\varphi_w(u_c,v_c)=\arctan\left\{\frac{\sqrt{3}\,[I_1(u_c,v_c)-I_3(u_c,v_c)]}{2I_2(u_c,v_c)-I_1(u_c,v_c)-I_3(u_c,v_c)}\right\} \tag{2}$$

反正切函数求出的相位值 $\varphi_w(u_c,v_c)$ 被包裹在 $(-\pi,\pi]$ 区间内，这种区间限制导致了相位值的不连续，因此，这些被包裹的不连续相位需要通过相位解包裹算法[14]进行处理，以恢复连续的绝对相位。通过空域法[15]可获得绝对相位 $\varphi_u(u_c,v_c)$。分别向物体表面投射水平方向（用上标 h 表示）和竖直方向（用上标 v 表示）的相移栅线图案，可以依次得到竖直和水平方向上的绝对相位值 $\varphi_u^v(u_c,v_c)$ 和 $\varphi_u^h(u_c,v_c)$。

1.2　三维坐标求解

根据成像和投影的几何模型，可以将投影仪看作 1 台逆向相机[16]，本系统利用 1.1 节中得到的绝对相位值来建立投影仪像素坐标与相机像素坐标的映射关系。假设世界坐标系下待求解的 1 个点为 Q，对应到相机像素坐标系下的坐标为 (u_c,v_c)，则该点对应到投影仪像素坐标系下的像素坐标 (u_p,v_p) 可表示为

$$u_p=\frac{\varphi_u^h(u_c,v_c)\,T_v}{2\pi},\ v_p=\frac{\varphi_u^v(u_c,v_c)\,T_h}{2\pi} \tag{3}$$

式中：T_v 表示竖直栅线周期；T_h 表示水平栅线周期。

利用文献[16]中的方法，可以得到融合系统的标定参数。结合本节中获得的相机像素坐标与投影仪像素坐标信息，并利用标定参数建立成像几何模型，即可通过最小二乘法求解点 Q 在世界坐标系下的三维坐标。

1.3　逐像素点噪声迭代抑制

在 FPP 与 DIC 融合系统中，采用 DIC 方法求解参考图像与变形图像对应点之间的像素位移。由于散斑图像噪声会影响 DIC 方法的位移测量精度，因此本节提出了一种基于逐像素点迭代的散斑图像噪声抑制方法，该方法的去噪过程如图 3 所示。

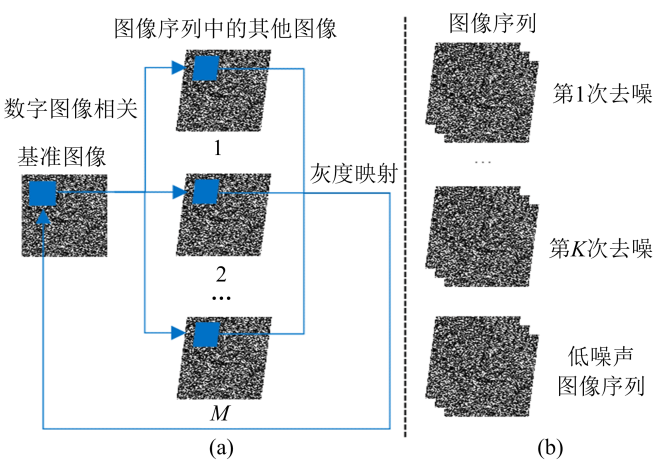

图 3　逐像素点噪声迭代抑制过程：(a)数字图像相关；(b)噪声迭代抑制

Fig. 3　Pixel-wise noise iterative suppression process：(a)DIC；(b)noise iterative suppression

假设相机采集了 1 幅参考图像及 M 幅变形图像，将它们共同组成数量为 $M+1$ 的图像序列。首先，将序列中的任意 1 幅图像作为当前基准图像与序列中其他 M 幅图像进行逐像素点 DIC，得到该图像整像素点对应于其他 M 幅图像中的亚像素位置。然后，利用高精度插值算法提取这些亚像素位置处的灰度值，并取平均映射变换代替基准图像对应点的灰度值，完成整幅图像的去噪，基准图像的去噪过程如图 3(a)所示。对序列中的所有图像重复上述步骤，即可完成整组图像序列的 1 次去噪。最后，重复整个去噪过程直到第 K 次与第 $K-1$ 次去噪结果满足收敛条件，整个去噪过程结束，整个去噪过程如图 3(b)所示。将第 K 次与第 $K-1$ 次迭代后的基准图像与其他图像进行 DIC，得到平均像素位移，当相邻 2 次平均像素位移的绝对差值小于 10^{-4} 像素时，本方法收敛，同时设置 $K_{max}=7$ 为最大迭代次数。

为了分析本文所提出的噪声迭代抑制方法的机理，考虑图像沿 x 方向的一维运动，对基准图像与

序列中除其自身外的其余全部 M 幅图像进行研究,假设基准图像上某一图像点(i,j)的灰度噪声值为 $N_{\langle i,j\rangle}$,对应于第 m 幅其他图像中的理想亚像素位置(ξ,j),其灰度噪声值为 $N^m_{(\xi,j)}$,通过 DIC 计算得到的亚像素位置为(η,j),其灰度噪声值 $N^m_{\langle\eta,j\rangle}$ 的表达式为

$$N^m_{\langle\eta,j\rangle}=N^m_{\langle\xi,j\rangle}+\nabla I'^m_{x\langle\xi,j\rangle}\times e_{\mathrm{u}} \tag{4}$$

式中:$\nabla I'^m_{x\langle\xi,j\rangle}$ 为第 m 幅其他图像中亚像素位置(ξ,j)沿 x 方向的灰度梯度;e_{u} 为采用 DIC 方法求出的位移误差。假设基准图像与其他图像的理想灰度值分布相同,式(4)可以写为

$$N^m_{\langle\eta,j\rangle}=N^m_{\langle\xi,j\rangle}+\nabla I_{x\langle i,j\rangle}\times e_{\mathrm{u}} \tag{5}$$

根据文献[17]中的误差公式,可以得到 e_{u} 的表达式

$$e_{\mathrm{u}}=\frac{\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}[\nabla I_{x\langle i,j\rangle}\times n_{\langle i,j\rangle}]-\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}[\nabla I_{x\langle i,j\rangle}\times N_{\langle\xi,j\rangle}]}{\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}[\nabla I_{x\langle i,j\rangle}]^2} \tag{6}$$

式中:$\nabla I_{x\langle i,j\rangle}$ 为基准图像像素点(i,j)沿 x 方向的灰度梯度,通常选取像素大小为 $n\times n$ 的正方形子区。第 1 次映射变换之后基准图像中像素点(i,j)的灰度噪声值 $N'_{\langle i,j\rangle}$ 为

$$\begin{aligned}N'_{\langle i,j\rangle}&=\frac{\sum_{m=1}^{M}[N^m_{\langle\xi,j\rangle}+e_{\mathrm{u}}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}]}{M}\\&=\frac{\sum_{m=1}^{M}N^m_{\langle\xi,j\rangle}}{M}+\frac{M\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}N_{\langle i,j\rangle}-\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}N^m_{\langle\xi,j\rangle}}{M\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}[\nabla I_{x\langle i,j\rangle}]^2}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}\end{aligned} \tag{7}$$

由于灰度梯度与噪声的随机特性,且子区相对比较大,随着变形图像数目 M 增大,有

$$\sum_{m=1}^{M}N^m_{\langle\xi,j\rangle}\approx 0,\ \sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}N_{\langle i,j\rangle}\approx 0,\ \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\nabla I_{x\langle i,j\rangle}N^m_{\langle\xi,j\rangle}\approx 0 \tag{8}$$

根据式(8)的结论可知,式(7)的结果约等于 0,这一结果表明:本文所提出的去噪方法通过在多幅图像中对同一像素位置的灰度值取平均,能够有效削弱基准图像中孤立噪声点的影响;该过程通过迭代映射变换,使各像素点的灰度值逐步收敛至稳定状态,从而可显著抑制图像噪声。

为进一步明确式(7)中噪声误差项的物理背景及理论依据,本文结合文献[17]的研究进行简要说明。设 u_0 为图像中某像素点的真实平移量,u'为 DIC 方法估计的位移值,则两者之差 $u_{\mathrm{e}}=u'-u_0$ 定义为像素匹配误差。假设图像灰度噪声是均值为 0、标准差为 σ 的独立高斯噪声,在此基础上,基于最小二乘法匹配准则推导出误差表达式为

$$u_{\mathrm{e}}=\frac{\sum[N_{\langle i,j\rangle}-N_{\langle i+u_0,j\rangle}]\cdot\nabla I_{x(i,j)}}{\sum[\nabla I_{x(i,j)}]^2} \tag{9}$$

式中:$N_{\langle i,j\rangle}$ 和 $N_{\langle i+u_0,j\rangle}$ 分别为参考图像与变形图像在对应像素位置处的灰度噪声;$\nabla I_{x\langle i,j\rangle}$ 为参考图像在 x 方向的灰度梯度;u_0 为理论匹配位置处的初始位移。式(9)揭示了噪声通过灰度梯度加权在子区中传播并转化为位移误差的机制,在式(9)的基础上,进一步给出方差为

$$\sigma^2(u_{\mathrm{e}})=\frac{2\sigma^2}{\sum[\nabla I_{x(i,j)}]^2} \tag{10}$$

式(10)表明噪声对位移测量误差的影响与灰度噪声强度呈正相关,与图像梯度的平方和呈负相关。本文所提出的多图像灰度均值替代方法,正是基于式(10)所揭示的统计规律,通过迭代消除随机噪声对匹配精度的影响,降低 u_{e} 的方差,提高图像配准和位移估计精度。

1.4 三维位移和应变求解

得到低噪声图像序列后,即可采用 DIC 方法求解参考图像与变形图像对应点之间的像素位移。假设变形前 Q 点的三维坐标为(x,y,z),对应于相机参考图像中的坐标为$(u_{\mathrm{c}},v_{\mathrm{c}})$,通过 DIC 方法得到该

点在某一变形状态图像当中的亚像素位置 (u'_c, v'_c)，在变形图中以该点为中心，选取大小为 4×4 的邻域整像素点，然后利用双三次样条插值对 x、y、z 3 个坐标分别进行插值，得到变形后亚像素位置的三维坐标 (x', y', z')，将该坐标与变形前三维坐标相减即可得到 Q 点的位移。

采用局部最小二乘法[18]求解应变，最小二乘法通过选取不同大小的应变窗口，可以实现三维变形场的应变测量。

2　数值模拟

为了验证本文提出的去噪方法的有效性，通过计算机对该方法进行了数值模拟，具体步骤为：首先，生成 1 张像素大小为 500×500 的散斑图像作为原始图像，如图 4(a)所示，其中散斑的直径为 5 像素。然后，随机生成均值为 0、标准差为 10 的服从高斯分布的随机噪声图像，其分布如图 4(b)所示，原始图像与随机噪声图像叠加得到参考图像。将原始图像分别沿水平方向平移 1 至 10 个像素，得到 10 幅整像素位移图像。采用图像裁剪的方式实现平移，可避免亚像素插值误差。这些整像素位移图像仅用于构造噪声图像序列，不作为标准参考值，也不参与后续的图像相关计算。接着对所有平移图像添加均值为 0、标准差为 10 的服从高斯分布的独立随机噪声作为变形图像。最后，选取不同数量的变形图像与参考图像组成图像序列，利用本文所提出的方法对图像序列进行噪声抑制。对每次迭代得到的低噪声参考图像与变形图像进行 DIC 运算，研究不同迭代次数与图像水平位移的绝对误差均值和标准差之间的关系，结果如图 5 所示。

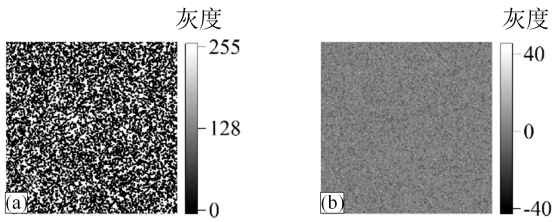

图 4　(a)原始图像的灰度分布；(b)添加高斯噪声的灰度分布

Fig. 4　(a)gray-level distribution of theoriginal image; (b)gray-level distribution with added Gaussian noise

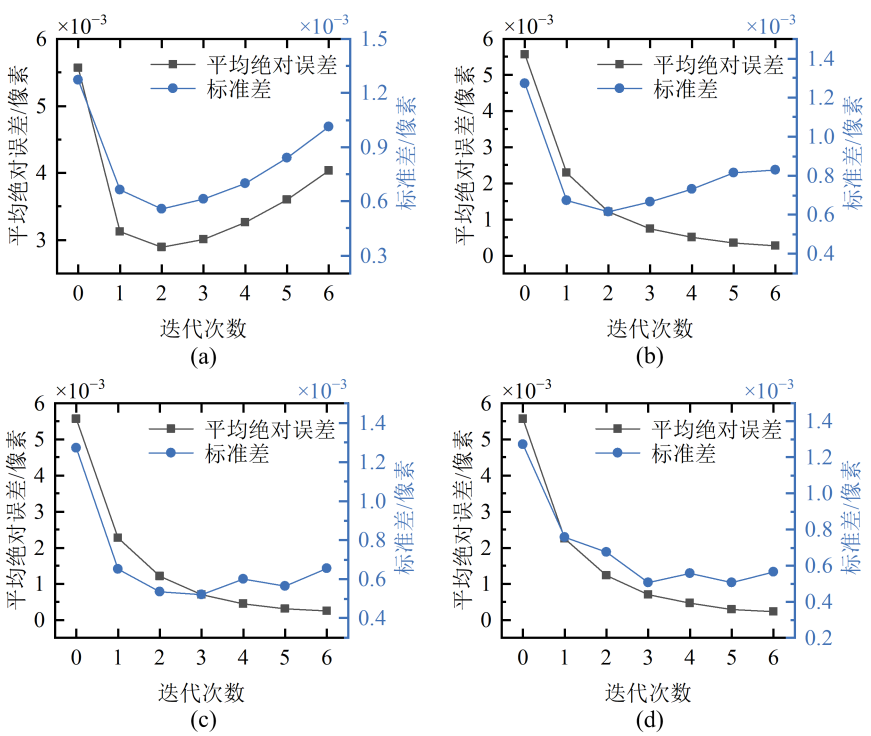

图 5　不同迭代次数与图像水平位移绝对误差均值和标准差之间的关系：(a)1 幅变形图像；(b)2 幅变形图像；(c)5 幅变形图像；(d)10 幅变形图像

Fig. 5　Relationship between iteration numbers and mean absolute error and standard deviation of horizontal image displacement: (a)1 deformed image; (b)2 deformed images; (c)5 deformed images; (d)10 deformed images

从图 5 中可以看出,对标准差为 10 的高斯随机噪声,本文所提出的去噪方法能有效地降低随机噪声的影响,显著提高测量的位移精确度。通过数值仿真结果可以发现,在采用本文所提出的去噪方法迭代 2 次的情况下,即使当变形图仅有 1 幅时,该方法仍可将由噪声引起的平均绝对误差从约 5.5×10^{-3} 像素降低至 2.8×10^{-3} 像素,降低幅度约为 49.1%;标准差从约 1.3×10^{-3} 像素降低至 0.6×10^{-3} 像素,降低幅度约为 53.8%。当变形图像为 2、5 和 10 幅时,该方法在迭代 2 次后可将由噪声引起的平均绝对误差分别降低至约 1.3×10^{-3}、1.2×10^{-3} 和 1.1×10^{-3} 像素,降低幅度分别约为 53.8%、61.5% 和 46.2%;标准差从约 1.3×10^{-3} 像素分别降低至约 0.6×10^{-3}、0.5×10^{-3} 和 0.7×10^{-3} 像素,降低幅度分别约为 72.9%、81.3%和 60.4%。在迭代次数超过 3 次后,平均误差和标准差均趋于稳定,进一步迭代对误差改善的增益有限。因此,在实际应用中建议迭代 2 至 3 次即可兼顾抑噪效果与计算效率。

为了验证本文所提出的去噪方法在不同噪声水平下的有效性,设计了多噪声水平的对比实验。首先选取 1 幅原始图像及 2 幅平移图像,对它们分别添加均值为 0、标准差为 20 及 30 的高斯噪声,然后采用本文所提出的去噪方法对添加高斯噪声后的图像进行噪声抑制,对每次迭代得到的低噪声图像进行 DIC 运算,以研究不同噪声水平下迭代次数与图像水平位移的绝对误差均值和标准差之间的关系。

图 6 中的结果表明,本文所提出的去噪方法在各类灰度噪声条件下均能有效降低由噪声引起的测量误差,误差标准差降低超过 40%。在经过 2 次迭代噪声抑制后,该方法对标准差为 20 与 30 的高斯噪声引起的误差标准差分别从约 2.1×10^{-3} 像素和 4.8×10^{-3} 像素降低至 1.1×10^{-3} 像素和 2.6×10^{-3} 像素,降低幅度约为 47.6%和 45.8%。因此,针对不同水平的灰度噪声,本文所提出的去噪方法均展现出显著的噪声抑制能力。

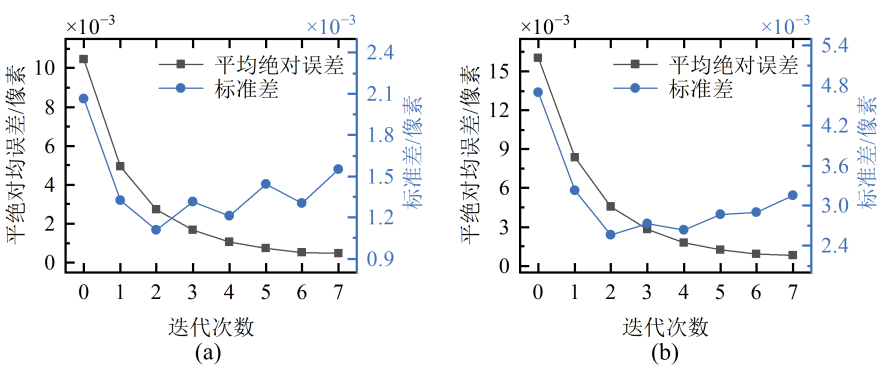

图 6 不同噪声水平下迭代次数与图像水平位移绝对误差均值和标准差之间的关系:(a)标准差为 20 的高斯噪声;(b)标准差为 30 的高斯噪声

Fig. 6 Relationship between iteration numbers and mean absolute error and standard deviation of horizontal image displacement under different noise levels:(a)Gaussian noise with standard deviation of 20;(b)Gaussian noise with standard deviation of 30

3 实验验证

为了验证本文所提出的去噪方法在实际应用中的位移与应变测量精度,设计了楔形块纯平移实验及亚克力梁的四点弯实验,并与常规三维数字图像相关方法(Three-Dimensional Digital Image Correlation,3D-DIC)的结果进行了比较。

3.1 楔形块纯平移实验

实验装置包含 1 台型号为 DLP 6500、像素分辨率为 1 920×1 080 的投影仪及 3 台型号为 Ueye IDS 3370、像素分辨率为 2 048×2 048 的工业相机,所有相机均配备 Kowa LM35SC 35 mm 焦距的工业镜头。实验装置如图 7 所示,相机 2 和 3 组成 3D-DIC 测量系统,相机 1 与投影仪组成 FPP 与 DIC 融合测量系统,待测物体为楔形块。

实验通过定位精度为 3 μm 的高精度平移台对楔形块平移 0.1 mm,相机采集平移前后的图像,分别采用传统 3D-DIC 方法和本文所提出的融合方法计算得到位移及应变,结果如图 8 所示。对理想刚

体的平移运动，理论应变值应为 0，从图 7 中可以看出，对 3D-DIC 测量系统，由于 2 台相机与楔形块表面的夹角较大，图像存在较大的透视畸变，从而造成计算出来的误差偏大。对 FPP 与 DIC 的融合测量系统，图像中每个点的三维坐标均独立计算，位移误差比 3D-DIC 系统小，证实了融合测量系统在形貌较为复杂物体位移计算上的优越性。由于 DIC 方法存在着空间区域上的平滑性，在楔形块形貌变化的位置 3D-DIC 方法计算的结果较差，而 FPP 与 DIC 的融合测量系统可以很好地描述楔形块的中间位置的突变变形。利用本文所提出方法对图像进行噪声抑制后，融合方法计算的位移和应变云图颜色变浅，位移和应变测量精度提高。为了量化比较实验结果，计算感兴趣区域内的总位移和平移方向上应变误差的平均值及标准差，结果见表 1。

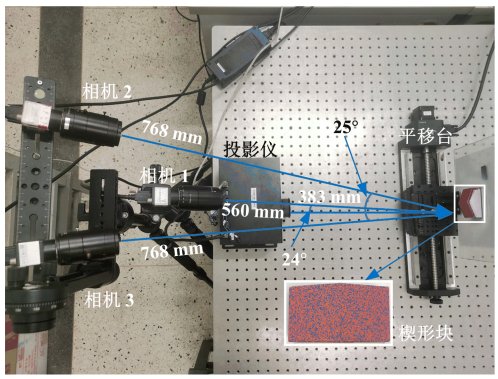

图 7　纯平移实验装置

Fig. 7　Diagram of the pure translation test experimental setup

从表 1 中可以看出，本文所提出的去噪方法可以有效降低由噪声引起的误差，从而降低融合系统计算出来的三维位移和应变误差。楔形块平移 0.1 mm 的工况下，噪声抑制前的位移误差平均值为 3.65 μm，应变误差平均值为 357 με。噪声抑制后的位移误差平均值为 2.87 μm，应变误差平均值为 299 με，相较去噪前位移测量精度提高约 21.4%，应变精度提高约 16.2%。

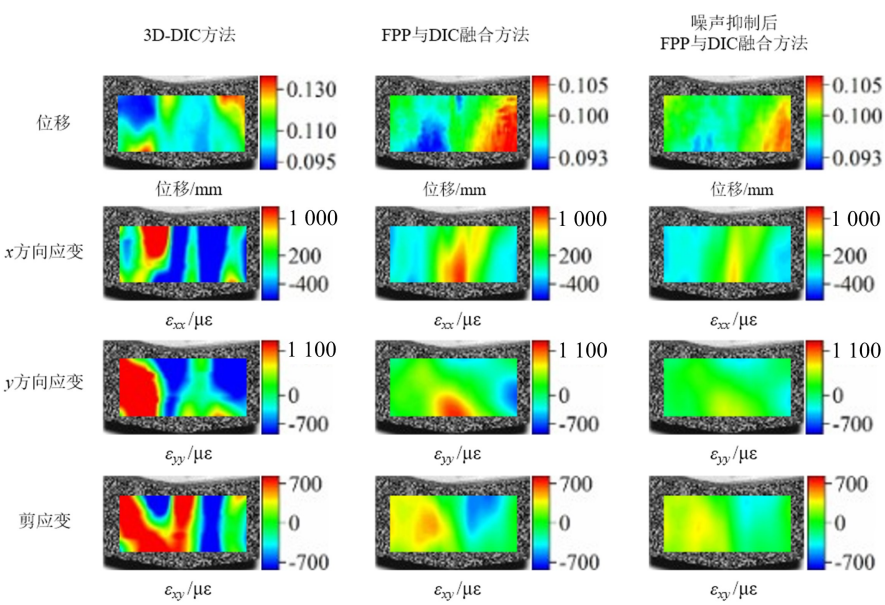

图 8　3 种方法的位移和应变计算结果

Fig. 8　Displacement and strain calculation results with three different methods

表 1　噪声抑制前后位移与应变的误差统计

Tab. 1　Error statistics of displacement and strain before and after noise suppression

位移和变形	误差平均值		误差标准差	
	未抑制	抑制后	未抑制	抑制后
位移/μm	3.65	2.87	0.37	0.35
应变/με	357	299	77	62

3.2　亚克力梁的四点弯实验

为了验证本文所提出的去噪方法在实际变形测量中的有效性，设计了四点弯实验。实验设备为 1

台投影仪与 2 台工业相机(组成 3D-DIC 测量系统)。实验装置如图 9 所示,相机 1 与投影仪组成 FPP 与 DIC 融合测量系统,待测物体为亚克力梁,在梁表面的上下两端粘贴应变片,并通过导线与应变仪相连。对形貌较为复杂的物体,其表面往往不能垂直于相机光轴,为了模拟该状态,将梁稍微倾斜放置。

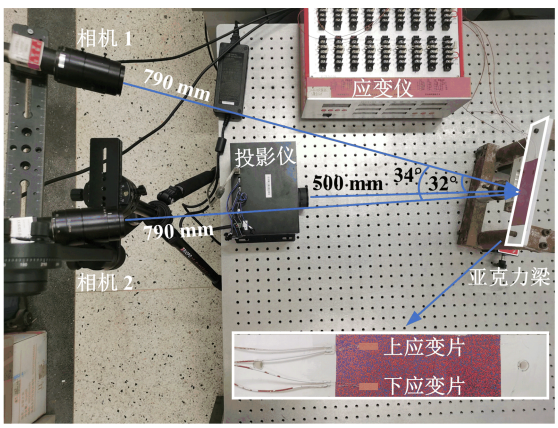

图 9 四点弯实验装置

Fig. 9 Diagram of the four-point bending test experimental setup

实验通过加载装置对亚克力梁进行加载,利用应变仪的读数控制每次加载 30 $\mu\varepsilon$,共计 20 个加载状态。首先,同步采集 20 组变形图像及应变片应变数据。随后,分别采用传统 3D-DIC 方法和本文所提出的融合方法计算各工况下感兴趣区域的应变场,将应变片区域内各方法计算的平均应变与应变片的应变值进行对比,结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,相比于 3D-DIC 方法,用 FPP 与 DIC 融合方法计算的结果稳定性更高。为了定量评价测量精度,我们将融合方法计算出的应变值与高精度电阻应变片测得的应变值进行比较。电阻应变片通过测量物体表面微小变形引起的电阻变化直接获得应变,具有

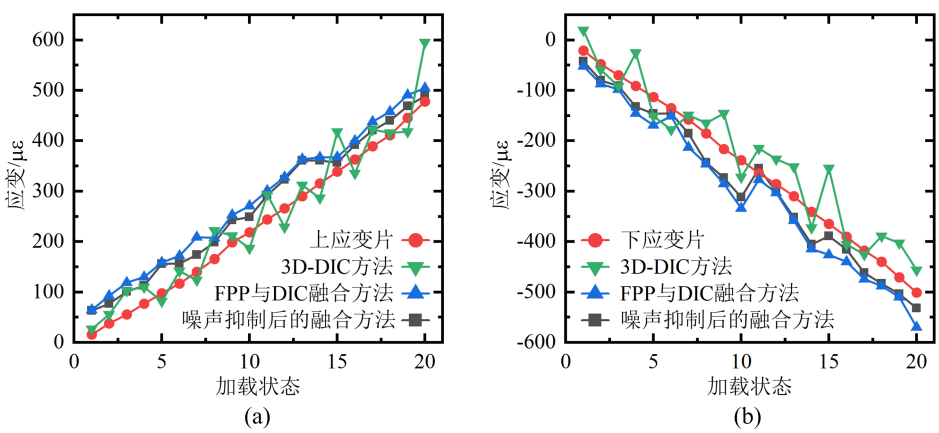

图 10 各方法与应变片的结果:(a)上应变片区域;(b)下应变片区域

Fig. 10 Various methods with strain gauge results:(a)upper strain gauge region;(b)lower strain gauge region

测量原理直接、技术成熟、测量精度高(精度 1 $\mu\varepsilon$)的优点,通常应变片的应变测量结果被视为可靠且高精度的参考值(可近似作为“真值”),因此,本文将 FPP 与 DIC 融合方法计算的应变值与应变片的应变测量值之间的均方根误差(RMSE),作为系统应变测量精度的核心评价指标。FPP 与 DIC 的融合系统应变测量精度为 53 $\mu\varepsilon$ 左右,标准差为 21 $\mu\varepsilon$;采用本文所提出的去噪方法后,系统的应变测量精度为 39 $\mu\varepsilon$ 左右,标准差为 20 $\mu\varepsilon$,本文所提出的去噪方法将融合系统的应变精度提升了 26.4%。

4 结论

相比于常规 3D-DIC 系统,FPP 与 DIC 的融合系统在复杂形貌物体的位移和应变测量中展现了更高的精度。因此,本文基于融合系统,通过一种逐像素点的噪声迭代抑制方法降低了噪声引起的误差。数值模拟实验表明,本文方法迭代 2~3 次即可达到稳定状态,对不同等级的高斯随机噪声均能降低 40%以上位移标准差。在楔形块纯平移实验中,本文方法的位移测量精度提高了 21.4%,应变精度提高了 16.2%;在四点弯实验中,本文方法的应变精度提高了 26.4%。数值仿真和实验结果证明了本方法在融合系统三维位移和应变计算中可提高测量精度。

参考文献：

[1] 赵健宇，谢惠民. 基于数字图像相关的激光修复镍基合金疲劳损伤表征方法研究[J]. 实验力学，2023，38(1)：1-8（ZHAO Jianyu，XIE Huimin. Study on fatigue damage characterization method of laser repair nickel-based alloy based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics，2023，38(1)：1-8 (in Chinese)）

[2] SHAO X X，HE X Y. Real-time 3D digital image correlation for large deformation and rotation measurements based on a deformation transfer scheme[J]. Experimental Mechanics，2021，61(6)：951-967.

[3] CHEN B，PAN B. Measuring true stress-strain curves of cylindrical bar samples with mirror-assisted multi-view digital image correlation[J]. Strain，2022，58(1)：e12403.

[4] 何沐，刘聪，尹卓异，等. 用于高精度离面位移测量的相机阵列栅线投影测量技术[J]. 实验力学，2021，36(5)：609-616（HE Mu，LIU Cong，YIN Zhuoyi，et al. Fringe projection profilometry with camera array for high-precision out-of-plane displacement measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics，2021，36(5)：609-616 (in Chinese)）

[5] 张巍，陈玉翀，姚鹏程，等. 基于双向条纹投影的复杂纹理物体三维测量[J]. 光学学报，2024，44(9)：0912001（ZHANG Wei，CHEN Yuchong，YAO Pengcheng，et al. Three-dimensional measurement of complex textured objects based on bidirectional fringe projection[J]. Acta Optica Sinica，2024，44(9)：0912001 (in Chinese)）

[6] CHEN L M，DING R，ZHANG S. Adaptive focus stacking for large depth-of-field microscopic structured-light 3D imaging[J]. Applied Optics，2024，63(12)：3219-3227.

[7] 陈正东，张启灿，吴周杰，等. 基于标记点消隐与提取的三维形貌及形变测量[J]. 光学学报，2023，43(11)：1112001（CHEN Zhengdong，ZHANG Qican，WU Zhoujie，et al. Three-dimensional shape and deformation measurement using marker point hiding and extraction[J]. Acta Optica Sinica，2023，43(11)：1112001 (in Chinese)）

[8] WU Z J，CHEN Z D，CHEN Z S，et al. Chromatic DIC-assisted fringe projection profilometry for shape，deformation，and strain measurement with intensity-chroma space analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2023，72：5019913.

[9] ZHANG C，LIU C，XU Z H. High-accuracy three-dimensional deformation measurement system based on fringe projection and speckle correlation[J]. Sensors，2023，23(2)：680.

[10] GUO X，LI Y L，SUO T，et al. De-noising of digital image correlation based on stationary wavelet transform[J]. Optics and Lasers in Engineering，2017，90：161-172.

[11] PAN B. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering[J]. Optics and Lasers in Engineering，2013，51(10)：1161-1167.

[12] CHENG X N，ZHOU S C，XING T Z，et al. Solving digital image correlation with neural networks constrained by strain-displacement relations[J]. Optics Express，2023，31(3)：3865-3880.

[13] YE X S，ZHAO J Q. Minimizing the total strain error in point-wise least squares using rotated Gaussian weight strain filter (RGW-SF) in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering，2023，164：107492.

[14] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry：a review[J]. Optics and Lasers in Engineering，2018，107：28-37.

[15] 骆志明，周易非，李睿，等. 数字图像相关法辅助的条纹投影轮廓术相位展开方法[J]. 光学学报，2024，44(14)：1412004（LUO Zhiming，ZHOU Yifei，LI Rui，et al. Digital image correlation-assisted phase unwrapping for temporal phase shifting fringe projection profilometry[J]. Acta Optica Sinica，2024，44(14)：1412004 (in Chinese)）

[16] ZHANG S，HUANG P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering，2006，45(8)：083601.

[17] WANG Y Q，SUTTON M A，BRUCK H A，et al. Quantitative error assessment in pattern matching：effects of intensity pattern noise，interpolation，strain and image contrast on motion measurements[J]. Strain，2009，45(2)：160-178.

[18] PAN B，XIE H M，GUO Z Q，et al. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation[J]. Optical Engineering，2007，46(3)：033601.

High-accuracy integrated measurement method using fringe projection profilometry and digital image correlation

CHEN Zhenkun[1], CHEN Yuanqiang[1], WANG Dongliang[1], LIU Cong[1], LIU Xiaopeng[2]
(1. School of Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: A measurement system integrating Fringe Projection Profilometry (FPP) and Digital Image Correlation (DIC) combines the temporal domain advantages of the former with the spatial domain strengths of the latter, enabling high-precision spatiotemporal measurements. However, in such a hybrid system, speckle pattern noise significantly compromises measurement accuracy. To address this issue, this paper proposed a pixel-wise iterative noise suppression method for speckle images and provided a theoretical derivation to elucidate its denoising mechanism. Numerical simulations were first conducted to investigate the effects of image sequence quantity and noise level on the method's performance. Subsequently, the effectiveness of the method was further validated through a wedge pure translation experiment and a four-point bending experiment on an acrylic beam. Finally, comparative results with traditional Three-Dimensional DIC (3D-DIC) demonstrate that the proposed method markedly reduces measurement errors induced by speckle noise. Both numerical simulations and experimental results confirm that the proposed method significantly enhances the accuracy of displacement and strain measurements.

Keywords: digital image correlation; fringe projection profilometry; high-precision three-dimensional measurement; noise iterative suppression