

文章编号:1001-4888(2024)03-0367-11

基于光纤传像束成像的双相机 三维数字图像相关方法*

张燕燕^{1,2}, 于玲¹, 张中亚², 郑会龙²

(1. 辽宁工业大学, 辽宁锦州 121001; 2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要: 数字图像相关方法的变形测量,通常会使用常规双相机进行图像采集,然而由于系统光学结构的限制,应用也受到了一定的制约。本文将光纤传像束和三维数字图像相关方法(Three-Dimensional Digital Image Correction, 3D-DIC)相结合,提出一种基于光纤传像束成像的双相机三维数字图像相关方法。旨在充分利用传像束的灵活性,进一步拓宽 3D-DIC 方法的应用范围。由于系统中的传像束将相机和测量环境隔离,在恶劣环境下可以有效避免相机的损坏。首先,分析了不同滤波方法预处理散斑图像对测量结果的影响;然后,通过平移试验研究了散斑尺寸和密度对测量结果的影响;最后,开展了圆柱体形貌测量试验和 304 不锈钢单轴拉伸试验。结果表明:散斑直径为 21~23pixel 且密度为 55% 时使用该方法可得到最佳的测量结果,同时该方法不仅能够获取圆柱体的三维形貌,还能够准确测量单轴拉伸试验的全场变形,以电子引伸计为基准,相对误差始终保持在小于 0.25% 的范围内。

关键词: 光纤传像束; 数字图像相关方法; 变形测量; 双相机

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-237

0 引言

数字图像相关方法(Digital Image Correction, DIC)是一种利用数字图像处理技术实现全场变形测量的非接触光学测量方法,该方法于 20 世纪 80 年代由 YAMAGUCHI^[1]和 PETERS 等^[2]同时独立提出,经过 40 多年的不断发展完善,已被广泛应用于固体力学^[3-4]、土木工程^[5-6]以及生物医学^[7]等领域。二维数字图像相关方法(Two-Dimensional Digital Image Correction, 2D-DIC)使用单相机采集散斑图获取应变场,但是测量结果对离面位移敏感且仅能用于平面物体的面内变形场测量,无法用于曲面物体表面变形场测量。

为了弥补 2D-DIC 的缺点,1993 年,LUO 等^[8]提出了以双目立体视觉技术为基础的三维数字图像相关方法(Three-Dimensional Digital Image Correction, 3D-DIC)。从 2010 年以来,许多研究人员致力于改进 3D-DIC,经过 10 多年的发展,相继提出了双相机 3D-DIC 方法^[9]、利用四平面镜的单相机 3D-DIC 方法^[10]、采用彩色相机和分色成像的单相机 3D-DIC 方法^[11]、多相机 3D-DIC 方法^[12]以及基于双相机和平面镜辅助的全景 3D-DIC 方法^[13]等。这些方法被应用在各种领域当中,如: PAN 等^[14]借助蓝色光源和蓝色滤光片以及电子束加热系统实现了钨试样在 3000℃ 以上的全场热变形测量。Su 等^[15]提出一

* 收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2023-12-28

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-V-006-0100); 中科院青促会会员项目(2022142)

通信作者: 郑会龙(1975-),男,博士,研究员。主要研究领域:航空宇航新结构材料技术、智能巡飞技术、智能传感技术、航空动力工程。Email: zhenghuilong@iet.cn

种利用频闪光源照明的双相机 3D-DIC 系统,并实现了水下螺旋桨叶片的三维动态位移场测量。CHEN 等^[16]采用 DIC 对 2024-T4 铝合金空心预缺口试样在循环载荷作用下进行多部位测量,获取了应力强度因子和疲劳寿命。然而,在 3D-DIC 系统中,不论是通过光学装置的单相机成像、双相机成像,还是多相机全景成像,以实现三维形貌或变形的测量,都是依据光沿直线传播的原理进行成像的。这些光学系统往往以线性模式排列,导致测量系统自由度受限、灵活性低且结构不紧凑。

在 20 世纪 50 年代中期,HOPKINS 与 KAPANY 成功研制出可使用的光纤传像束,并且验证了光纤传像束是可以传输图像的^[17-18]。由于光纤传像束具有耐高温、抗振性能好、柔韧性好和使结构更为紧凑等优点,已经被广泛应用于国防、医学和工业等领域^[19-25]。如 WANG 等^[26]为解决大视场下的探测,将非常规红外光线束与红外小尺度焦平面阵列(IRFPA)耦合,实现了线性阵列成像探测人眼无法看到的红外扫描图像。NAGAYA 等^[27]发现利用医学内窥镜光纤扩散器传输近红外光的近红外光免疫疗法(NIR-PIT)可能是治疗胃癌腹膜播散的一种有前景的方法。WANG 等^[28]将光纤传像束与投影仪以及照相机耦合,又结合反射立体技术,形成基于光纤束的主动立体视觉系统,实现了在小视场和极端环境下的三维重建。

2021 年 TU 等^[29]将一分四型光纤束与单个工业相机相结合,提出了一种基于光纤传像束成像的单相机 3D-DIC 方法,并通过圆柱体形貌测量试验和三点弯曲试验验证了该方法的有效性,在该文中,针对传像束中光纤排布错位影响测量精度的问题,他还提出使用 LCD 屏幕生成黑白相间的横/竖条纹来标定排布错位的光纤,并通过面内平移试验和离面加载试验验证了该标定方法可以提高变形测量精度。2023 年 TU 等^[30]又提出使用 LED 屏生成预先设计规则排列的图像,利用相关算法确定光纤输出与屏幕显示信息的映射关系后实现图像重建,可以显著提高传输图像的精度,最后通过圆盘离面加载试验发现能够提高所建立的 DIC 系统的变形测量精度。然而,现有的传像束 3D-DIC 因仅使用单个相机,系统分辨率不如双相机高;现有工作仅在图像预处理阶段简单描述了需要对图像进行滤波预处理,并未对预处理方法进行探讨;传像束 3D-DIC 测量系统固有成像特性决定了被测物散斑灰度图受“蜂窝状”伪影影响,不合适的散斑尺寸将严重影响测量精度甚至导致无法进行测量,现有工作也未对该问题进行分析。

针对以上问题,本文使用 2 根传像束、6 个工业镜头、2 台工业相机搭建了一套传像束成像的双相机 3D-DIC 系统。首先,对传像束成像系统进行介绍,并分析了空间域滤波和频域滤波对相机标定和图像匹配的影响;然后,通过平移试验分析了散斑尺寸对测量结果的影响;在此基础上,进行了圆柱体形貌测量试验和 304 不锈钢单轴拉伸试验,验证了传像束双相机 3D-DIC 的测量能力。

1 传像束 3D-DIC 基本原理

传像束双相机 3D-DIC 是在常规双相机 3D-DIC 的基础上,引入光纤传像束,并通过该光纤传像束传输图像,其光学系统如图 1 所示。首先,测试件表面的散斑成像在与光纤一端相连的镜头 1 和镜头 2 上;然后,不同角度的试件图像信息通过传像束传输,汇聚至镜头 3 和镜头 4 的端面;最终,由与镜头 5 和镜头 6 相连的工业相机进行采集,并将这些图像信息有效地存储在计算机中。

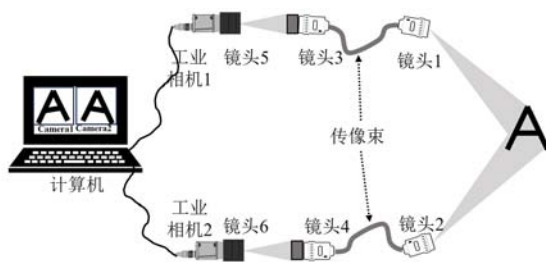


图 1 传像束双相机 3D-DIC 系统

Fig. 1 Image beam dual camera 3D-DIC system

传像束 3D-DIC 的成像原理与常规 3D-DIC 一致,如图 2 所示。空间一点 P 分别通过左右 2 个视角

同时得到不同角度的成像信息,从而获取点 P 实际的空间信息。整个系统的测量流程如图 3 所示,该流程主要分为相机标定、图像采集、图像匹配和应变测量 4 个步骤。在相机标定阶段,采用了张正友标定法;在图像匹配阶段,为了降低光线亮度线性变化可能引起的影响,采用了零均值归一化平方和差(Zero-Normalized Sum of Squared Differences Criterion,ZNSSD)相关函数,其公式如下:

$$C_{ZNSSD} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ \frac{f(x, y) - f}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f]^2}} - \frac{g(x', y') - g}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g]^2}} \right\}^2 \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 分别为参考图像和目标图像的灰度值; $f = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y)]$ 和 $g = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y')]$ 分别为参考图像和目标图像的灰度值均值。

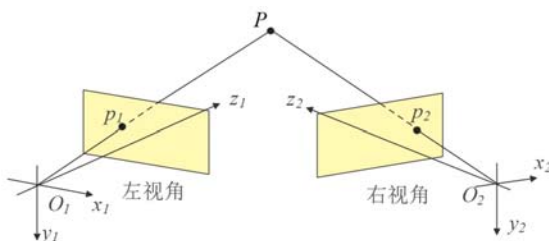


图 2 3D-DIC 成像模型
Fig. 2 3D-DIC imaging model

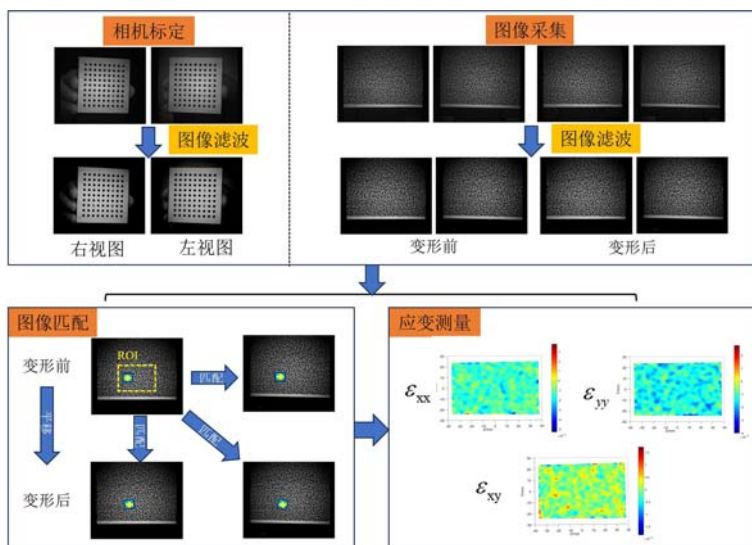


图 3 试验过程
Fig. 3 Test process

2 试验

2.1 传像束 3D-DIC 系统

图 4 是传像束双相机 3D-DIC 系统,该系统成像部分包含:2 个长度为 1m 的传像束(横截面积尺寸:8mm×8mm,单光纤丝直径:16μm)、2 台工业相机(品牌:海康威视,型号:MV-CA050-12UM,分辨率:2448pixel×2048pixel)、6 个工业镜头(焦距:50mm,光圈数:F2.8)。整个测量系统包含左、右 2 条测量光路。在左侧光路中,由工业相机 1、传像束 1 以及镜头 1、3、5 组成。其中,镜头 1 与光纤的一端相连,充当光纤成像的输入端,也是整个系统的输入端。镜头 3 与光纤的另一端相连,作为光纤成像的输出端。镜头 5 与相机相连,充当相机成像的输入端。右侧光路与左侧光路相似,由工业相机 2、传像

束2以及镜头2、4、6组成,其布置与左侧一路相同。这种布局使得整个系统具有对称性,能够同时采集左右2个视角的图像信息,以支持立体视觉和三维形貌的测量。



图4 传像束双相机3D-DIC系统

Fig. 4 Image beam dual camera 3D-DIC system

2.2 平移试验

本文采用平移试验来分析散斑尺寸^[31]和散斑密度对测量结果的影响。在此,散斑密度是指在一个规定的区域下,设置特定的散斑直径,最后实际生成的散斑数量与在该区域中按照横竖整齐排列时能够容纳的最多散斑数量之比,通常以百分比表示。通过散斑生成软件生成不同直径和不同密度的散斑。在分析散斑直径对测量结果影响时,设定密度均为80%、变化率均为60%,散斑直径从0.4mm开始,以0.2mm为步长逐渐变化到2.4mm;在分析散斑密度对测量结果影响时,设定散斑直径为1mm、变化率为60%,密度从55%开始,以5%为步长逐渐变化到90%。此外,本文的所有试验中均使用一个底为白色的标定板进行相机标定。在该标定板上有9×9个黑色圆点,其中包含3个空心圆点用于确定方向定位,并且圆点的间距为6mm。

刚体内平移试验的实物布置、散斑密度图和散斑直径图如图5所示,将夹持在三轴位移台上且表面贴有散斑的平板放置在距离镜头1和镜头2前方约620mm的位置。在试验中,将散斑以每次0.5mm的平移量先向左平移2.5mm,复位后再向右平移2.5mm,每平移一次采集一组散斑图像。

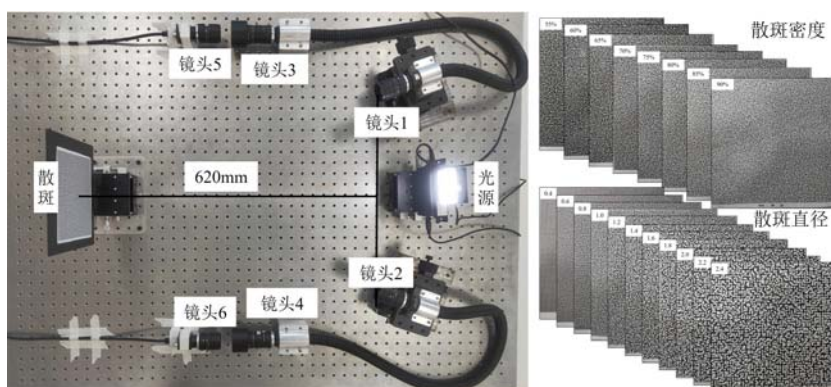


图5 刚体平移试验

Fig. 5 Rigid body translational experiments

2.3 圆柱体三维重建

为了验证提出方法的三维重建能力,选择直径为65.66mm(精度为0.02mm游标卡尺的测量结果)的圆柱形易拉罐为待测对象。试验前,在待测物上喷白色底漆,待白色底漆完全变干后,将直径为0.8mm水转印散斑贴在被测试件上。同样放置在距离镜头1和镜头2前方约620mm处,工业相机共记录11组圆柱体表面散斑图和100组标定图。

2.4 单轴拉伸试验

单轴拉伸试验装置如图 6(a)所示,该装置主要包含:1 台电子万能试验机(型号:CMT-100G,厂商:济南联工测试技术有限公司)、1 套传像束双相机 3D-DIC 系统(与本文 2.1 节测量系统相同)以及电子引伸计(标距为 50mm,最大变形量为 $\pm 10\text{mm}$)。试验前,使用传像束 3D-DIC 采集标定图像,并对系统进行标定;将图 6(b)所示的 304 不锈钢试样(尺寸为 $100\text{mm}\times 20\text{mm}\times 1.7\text{mm}$,散斑直径为 0.8mm)安装在试验机上;用橡皮筋将引伸计固定在试件未喷涂散斑的一侧(图 6(c)所示)。试验中,试验机横梁以 $5\text{mm}/\text{min}$ 的速度加载试样,传像束 3D-DIC 测量系统同时以 2fps 的速度采集试验散斑图,当引伸计的变形量达到 9.5mm 时停止加载和图像采集。试验后,对采集到的散斑图进行处理,得到加载过程中试样的全场变形,并将电子引伸计测得的应变作为参考值,以评估传像束 3D-DIC 测量应变的能力。

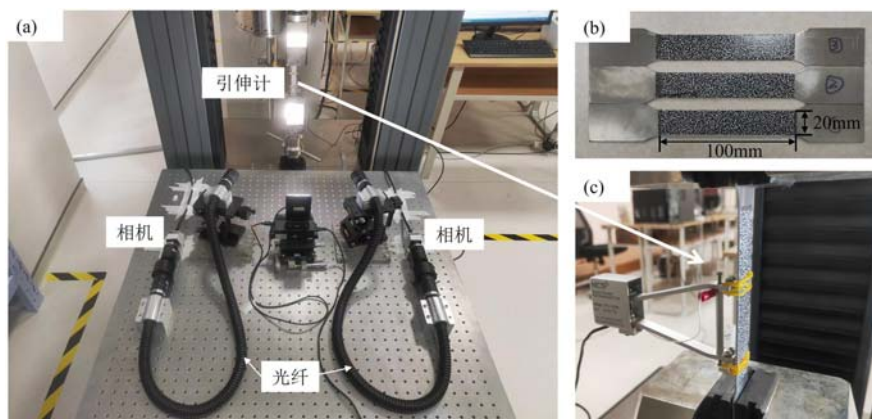


图 6 (a)拉伸试验装置;(b)304 不锈钢试验件;(c)电子引伸计

Fig. 6 (a) tensile experimental device; (b) 304 stainless steel as test piece; (c) electronic extensometer

3 结果与分析

3.1 滤波方法对测量的影响

因传像束成像的固有特性,成像过程中出现了图 7 所示的“蜂窝状”伪影,这些伪影导致相机采集到的散斑图在伪影位置处的灰度信息无法准确反映被测物表面的真实状态,进而可能影响相机标定结果和变形测量结果。针对该问题,本文分析了几种滤波处理方法对图像匹配的影响,具体如下。

分别对标定图和感兴趣区域(Region of Interest, ROI)为 $648\text{pixel}\times 200\text{pixel}$ 的散斑图,在空间域和频域上进行高斯滤波处理,设置空间域高斯滤波的窗口参数为 3×3 。选择相机标定过程的重投影误差和图像匹配过程的相关函数进行分析,表 1 的数据显示,经频域高斯滤波处理后,图像的重投影误差较小且相关系数较低,表明图像的相关性较强。然而,频域高斯滤波会对图像的频谱进行调整,影响图像的高频成分,会对边缘信息的获取造成一定程度的模糊。

为了弥补这一缺失,尝试在高斯滤波的基础上实现图像增强。在图像增强技术方面,选择模糊域增强和多尺度增强 2 种方法。模糊域增强^[32]是一种对模糊特征提取后进行增强变换处理的图像增强技术,能够显著增强图像的对比度;而多尺度图像增强^[33]则是通过在不同尺度上处理图像,使图像在不同细节层次上得到增强。然而,由于模糊域增强的图像对比度增强会改变图像中的灰度梯度分布,尤其是在边缘区域,这使得 DIC 算法中对灰度梯度的计算更加复杂;模糊域增强和多尺度增强在插值过程中引入更多的非线性变化或细节信息,这导致 DIC 算法中的插值误差受到增强的图像影响。为了确定最适合 DIC 算法的图像预处理,进一步对这 2 种方法进行重投影计算和相关计算,结果显示,频域高斯滤波和多尺



图 7 空白背景下传像束成像的蜂窝伪影
Fig. 7 Honeycomb artifacts in image beam imaging on a blank background

度增强相结合的方法在保证重投影误差不降低的情况下,相关系数最小,即图像相关性更强。可采用该方法对所有试验图像进行处理,实现后续测量。图8展示了4种滤波的效果。

表1 4种滤波的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients of four filters

滤波方法	空间域高斯滤波	频域高斯滤波	频域高斯滤波+模糊域增强	频域高斯滤波+多尺度图像增强
重投影误差/pixel	0.91	0.90	0.94	0.90
相关系数 ZNSSD	0.000887	0.000843	0.000884	0.000835

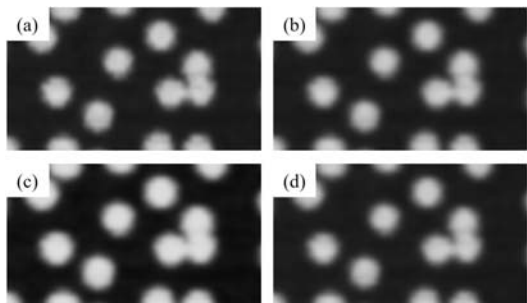


图8 (a)空间域高斯滤波;(b)频域高斯滤波;(c)频域高斯滤波+模糊域增强;(d)频域高斯滤波+多尺度图像增强

Fig. 8 (a) spatial domain Gaussian filtering; (b) frequency domain Gaussian filtering; (c) frequency domain Gaussian filtering + fuzzy domain enhancement; (d) frequency domain Gaussian filtering + multi-scale image enhancement

的相对误差基本小于2%,经计算位移误差的平均值、标准差均小于0.005mm。考虑到试验过程中可能存在的误差(如平移台平移量不准确等),上述结果验证了传像束双相机3D-DIC系统可以准确测量位移。

表2 不同直径和密度散斑的DIC计算参数

Tab. 2 DIC calculation parameters for speckles with different diameters and densities

ROI	步长	子区大小	相关准则
1470pixel×1071pixel	7pixel	71pixel×71pixel	ZNSSD

(1) 散斑直径的影响

图10(a)展示了11组不同直径散斑水平方向 ϵ_{xx} 应变与施加位移之间的关系。由图可知,散斑直径低于、高于0.8mm都对应变测量结果影响较大,表明散斑直径的选择对于DIC测量结果有一定的影响,根据SU等^[34]的工作可知,散斑直径与DIC的系统误差呈现先降后升的趋势;散斑直径过小,插值影响过大;散斑直径过大,噪声影响过大。由图10(a)可知,散斑直径为0.8mm的应变值更接近0,该直径对应于21~23pixel宽度,因此可得结论:散斑直径在这个范围内时可获得最佳应变测量结果,并可确保DIC测量结果的准确性和可靠性。

3.2 散斑对测量结果的影响

采用表2所列计算参数处理不同直径和不同密度散斑平移试验图像,获取ROI内所有测量点的平均位移。对于每次的面内平移,仅在一个方向轴上移动,因此只对该轴方向上的位移结果进行分析。由于平移过程中没有任何外力干扰,因此每次测得的平移量应该几乎相等。通过从测得的全场位移中减去实际施加的位移,可以得到全场测量后的误差、误差的平均值和标准差。图9显示了11组不同直径散斑图全场测量后的位移误差与施加位移之间的关系,从图中可知,测得的位移和施加的位移之间的

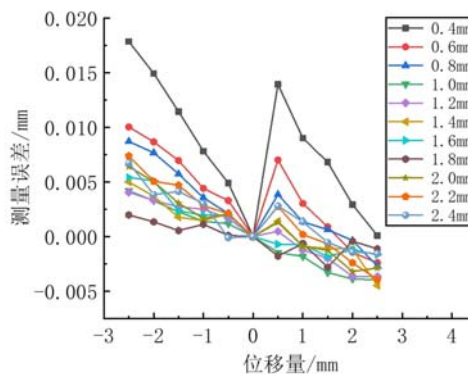


图9 位移测量结果

Fig. 9 Displacement measurement results

(2) 散斑密度的影响

图 10(b)为不同密度散斑水平方向 ϵ_{xx} 应变图,通过对比密度从 55% 到 90% 这 8 组不同密度的散斑,可观察到密度为 55% 的散斑的应变值变化最小且最接近于 0,表现出了较佳的应变效果。这是因为过高的散斑密度导致散斑大范围重叠,增强了亮度饱和度,降低了图像对比度,进而影响了测量结果的准确性。因此,在基于光纤传像束成像的双相机三维数字图像相关方法中,建议选用 55% 的散斑密度以获得最佳的应变测量效果。

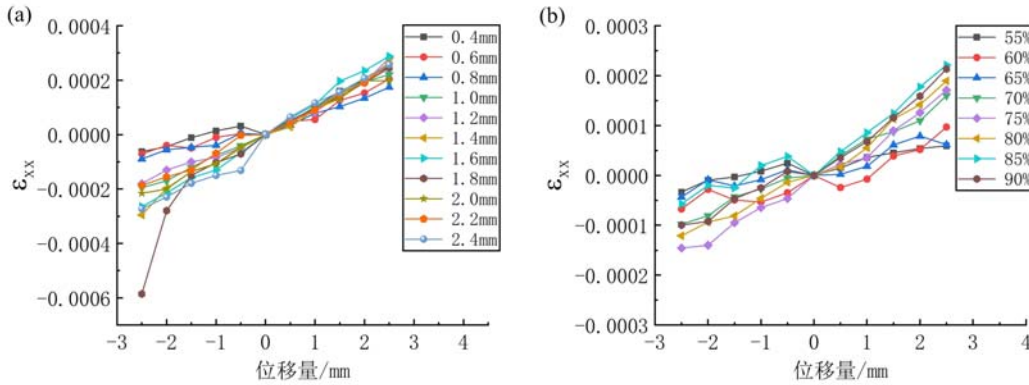


图 10 (a)不同直径散斑 ϵ_{xx} 方向的应变;(b)不同密度散斑 ϵ_{xx} 方向的应变

Fig. 10 (a) strain in the ϵ_{xx} direction of speckle with different diameters;

(b) strain in the ϵ_{xx} direction of speckle with different densities

由于平移过程中没有任何外力干扰,因此平移试验不存在应变情况,由图 10 可见平移试验发生了应变,因此可推测所建系统存在测量噪声。针对这一问题,主要误差来源可以归结为以下 2 个方面: ①散斑的制备:在散斑纸固定于平板时,由于固体胶未能完全黏牢,导致散斑纸与平板之间存在空隙,从而在测量过程中引入了应变误差。②系统自身存在成像缺陷:光纤传像束的制备工艺导致出现蜂窝状的固定成像模式。尽管对采集的图像进行了滤波处理,但该处理只能部分缓解光纤蜂窝伪影对测量结果的影响,不能完全消除其影响。

3.3 圆柱体三维形状重建

采用表 3 所列计算参数处理形貌测量试验数据。图 11(a)为圆柱体试样,图 11(b)为重建之后部分圆柱体的形貌。基于重建后的部分圆柱体三维坐标数据,计算出了该部分圆柱体的横截面信息。随后,采用最小二乘法对这些横截面数据进行了圆形模型的拟合,拟合得到的圆柱体的半径为 32.91mm。与游标卡尺实际测量得到的圆柱体半径(32.83mm)相比,相对误差为 0.24%,标准偏差为 0.08mm。考虑到待测物的加工误差,该测量结果是十分合理的,因此也验证了传像束 3D-DIC 系统能够准确测量物体三维形貌。

表 3 三维重建的 DIC 计算参数

Tab. 3 DIC calculation parameters for 3D reconstruction

ROI	步长	子区大小	相关准则
1029pixel×1743pixel	7pixel	75pixel×75pixel	ZNSSD

3.4 拉伸试验结果与分析

用表 4 所列参数对拉伸试验结果进行处理,得到 3 组拉伸试验测得轴向应变随时间的变化曲线;同时,以电子引伸计测得轴向应变结果为参考,计算得到传像束 3D-DIC 测得应变的相对误差随时间变化曲线,如图 12 所示。从图中可以清楚地看出,传像束 3D-DIC 与电子引伸计测得轴向应变值随时间呈现出相同的变化规律。试验加载初始阶段,轴向应变较小,导致相对误差在试验初始阶段较大,然而随着时间的推移,观察到相对误差逐渐减小,在大约 75s 左右达到最小值。随后,相对误差有所增大,但始终保持在小于 0.25% 的水平,这表明传像束 3D-DIC 可以用于变形场准确测量。

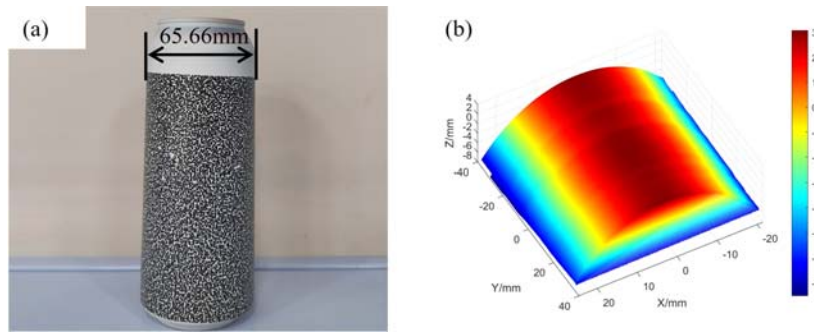


图 11 (a)圆柱体试样; (b)试验重建后的三维轮廓

Fig. 11 (a)cylindrical sample; (b)three-dimensional profile after test reconstruction

表 4 拉伸试验中的 DIC 计算参数

Tab. 4 DIC calculation parameters in tensile tests

ROI	步长	子区大小	相关准则
380pixel×870pixel	10pixel	75pixel×75pixel	ZNSSD

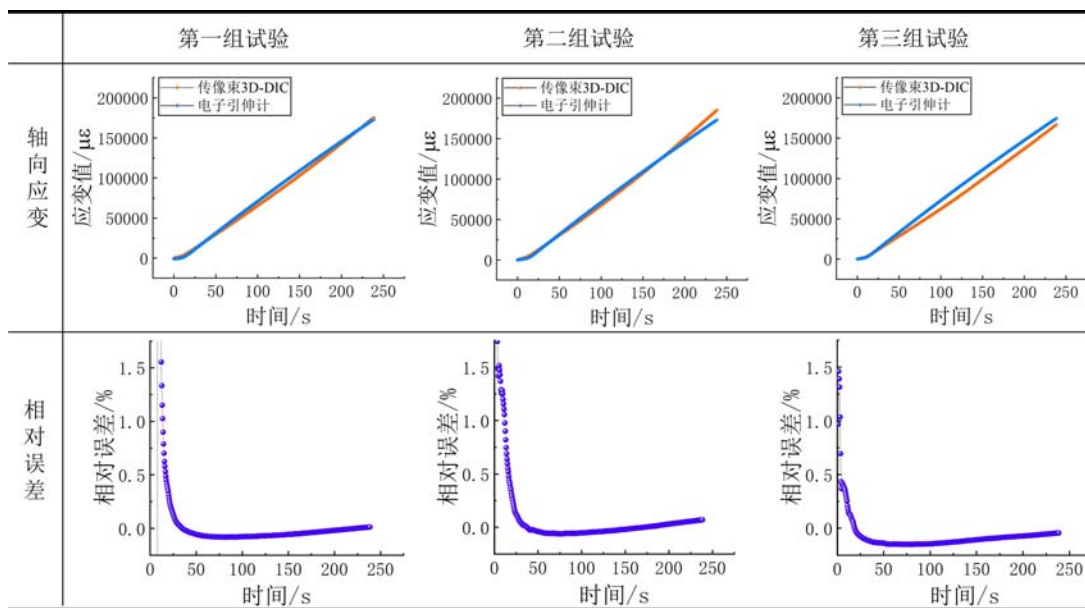


图 12 拉伸试验结果

Fig. 12 Tensile test results

4 结论

本文提出了一种基于光纤传像束成像的双相机三维数字图像相关方法,搭建了1套传像束双相机3D-DIC系统,通过对采集的图像进行预处理,分析了使用不同滤波算法对图像进行预处理后对匹配结果的影响;研究了不同直径散斑以及不同密度散斑对测量结果的影响,此外还通过重建三维圆柱体形状和拉伸试验,验证了该方法测量变形的能力。结论如下:

(1) 利用频域高斯滤波和多尺度增强相结合的方法能够有效缓解光纤蜂窝伪影的同时,还能提高图像匹配过程中的图像相关性。

(2) 传像束3D-DIC测量系统的最优散斑尺寸不同于常规3D-DIC测量系统。当散斑直径为21~23pixel且散斑密度为55%时,使用本文搭建的传像束测量系统能够获得更高的应变测量精度。

(3) 圆柱体三维重建试验和 304 不锈钢拉伸试验结果均表明本文提出的方法可以用于变形场准确测量。

参考文献:

- [1] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, 14(11): 1270–1272.
- [2] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 427–431.
- [3] 王浩, 孙翠茹, 张晓川, 等. 基于数字图像相关方法的 TiO₂/PI 纳米杂化薄膜低温力学性能研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(3): 343–351 (WANG Hao, SUN Cuiru, ZHANG Xiaochuan, et al. Study of low temperature mechanical properties of TiO₂/PI nano-hybrid thin film based on digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3):343–351 (in Chinese))
- [4] 田文煜, 杜伟, 左宏, 等. 基于数字图像相关的金属材料低温裂尖张开位移试验测量方法[J]. *实验力学*, 2020, 35(6):1014–1022 (TIAN Wenyu, DU Wei, ZUO Hong, et al. Experimental measurement method of low temperature crack tip opening displacement of metallic materials based on digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(6):1014–1022 (in Chinese))
- [5] 万钊航, 白鹏翔, 洪淼, 等. 基于数字图像相关技术的轻骨料混凝土早龄期细观收缩实验研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(5):549–559 (WAN Zhaohang, BAI Pengxiang, HONG Miao, et al. Experimental study on early-age meso-shrinkage of lightweight aggregate concrete based on digital image correlation technology[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(5):549–559 (in Chinese))
- [6] 安茹, 陈国雄, 李源康, 等. 基于数字图像相关的玄武岩纤维增强混凝土抗压实验研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(4):446–454 (AN Ru, CHEN Guoxiong, LI Yuankang, et al. Experimental investigation of compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete by digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(4):446–454 (in Chinese))
- [7] ZHANG D, EGGLETON C D, AROLA D D. Evaluating the mechanical behavior of arterial tissue using digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42:409–416.
- [8] LUO P F, CHAO Y J, SUTTON M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. *Experimental Mechanics*, 1993, 33:123–132.
- [9] 潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(12):108–116 (PAN Jiyu, ZHANG Shuiqiang, SU Zhilong, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12):108–116 (in Chinese))
- [10] PAN B, YU L, YANG Y, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation[J]. *Composite Structures*, 2016, 157:25–32
- [11] LI C, DONG B, PAN B. A flexible and easy-to-implement single-camera microscopic 3D digital image correlation technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(8):085002.
- [12] DAI Y, LI H. Multi-camera digital image correlation in deformation measurement of civil components with large slenderness ratio and large curvature[J]. *Materials*, 2022, 15(18):6281.
- [13] CHEN B, PAN B. Mirror-assisted panoramic-digital image correlation for full-surface 360-deg deformation measurement[J]. *Measurement*, 2019, 132:350–358.
- [14] PAN Z, HUANG S, SU Y, et al. Strain field measurements over 3000°C using 3D-digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127:105942.
- [15] SU Z, PAN J, ZHANG S, et al. Characterizing dynamic deformation of marine propeller blades with stroboscopic stereo digital image correlation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162:108072.
- [16] CHEN Y, SUN S, JI C. Analysis of aluminum sheets with multiple sites damage based on fatigue tests and DIC technique[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 109:37–48.
- [17] HOPKINS H H, KAPANY N S. A flexible fibrescope, using static scanning[J]. *Nature*, 1954, 173:39–41.

- [18] HOPKINS H H, KAPANY N S. Transparent fibres for the transmission of optical images[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1955, 1(4):164–170.
- [19] 秦大甲. 光纤技术及其军事应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 1999(5):7–15 (QIN Dajia. Fiber optics and its military applications[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 1999(5):7–15 (in Chinese))
- [20] PAPADOPOULOS I N, FARAHI S, MOSER C, et al. High-resolution, lensless endoscope based on digital scanning through a multimode optical fiber[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(2):260–270.
- [21] 陆永红, 钟生新. 光纤技术及其军事应用[J]. *光电子技术*, 2004, 24(1):68–72 (LU Yonghong, ZHONG Shengxin. Fibre-optic technology and its military application[J]. *Optoelectronic Technology*, 2004, 24(1):68–72 (in Chinese))
- [22] GOBEL W, KERR J N D, NIMMERJAHN A, et al. Miniaturized two-photon microscope based on a flexible coherent fiber bundle and a gradient-index lens objective[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(21):2521–2523.
- [23] SUTER M, REINHARDT J, MONTAGUE P, et al. Bronchoscopic imaging of pulmonary mucosal vasculature responses to inflammatory mediators[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(3):034013.
- [24] GARCIA I, BELOKI J, ZUBIA J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig[J]. *Sensors*, 2013, 13(6):7385–7398.
- [25] 赵振声, 吴明忠, 何华辉. 磁场引导水溶还原法制备磁性金属纤维[J]. *华中理工大学学报*, 1998, 26(7):74–76 (ZHAO Zhensheng, WU Mingzhong, HE Huahui. Preparation of magnetic and metallic fibers with reducing method of aqueous solution introduced by magnetic field[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1998, 26(7):74–76 (in Chinese))
- [26] WANG G, LI J, ZHENG X, et al. Infrared scanning imaging system based on IR fiber bundle[C]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [27] NAGAYA T, OKUYAMA S, OGATA F, et al. Endoscopic near infrared photoimmunotherapy using a fiber optic diffuser for peritoneal dissemination of gastric cancer[J]. *Cancer Science*, 2018, 109(6):1902–1908.
- [28] WANG Y, ZHOU F, CUI Y. Single-camera active stereo vision system using fiber bundles[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(10):101301.
- [29] TU H, GAO Z, BAI C, et al. Single-camera 3D-DIC system based on a fiber bundle[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 147:106743.
- [30] TU H, ZHU C, GAO Z, et al. Calibration of coherent optical fiber bundle with LCD screen for deformation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161:107372.
- [31] REU P. All about speckles: speckle size measurement[J]. *Experimental Techniques*, 2014, 38(6):1–2.
- [32] RAMASWAMY A, MIKHAEL W B. A mixed transform approach for efficient compression of medical images [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1996, 15(3):343–352.
- [33] LU J, HEALY D M. Contrast enhancement via multiscale gradient transformation[C]. New York: IEEE, 1994.
- [34] SU Y, GAO Z, FANG Z, et al. Theoretical analysis on performance of digital speckle pattern: uniqueness, accuracy, precision, and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16):22439–22474.

3D digital image correlation method based on fiber optic image bundle imaging

ZHANG Yanyan^{1,2}, YU Ling¹, ZHANG Zhongya², ZHENG Huilong²

(1. Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Deformation measurement using Digital Image Correlation (DIC) methods often employs conventional dual-camera systems for image acquisition. However, the application is constrained to some extent due to the limitations of the optical structure of the system. This paper proposed a dual-camera three-dimensional DIC method based on fiber optic imaging bundles and 3D-DIC, aiming to fully utilize the flexibility of the imaging bundle and further expand the application range of 3D-DIC methods. By isolating the cameras from the measurement environment using the imaging bundle in the system, damage to the cameras can be effectively avoided in harsh environments. Firstly, the influence of different filtering methods on the measurement results of speckle images was analyzed. Then, the effects of speckle size and density on the measurement results were studied through translation experiments. Finally, experiments on the measurement of cylindrical surface morphology and uniaxial tensile tests of 304 stainless steel were conducted. The results show that the best measurement results can be obtained. When the speckle diameter is 21~23pixel and the density is 55% using this method. Furthermore, this method can not only obtain the three-dimensional morphology of the cylinder but also accurately measure the overall deformation of the uniaxial tensile test, with the relative error compared to the electronic extensometer always maintained within the range of less than 0.25%.

Keywords: fiber optic image bundle; digital image correlation method; deformation measurement; dual camera