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

闫 浩[1],隆 军[1],刘驰越[1],潘淑媛[1],左 超[2],蔡 萍[1]

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240;
2. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室,江苏 南京 210094)

摘 要:对近年来数字全息及散斑干涉技术在形变与位移测量方面的主要技术发展及应用发展进行综述。由于数字全息测量具有准确性高、无损、全场和动态测量等优点,成为形变和位移测量的重要技术之一。最近几年,数字全息技术在形变测量领域的发展主要体现在如下几个方面。首先,数字全息形变测量逐步由原来单一维度的形变测量转向多维度的形变测量。尤其是三维形变的同时测量是近年来本领域的研究重点。其次,形貌形变联合测量的技术受到关注。实际应用中曲面物体常常存在。而曲面物体需要离面与面内形变的分析,这需要获取曲面物体的形貌信息。针对这一需求,学者们针对形貌形变的同时测量方法开展了研究。再次,为了进一步扩大测量视场和深度范围,对基于长波长及远距离的技术进行了探索。与此同时,回顾了数字全息的形变测量技术在应用方面的进展。值得关注的是,在应用方面,数字全息技术从以前工程领域的形变测量向生物医学领域的形变测量发展,测量数据用于生物医学领域疾病分析与研究。

关键词:数字全息; 散斑干涉; 形变测量; 位移测量

中图分类号:O438.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0603010

Review of the development and application of deformation measurement based on digital holography and digital speckle interferometry

Yan Hao[1], Long Jun[1], Liu Chiyue[1], Pan Shuyuan[1], Zuo Chao[2], Cai Ping[1]

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The technique and application developments of the deformation and displacement measurements based on the digital holography (DH, including the digital speckle interferometry) was reviewed. Because of advantages of high accuracy, non-invasive, full-field and dynamic measurement, DH became one of the most important technique for deformation and displacement measurement. In recent years, the development of DH technique was mainly in the following aspects. Firstly, deformation measurement was developed from one-dimensional measurement to multi-dimensional measurements. Especially,

收稿日期:2019-01-10; **修订日期**:2019-02-25

基金项目:科技部国家重点研发计划(2016YFF0200700);国家自然科学基金(61405111)

作者简介:闫浩(1982-),女,副教授,硕士生导师,博士,主要从事数字全息、面向纳米通信网络的合成分子通信方面的研究。
Email:yan_hao@sjtu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

simultaneous deformation measurements in three dimensions was the focus of this domain. Secondly, since curved objects were common in practice. However, in-plane and out-of-plane deformation were the main concern for curved object, which needed the 3D shape information of the curved objects. Thus, for curved objects, simultaneous 3D shape and deformation measurements were studied. Thirdly, to further extend the field of view and the depth of the measurement, techniques based on long wavelength and long distance were explored. Furthermore, measurements based on DH technique progressed from engineering domain towards biomedical domain to facilitate deeper researches in biomedical domain. Meanwhile, various application improvements of deformation measurement based on DH technique were covered in this review.

Key words: digital holography; digital speckle interferometry; deformation measurement; displacement measurement

0 引 言

数字全息测量技术以及散斑干涉测量技术(由于二者基本原理相同,以下简称数字全息测量技术)具有准确性高、无损、全场和动态测量等优点,成为形变和位移测量的重要技术之一,并获得广泛的应用[1-4]。文中对近年来数字全息技术在形变(包括位移,以下统称形变)测量方面的技术发展及应用发展进行回顾。

近年来,数字全息技术在形变测量领域的发展主要体现在如下几个方面。

首先,数字全息形变测量技术逐步由原来单一维度的形变测量转向多维度的形变测量。各种各样的融合不同技术的三维形变测量方法被提出。其中,同时的三维形变测量方法,由于能更全面地体现物体的整体形变情况,受到格外关注,是近年来本领域的发展重点。

其次,在实际应用中,曲面被测物体常常存在。而曲面物体的形变测量研究更加关注离面形变与面内形变区分,而非简单的三个维度形变。针对这一需求,需要在测量形变的同时获得曲面物体的形貌信息,因此,学者们针对形貌形变的同时,对测量方法开展了研究。尤其是其中三维形变与形貌的联合测量具有重要意义。

再次,扩大测量视场和深度范围作为技术本身的重要性能指标,也是发展的重点。为了扩大测量视场和深度范围,对基于长波长及远距离的测量技术进行了探索。

此外,数字全息形变测量技术在应用方面也有重要的进展。数字全息测量技术从以前主要应用于工程领域的形变测量向生物医学领域的形变测量发展,比如口腔牙齿矫正、耳膜测量等方面。尤其是对这类生物医学样本形貌和三维形变的综合研究,提供了研究样本形貌、形变等力学性能与样本生物医学性能之间关系的接口,进而进行生物医学领域相对应的疾病分析与研究。与此同时,笔者也关注数字全息形变测量技术在其他应用方面的发展。对近年来的典型应用进行了总结。

希望通过该综述,读者能够对近期数字全息技术在形变测量方面,从技术发展到应用拓展有一个全面的了解,进而在此基础上开展进一步的研究。

1 数字全息及散斑干涉技术的形变测量的基本原理

数字全息技术,以物光和参考光干涉形成的干涉条纹(全息图)的形式记录并保存与物体三维形貌相关的相位信息,并运用数字衍射重建的方式,对物体形貌进行三维重建。其测量形变的方式是将变形前后获取的物体形貌作差,从而得到物体形变值。

而散斑干涉形变测量方法是以粗糙物体表面的漫反射物波与参考光波干涉形成干涉条纹的形式记录物体漫反射物光波与参考光波之间的相位差关系。由于漫反射的原因,漫反射物波的相位并不与物体的三维形貌相关,因此,从此干涉条纹中包含的物波相位信息中难以获取物体的三维形貌。然而,物体变形前后记录两幅干涉条纹的变化中,包含物体形

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

貌的变化信息,即形变信息。通过计算变形前后两幅干涉图中的物光波之间相位差可以获取物体的形变值。在系统结构上,数字全息与散斑干涉没有明显差别。图 1 为二者的基本光路结构示意图。

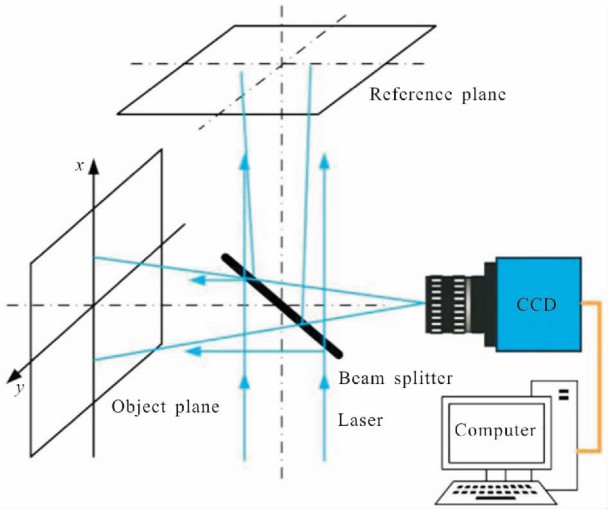


图 1 数字全息或散斑干涉测量原理图

Fig.1 Geometry of deformation measurement with interferometry (DH or DSPI)

测量原理的数学表达过程如下。CCD 相机分别采集变形前后物光和参考光干涉形成的两幅干涉图 I_1 和 I_2:

$$I_1=O_1^2+R^2+O_1^*R+O_1R^* \tag{1}$$

$$I_2=O_2^2+R^2+O_2^*R+O_2R^* \tag{2}$$

式中:O_1,O_2 分别为 CCD 面物体变形前后的物光波的复振幅;R 为 CCD 面参考光波的复振幅;* 为复共轭。物体变形前,物光波为 $O_1=A\exp(i\delta_1)$,物体变形后,物光波为 $O_2=A\exp(i\delta_2)$,其中 A 为物光波振幅,δ_1 和 δ_2 为物体变形前后物光波的相位,$\Delta\delta=\delta_2-\delta_1$ 为形变对应的物光波相位的变化。

在数字全息和散斑干涉测量方法中,求得变形前后物光波复振幅的方法主要由相移法和傅里叶变换法。相移法[5-9]是通过对参考光波进行相移分别获取多幅相移干涉图,可以求得物体变形前后物光波的复振幅 O_1 和 O_2。傅里叶变换法[10-12]是通过调节参考光波和物光波之间的夹角使得在干涉条纹的频谱中包含物光波 O 的两个一级谱能够彼此分开。将其中一个 1 级谱(eg:O_i,i=1 或 2)滤出,通过逆傅里叶变换后得到复振幅 O_i。

在数字全息中,可以用数字重建的方式得到物体在像平面的物光波复振幅 O_1^r 和 O_2^r(r 代表重建后获取的复振幅),进而可以求得各自对应的相位 δ_1 和 δ_2 以及相位差 $\Delta\delta$:

$$\delta_1=\arctan\left[\frac{\mathrm{Im}(O_1^r)}{\mathrm{Re}(O_1^r)}\right] \tag{3}$$

$$\delta_2=\arctan\left[\frac{\mathrm{Im}(O_2^r)}{\mathrm{Re}(O_2^r)}\right] \tag{4}$$

以及对应的相位变化:

$$\Delta\delta=\delta_2-\delta_1 \tag{5}$$

而在散斑干涉中,形变信息包含在物光波的差别中,单独的相位对于形变没有意义,相位差中包含形变信息,相位差求法如下:

$$\Delta\delta=\arctan\left[\frac{\mathrm{Im}(O_2^r\times O_1^{r*})}{\mathrm{Re}(O_2^r\times O_1^{r*})}\right] \tag{6}$$

通过上述方法求得的相位 $\Delta\delta$ 变化在 $0\leqslant\Delta\delta\leqslant2\pi$ 区间中。若变形引起的相位变化超出此范围内,则需要用解包裹算法进行相位展开,从 $\Delta\delta$ 得到解包裹后连续分布的相位差 $\Delta\delta_u$,然后,根据变形引入的光程差 l 与相位变化 $\Delta\delta_u$ 的关系

$$l=\frac{\lambda}{2\pi}\Delta\delta_u \tag{7}$$

即可求得物体全场的变形。其中 l 表示物体变形引起的光程差值,λ 为激光波长。

2 数字全息和散斑干涉形变测量的关键技术

2.1 数字全息形变与位移测量关键技术

数字全息形变测量技术近年来取得了一些新的研究进展,主要集中在对大尺寸物体、大形变量、极端环境的测量研究。

2014 年,Manuel H. De la Torre Ibarra 等[13]人用数字全息干涉的方法对大平面物体(面积 1.14 m^2)进行了测量。为解决大物体带来的物体边缘点和中心点照明方向和观测方向夹角不一致的问题,作者将激光器与物体的距离增加到 6.5 m,以将物体在该距离长度下能够等效为点,物体平面各点的光强近似相等。但距离的增加,必然带来光的衰减,故使用大功率的激光器提供足够强度的照明光。成功实现对大尺寸物体连续负载变化情况和振动条件下的形变

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测量。

2016 年,Jean-Francois Vandenrijt 等[14]人用功率为 8 W、波长为 10.6 μm 的激光器搭建一套长波红外数字全息装置，实现了真空环境下大温度变化范围引起的大形变量(200 μm)的测量。被测样件为空间探测任务用的红外光谱仪和光度计探测器阵列,在空间环境中，其温度变化范围为 293~90 K 所示,且属于极低环境温度工作。图 2 为测量系统光路原理,被测样本是用于空间探测任务的近红外光谱仪和光度计的焦平面阵列,整个装置除激光器和相机外,全部放置于真空仓内。由于被测样本是镜面的,所以采用散射的方式将光照射到被测样本表面。形变测量值与安捷伦干涉仪(Agilent 5519A)对比,能够获得 0.8 μm 的测量精度。说明该技术能够有效地实现极端环境下大变形物体的测量。

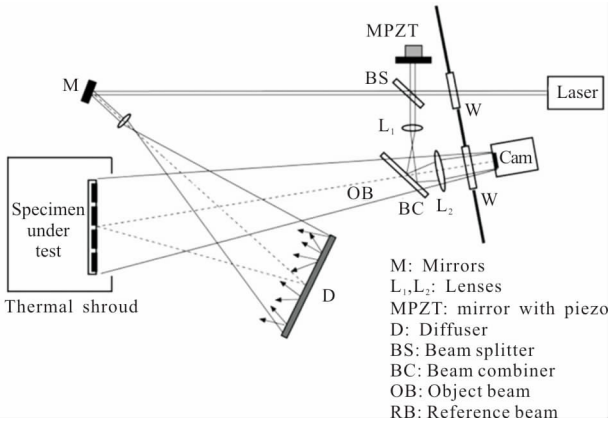


图 2 欧几里德聚焦平面阵列低温试验数字全息装置示意图

Fig.2 Sketch of the digital holography setup for the cryogenic test of the Euclid FPA

2.2 散斑干涉形变与位移测量关键技术

散斑干涉法近年来在技术上融入了剪切、相移和载波等多项技术,既可实现对静态问题的测量,又能进行动态实时检测。

2015 年,王永红等人[15]提出了一种基于狭缝光阑的空间载波剪切散斑干涉系统，该系统通过单幅剪切干涉条纹图就可以实现对物体的动态实时测量。如图 3 所示,它是通过倾斜迈克尔逊干涉仪的一个平面镜来产生剪切量和载波频率，以实现空间频谱的移动;同时,采用一个可调节的狭缝光阑来控制散斑尺寸和空间频谱宽度。光阑放在镜头的焦平面上,在成像系统中形成孔径光阑,而不是视场光阑,因此不会限制视场角。透镜 L_1 和 L_2 组成 4f 系统,这样视场角就不受分光棱镜的限制。整个系统结构简单且稳定，通过一幅干涉条纹图就可得到相位分布信息,适用于动态变形的测量。

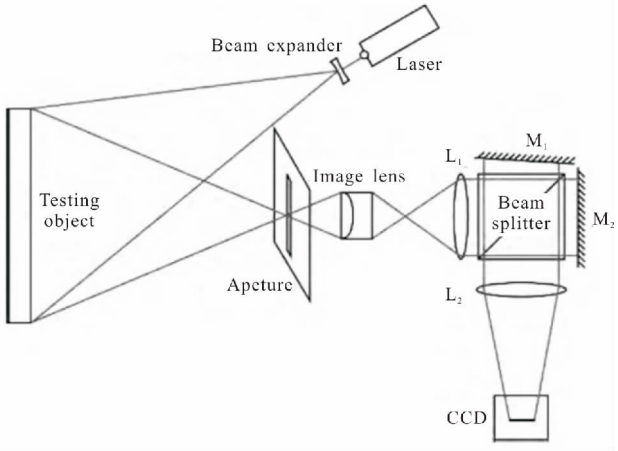


图 3 空间载波剪切散斑干涉系统示意图

Fig.3 Schematic map of spatial carrier shearing speckle interferometry system

2015 年,Kai Liu 等人[16]用双光束空间载波数字散斑干涉技术实现了面内和离面形变同时测量。该方法可以同时实现准静态变形和动态变形的测量。该系统采用两个激光器以不同的光照角照射被测物体,两者的激光束以相似的方式排列,但方向不同。两个激光器通过分束器后产生的物光束与参考光束在 CCD 敏感面上发生干涉,得到一个包含两个通道的干涉图。

2.3 软件算法关键技术

软件算法的技术进步主要体现在滤波去噪方法和解包裹算法方面。

在利用光学干涉技术进行形变形貌测量时,无一例外需要涉及到相位，对干涉相位条纹图的处理是获得高精度测量的关键一步。这里以数字散斑干涉技术为例。在利用数字散斑干涉技术进行形变形貌测量中,相位图处理的关键步骤包括相位提取、相位降噪和相位解包裹,处理流程如图 4 所示。

相位提取是从散斑干涉图像中提取出包含物体形变(形貌)信息的相位条纹图的操作。目前常用的相位提取方法主要包括相移干涉法和傅里叶变换法。相比于相移法需要采集多幅散斑干涉图而言,傅里叶变换法只需两幅散斑干涉图即可提取待测相

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

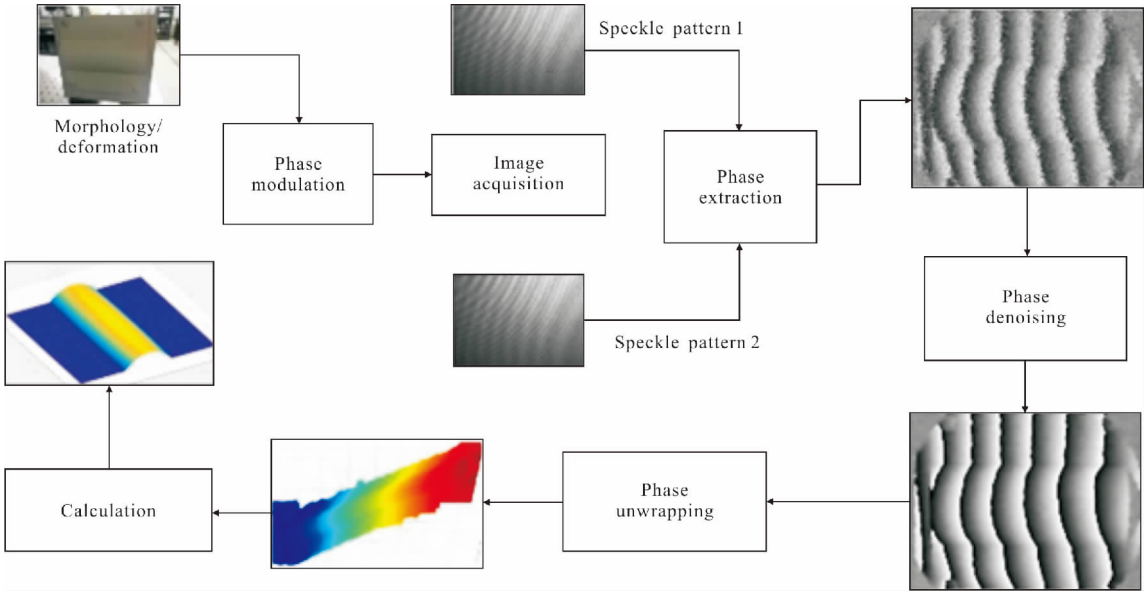


图 4 散斑数字比较全息测量系统相位处理流程

Fig.4 Illustration of phase processing of speckle digital comparison holographic measurement system

位,更利于实现快速测量。傅里叶变换法将散斑干涉图像变换到频域处理，在频域内提取具有物体相位信息的区域，再利用逆傅里叶变换将处理后的信号还原,即可得到相位分布信息。

在散斑干涉形变形貌测量的过程中，存在较多干扰噪声,要从提取的相位中解调出真实的相位,对相位噪声的抑制是不可缺少的一步。为了从大量噪声中得到真实的相位条纹，需针对性地选择滤波算法。短时傅里叶变换滤波是目前较为常用的相位图的滤波算法[17]。当信号的频率和噪声在频谱上相互重叠的时候,使用傅里叶变换很难将它们分离;由于短时傅里叶变换处理的是局部的区域，处于不同位置之间的信号将不会相互影响，并且局部区域的频谱比整个信号的频谱要简单得多,因此,采用短时傅里叶变换滤波处理的结果将会更加有效[17]。天津大学的 Qiyang Xiao 等[18]提出了一种基于改进变分模分解(IVMD)的数字散斑干涉相位图去噪方法,首先采用 IVMD 方法对数字散斑干涉相位图进行分解,得到最优模态分量，然后根据模态分量的特点提出了一种自适应模态阈值方法来处理模态分量，最后重构去噪后的模态分量，得到去噪后的数字散斑干涉相位图。该方法能有效滤除噪声干扰,峰值信噪比(PSNR)高于其他降噪方法。

相位解包裹散斑图像的相位信息是利用反正切函数从散斑图中获得的，因此提取到的相位被截断在反正切函数的主值范围(−π,π]之间,因此需要对其进行相位展开 (即相位解包裹)，才能获取连续的相位分布。质量导向相位解包裹算法是一种有效、高效、自动的空间相位展开方法，其利用相位的质量(即相位值的好坏)来引导相位解包裹路径[19]。相比于其他的相位解包裹算法，质量导向相位解包裹算法解包裹效果更好,但算法运行较为耗时。为此,新加坡南洋理工大学的 Qian Kemao 教授通过在质量图导向相位解包裹算法中引入索引交织链表，并对索引交织链表进行改进,减少了计算冗余,降低质量值集中分布的影响，从而极大提升质量图导向解包裹算法的运算性能[19]。

2.4 三维形变与位移的测量

近些年，同时的三维形变与位移的测量是光测力学领域内的一个重要关切。因为同时获取物体的三维形变(或者位移)能够更全面地了解物体整体形变,进而更全面地对物体力学等特征进行分析。在利用数字全息技术进行形变测量时，一套数字全息系统,一般只能负责一个维度的形变测量。如果要进行三个维度形变的测量,往往需要三套数字全息系统。并且要彼此同步以进行同时的测量。因此一套数字全息系统本身难以进行三维形变的同时测量。针对这个问题,近年来领域内学者提出了解决方案。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2012 年,Robert Schwede 等[20]人将立体摄影测量技术与数字全息相结合,进行了三维的变形测量。系统结构如图 5 所示。采用四个相机,既用于进行立体摄影测量技术获得物体 3D 点云,也用于获取四个相机位置的数字全息图。该系统中数字全息技术需要记录四个相机位置处变形前和变形后的数字全息图,总共需要记录 8 幅全息图以获得物体形变。同时,利用四个相机照相,通过彼此之间的几何三角关系进行物体 3D 形貌的测量,获得对应的 3D 点云。该测量方法的结果是一个 3D 点云,每一个点对应着该点的变形矢量,因此构成 3D 变形矢量云。总体来说,该方法的硬件实验系统和软件处理过程都比较复杂。

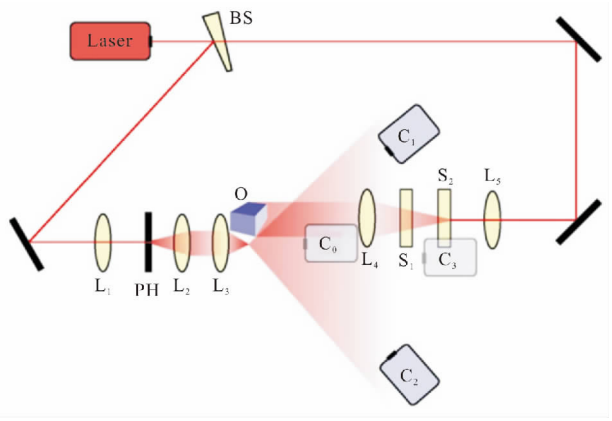


图 5 立体摄影技术与数字全息技术的融合系统

Fig.5 Schematic map of combining stereo-photography and digital holography

2014 年,笔者所在的课题组提出了将数字图像相关技术(Digital Image Correlation,DIC)与数字全息技术结合,仅基于一套简单的离轴数字全息系统,完成了三维形变的测量[21]。而传统的数字全息三维形变测量中,采用三套数字全息系统。每套全息系统所获得变形前后的两幅量化的复幅度图,求得对应的两幅相位图,计算每个方向的离面变形,而对应的两幅强度图信息并没有被利用,而是被抛弃。在实验力学领域,2D-DIC 技术是一种简单有效的面内变形测量技术。通过对比变形前后两幅图像随机强度分布的变化,2D-DIC 获得全场亚像素准确性的面内形变。因此该课题借鉴了 2D-DIC 对强度图的处理并提取面内形变的能力,提出只采用一个简单的数字全息系统的方案。该方案获得的物体变形前后的两幅量化复强度图进行如下处理:对于对应的两幅相位图,仍然用于计算对应离面的形变;但是不再抛弃对应的两幅强度图,而是采用 2D-DIC 处理,获得其中包含的面内形变信息。进而通过这一套简单的数字全息系统,完成了同时的面内、离面的三维变形测量。

Morteza Khaleghi 等[22]人提出了一种结合一维变形与三维形貌获得全场三维变形的方法。该方法的实验对象是耳膜。其三维形貌是通过无透镜双波长数字全息系统获得。一维的形变是通过单波长频闪全息获得。此全息系统采用平行的照明和观察方向。将耳膜表面的每点的形貌法线矢量方向分解为三个互相垂直的轴。将形貌信息与一维形变结合,利用薄壳理论 (thin-shell theory) 通过计算获得每点位置处耳膜表面的全场三维形貌信息。这样只基于一套简单紧凑的耳镜系统就可以获得耳膜的形貌和三维形变信息。进而开展耳膜形貌形变特性与耳膜功能关系的进一步研究。

Rishikesh Kulkarni 等[23]人提出了一种可以从一个数字全息干涉场同时测量三维位移的技术。物体采用三个角度照明光照明后,三束物光与一束参考光在一个 CCD 面上形成数字全息图。变形前变形后分别记录一幅全息图,共记录两幅全息图。有两幅全息图计算出的全息干涉场被分成多个矩形部分,每个矩形部分中,干涉场被表达成多元素低阶二维相位多项式信号。通过估计这些多项式的系数计算对应的三束光的干涉场的干涉相位。进而获得三个方向的形变。

2.5 形变形貌综合测量

在实际的测量中,曲面物体大量存在。曲面物体的形变测量需要借助形貌信息,才能获得对应的离面和面内位移。为此,研究工作者提出了许多针对形貌形变同时测量的方法。

吴思进等采用数字散斑干涉与数字条纹投影相结合的测量方法[24],利用数字条纹投影测量物体形貌,利用数字全息技术测量物体微形变。该方法是通过在数字全息系统中引入条纹投影设备,进而在一个光路中实现物体表面形貌与微形变的同时测量。

María del Socorro Hernández-Montes 等设计了一种基于离面敏感数字全息干涉仪的全自动光机电测量系统用于测量 360°物体轮廓以及其表面形变[25]。对于形变测量,该系统在特定的光照位置利用双曝光全息干涉法可以直接测量物体的形变。同时,该系

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统利用基于双曝光全息干涉法的两点光照法进行表面轮廓的测量:在不同的光照位置获取两幅全息图,两幅全息图之间的相位差对应于物体的等高线分布,即可用于确定物体的三维轮廓。

对于曲面物体的形变测量,为了确定其形变方向,往往需要获取曲面物体的形貌。该课题组提出了一种针对曲面物体离面形变的数字散斑干涉系统[26]。该系统具备高效和动态测量的优点。该系统只需单光束照明物体外加一束参考光就能完成物体的形貌与形变测量。当需要测量物体形貌时,对照射物体的光束进行偏转,对偏转前后的散斑干涉图像求解得到形貌。当进行物体形变测量时,保持光束固定,对物体变形前后的散斑干涉图像进行求解,并结合物体形貌信息得到物体形变。

测量系统的光路图如图 6 所示。对于曲面物体而言,利用数字散斑干涉法得到的形变只是光轴方向的形变分量。如要获得真实的离面形变,需要获知

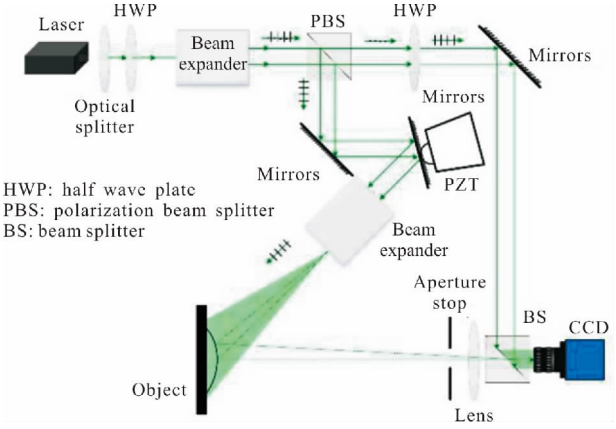


图 6 数字散斑干涉形变形貌综合测量原理图

Fig.6 Schematic diagram of digital speckle interferometry deformation morphological synthesis measurement

物体表面任一点 M 的光轴方向(MO 方向)和粗糙表面法线方向(MN 方向)之间的夹角 ε。如图 7 所示,假设 M 为物体表面的任意一点,沿着光轴方向,M 移动到 P 点,则 $d(d=MP)$为物体表面在光轴方向的形变,HP 垂直于入射光 I,则变形前后的光程差可表示为[27-28]:

$$\Delta L=d(1+\cos\theta) \tag{8}$$

式中:θ 为入射光线和出射光线之前的夹角。则离面方向的形变 $d_n=MN$ 为:

$$d_n=\frac{\lambda}{2\pi}\frac{\Delta\delta_u}{(1+\cos\theta)\cos(\varepsilon)} \tag{9}$$

对于曲面物体来说,ε 是随着曲面物体表面而变化的量(对于平面物体,ε=90°)。因此,要想获得曲面物体表面的离面形变,必须要先求解物体的三维形貌,获得物体表面任意一点的法线方向与光轴方向的夹角。

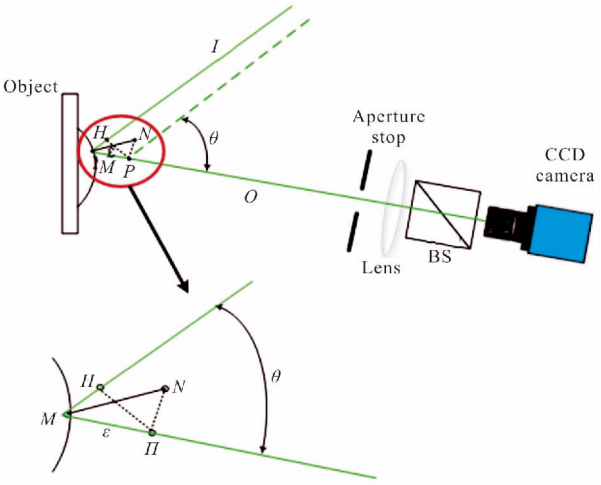


图 7 DSPI 系统形变测量几何示意图

Fig.7 Illustration of the principle of deformation measurement by DSPI

该系统的形貌测量与形变测量的原理相同,测量时通过引入物光光程差,光程改变前后各记录一幅散斑图,通过物面高度与光程差(散斑条纹图相位差中获得光程差)之间的关系重建物体的三维形貌。通过照明光束偏转的方法引入光程差。通过 CCD 记录物体偏转前后的两幅散斑干涉图,解算相位变化。通过建立物体表面高度和相位差之间的关系,重建物体三维形貌。文中采用 PZT 平动光纤头的方式引入照明光束的偏转。形貌测量原理光路如图 8 所示。

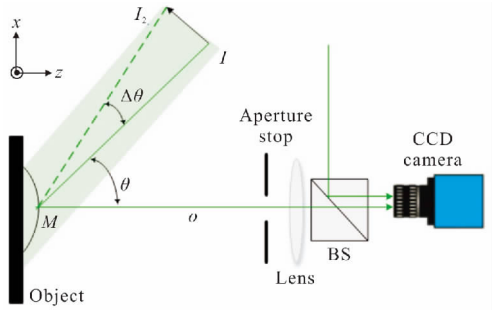


图 8 DSPI 系统进行形貌测量的几何示意图

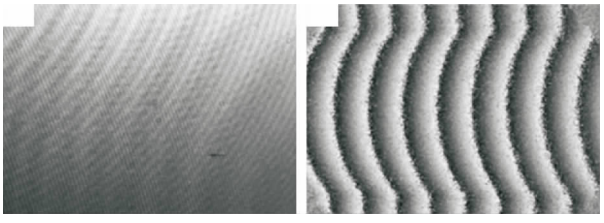
Fig.8 Illustration of the principle of shape measurement by DSPI

系统光路中,入射角 θ(敏感矢量)用来调整光束

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

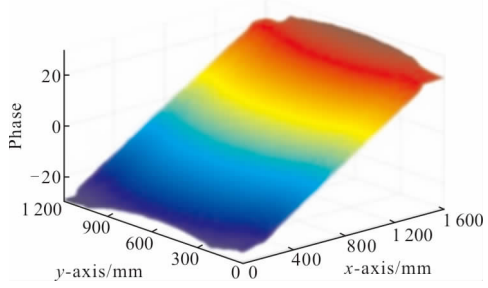
偏转前后的光程差对轴向和横向的敏感度。由公式(8)可知，当 θ 越大时，对轴向(物体高度)越敏感，但是当 θ 过大时，物体的高度会影响被测物远端的照明，因此 θ 通常在 40°~50°之间[22]。

在数字散斑干涉法测量物体形貌实验中，所选取的被测试件为 3D 打印的弓高为 9 mm 的圆柱面。通过三维旋转台，使光束偏转。重建的试件形貌如图9 所示。测量得到的圆柱面弓高均值为 9.11 mm，考虑到 3D 打印的精度在 0.05~0.4 mm 的范围内，物体表面还喷涂了一层漫反射材料，因此，该方法原理验证成功。



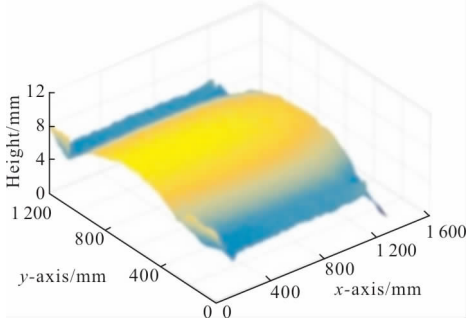
(a) 形貌测量散斑干涉图 (b) 受形貌调制的散斑干涉条纹

(a) Speckle interferogram of contour measurement (b) Speckle interference fringes modulated by contour



(c) 受形貌调制的连续相位

(c) Consecutive phase modulated by contour



(d) 形貌高度矩阵

(d) Contour height matrix

图 9 原理实验装置形貌测量结果

Fig.9 Shape measurement results by experimental prototype

2.6 数字全息振动测量关键技术

2017 年，M. Stipčevic 等[29]人提出一种用时间平均数字全息方法有效测量未知振动频率和相位的方法。作者从理论上推导了重建一个完整振动周期的全息图所需要记录全息图的时间，并通过对振动模型可以用数学公式精确表达的悬臂梁结构在低频 100 Hz 谐振下条件下的实验来进行验证。得出如下结论。在知道相位的条件下，可以通过记录半个周期的全息图实现对完整周期全息图的重建。未知相位条件下，记录整周期全息图可以实现对一个完整振动周期全息图的重建。以此为基础，开发并验证了一套测量未知振动周期及振动相位的程序，其基本实现过程为：记录一系列的全息图，以一定的间隔在假定的周期范围内对可能的未知周期进行扫描，粗略估计振动周期；然后用最小二乘法求解，得到粗略的振动相位，进而用牛顿法获得精确估计的振动周期，再将精确估计的振动周期值用最小二乘法求解得到精确的振动相位。作者用该程序对悬臂梁结构的振动进行测试，结果表明：该方法能够准确测量物体振动周期及相位。

2015 年，L. Krzemień 等[30]人用数字散斑干涉(DSPI)和数字剪切散斑干涉(DSSPI)结合的方法实现了对文物保护工作室环境下的物体振动形变测量。图 10 为该方法的原理图，该方法将 DSSPI对环境扰动因素不敏感的特点和 DSPI 不受视场中局部特征

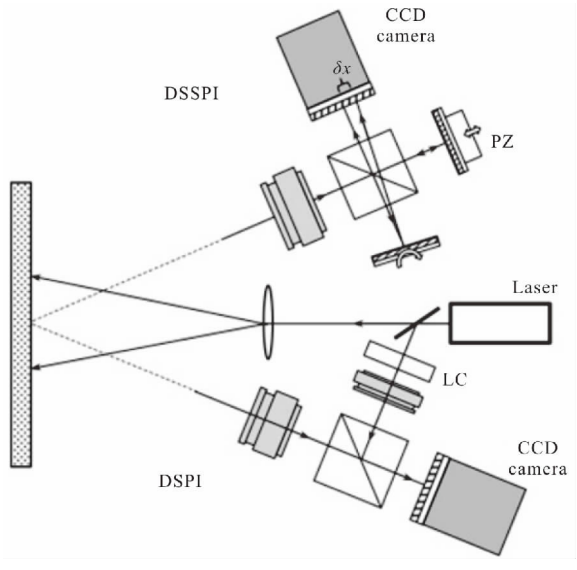


图 10 DSPI 及 DSSPI 结合表面振动测量原理图

Fig.10 Layout of vibration measurement by combining DSPI and DSSPI

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响的优点结合起来，实现了对声波振动诱导下文物缺陷的检测。该方法的提出，为散斑干涉法在工业现场环境的应用提供了一种有效的方案。

2017 年，T. Statsenko 等[31]人在时间平均法数字散斑干涉测振中，提出一种通过表面优化来重建形变的方法。针对时间平均法测振面临的两个问题：相位幅度的获取及相邻区域相对彼此相位同异相判断，提出一种用罗森布罗克算法模拟位移表面的方法，来判断表面各区域相位的同异相性。为更加准确地测量振动形变模态提供了一种有效的方法。

3 数字全息及散斑干涉形变测量的应用

3.1 全息形变测量的应用

2012 年，G.N. Oliveira 等[32]人将数字傅里叶变换全息技术应用于高聚合物材料机械形变的测量，并用测得的形变位移值计算材料的剪切强度，实验数据拟合得到的剪切应力和应变的关系曲线与集中理论模型计算得到的数据进行比较，验证了方法的有效性。

2013 年，C. Furlong 等[33]人将数字全息的方法应用于人耳膜的形变测量，用声波振动的方法诱导人中耳膜的变化来帮助诊断治疗听力问题。该方法克服已有方法只能获取耳膜平均质量信息的缺陷，能够获得耳膜全场的形貌及其在声音激励下的三维变形，对全面诊断评估病人患病程度有着非常重要的价值。图 11 为其测得的鼓膜形貌及多个维度的形变值，可以看到该种方法能够量化的测量鼓膜的形状、结构和声音诱导下的三维位移，为评估耳膜的状态及诊断中耳问题提供依据，说明该全息测量方法可以应用于耳膜的形变测量，为医疗诊断提供更好的参考。但目前，该方法还存在测量速度及分辨率较低的问题，还需进一步研究完善。

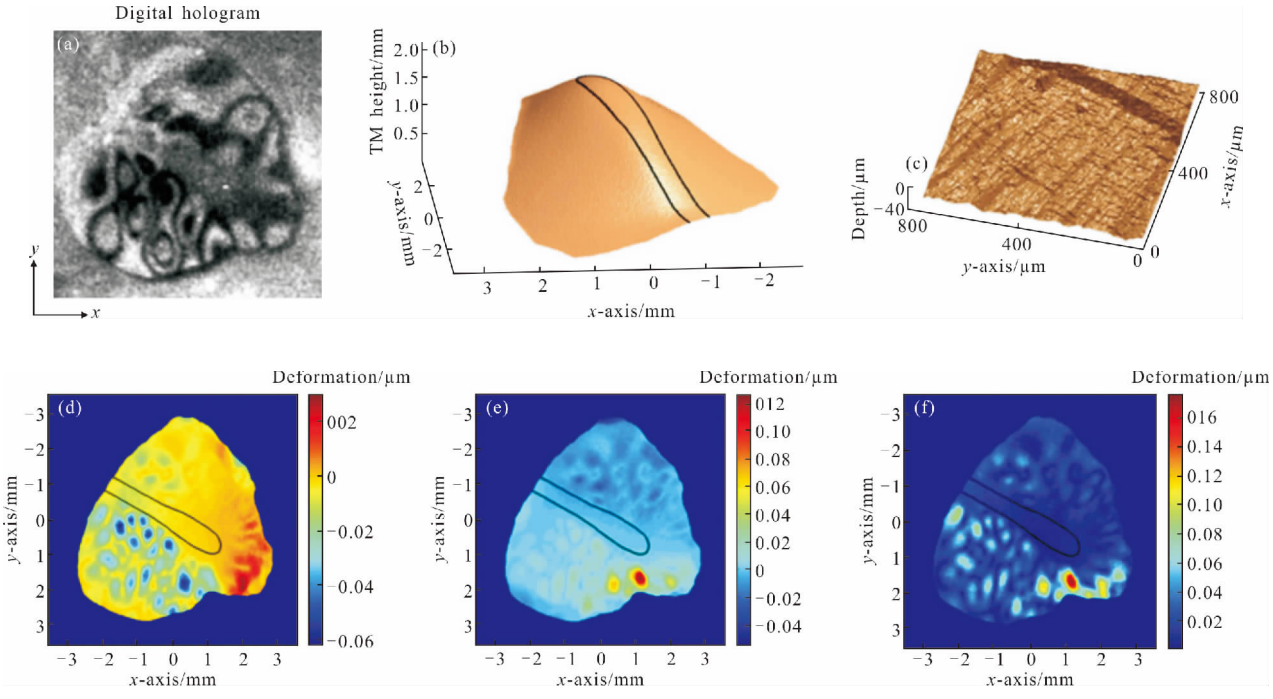


图 11 鼓膜多维度测量的代表性结果

Fig.11 Representative results of multi-domain measurement of the tympanic membrane

2018 年，P. Xia 等[34]人用校正的相移数字全息系统对 USB 存储器芯片的热变形进行了测试。其创新地将激光干涉方法引入光路校正相移 PZT 的位移误差提高测量结果的精度。系统中，使用两个相机，一个用来记录变形前后及各相移状态下的全息图，一个用来记录各相移值下的干涉条纹图，通过干涉条纹图测得的位移来对 PZT 位移误差进行校准，从而实现更加精确的测量。但由于在测试过程中，热变形的速率较快，需在短时间内实现相移和记录才能保证测量的是同一温度下的变形。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2018 年,M. Kumar 等[35]人用数字全息干涉的方法对不同犬齿收缩机制下人下颌骨犬齿和臼齿的位移进行测量。比较在 150 g 和 200 g 力负载及有无横腭弓支撑条件下,三种滑移机制下犬齿和臼齿的最大位移。说明数字全息干涉的方法可以应用于口腔矫正医学中形变、位移、应变的测量。

2019 年,N.C. Maile 等[36]人用双曝光数字全息干涉技术对二氧化锰薄膜随时间沉积过程进行研究,并对薄膜厚度与应力之间的关系进行分析,说明数字全息干涉技术可以应用于材料合成过程的研究。

2012 年,李斌等人[37]采用电子散斑干涉技术对 R1、R2 两种型号光固化复合树脂填充到牙体后的固化收缩量进行测量。首先,将被测牙齿用夹板固定于隔振台上,通过 CCD 获取复合树脂固化过程中的电子散斑干涉条纹图。然后对干涉条纹图进行处理,得到了不同情况下 R1、R2 型光固化复合树脂固化时离面收缩量与时间的关系,并对影响复合树脂收缩变形的因素进行分析。结果表明:牙体上窝洞的宽度越大,复合树脂固化后的离面收缩量也越大;R1 型复合树脂收缩量小于 R2 型,更适合临床应用。该结论为复合树脂的临床应用与性能改进提供了实验依据和指导作用。

2012 年,许星等人[38]提出了一种利用数字散斑干涉测量离面位移来获得材料内部较深层缺陷的方法。采用弹性理论分析结合数字散斑干涉测量实验的方法,分析了含内部缺陷试件的离面位移分布。以含有圆形缺陷的周边固支的铝质试件为测量对象,CCD 采集变形前后的散斑图,通过时间相移法提取出相位,再经过同态滤波和相位展开技术得到连续相位的分布,根据连续相位分布,得到离面位移分布。进一步利用数值拟合和数值微分得到离面位移的 1 阶导数分布。从离面位移的 1 阶导数分布图上就可测得缺陷的半径,在此基础上结合由理论得到的离面位移分布函数,可以实现对缺陷深度的检测。该方法为进一步研究材料内部较深层缺陷提供了良好的理论与实验基础。

2018 年,Manoj Kumar 等人[39]提出了一种利用数字散斑干涉测量人上颌骨微螺钉周围皮质骨形变的方法。通过镍钛螺旋回缩弹簧加载微型螺钉植入物,使骨–股骨界面周围皮质骨变形。再通过数字散斑干涉系统测量皮质骨中的离面和面内变形。在 DSPI 中,分别记录伸缩弹簧加载前和加载后相对应的散斑图。对这两个散斑图作相减处理,获得散斑条纹图。采用里斯变换和单基因信号法从单个散斑条纹图中提取相位信息,再通过 Goldstein 相位展开法得到连续分布相位。所得的相位用于测量皮质骨的变形。测出皮质骨的变形后就可根据它的变形分布优化螺钉植入物的几何参数。

2018 年,Chenjia Gao 等人[40]提出一种新的结合了时间序列光学干涉和显微镜技术的基于时间显微散斑干涉的测量系统,并对微型温度传感器的微悬臂梁的位移进行了测量。与传统的由于采用移相装置而无法实现时间和连续位移测量的电子散斑干涉法相比,这种省略了移相装置、按时间顺序记录干涉图的散斑干涉法可以实现动态连续测量。采用 Linnik 微干涉系统来测量微机电系统(MEMS)的实时位移,在测量过程中,在微悬臂梁的自由端放置一个压电传感器(PZT),以引起连续的位移变化。采集位移前后散斑干涉图后,利用小波变换和相位展开算法对图像进行处理,得到连续的相位信息,然后通过数值计算得到系统的动态位移。在测量过程中,由于 PZT 推动自由端,固定端不移动,微悬臂上的不同部分将形成相应的位移。因此,该系统可以改变被测部件各点的光路,获得动态的全场位移。

3.2 全息振动测量的应用

2018 年,S. Rajput 等[41]人将全息技术应用于声场振动频率及声功率的测量,通过测量折射率随声波变化而变化的声波传播介质在光路中引入的相位变化,应用数字全息干涉的方法对相位变化以干涉图的方式用高速传感器进行记录并重建后得到相位随时间变化的函数关系,测量得到声波的振幅和频率值。笔者通过测量标准物体(音叉,扬声器鼓膜)振动产生固定振动频率信号的声波来验证系统对声波频率参数的测量能力和稳定性。用数字全息的方法分别测得低频 528 Hz (音叉产生),低频 300 Hz 和 500 Hz(扬声器产生),高频 12 000 Hz(扬声器产生)信号带来的相位随时间变化的关系,以视场中某点相位随时间变化的关系计算得到的频率与产生的频率进行对比,验证了测量系统对信号频率的测量能力和稳定性。并用数字全息测得的方法对不同幅度比例的 12 000 Hz 信号的幅度进行测量与麦克风方式测得的信号幅度进行对比研究,验证了测量系统对

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

信号幅度的测量能力和稳定性。但用笔者提出的方法测量信号频率范围(帧率的 1/2)受图像传感器帧率的限制。

2017 年,P.S. Gandhi 等[42]人将数字散斑干涉技术应用于低键数液滴的振动测量。针对喷墨打印、喷雾燃烧以及滴灌自动化等工业应用中对液滴振动频率和模态的测试需求,之前的研究都是对重力主导的键数大于 2 的液滴的测量,而对更小的键数范围 0.24~1.37 的液滴振动频率及形态缺乏有效的测量手段。作者用数字散斑干涉技术分别对亲水基表面和疏水基表面液滴振动频率及模式进行测量,测得的结果理论模型基本一致,说明测试方法的可行性和有效性。

2018 年,Y. H. Ma 等[43]人将散斑干涉技术应用于泡沫铝悬臂梁结构振动影响研究,测得的振动模态形状与有限元仿真的结果相吻合,同时能够实现对铝泡沫材料的机械特性–杨氏模量的测量,表明数字散斑干涉技术能够应用于泡沫金属材料机械特性的测量。

2018 年,P. Mrozek 等[44]将散斑干涉技术应用于刀具的振动特性测量,测得的结果与 XL–80 激光干涉系统进行对比,验证了该方法在测量材料频率属性和振动模态方面的有效性,为工具切割速度选择提供依据。

4 结 论

总的来说,数字全息技术从原来显微方面,逐步拓展到大物体、较大高度物体的三维测量,其应用逐步从工业拓展到生物医学研究方面。散斑干涉技术逐步从单一方向形变测量向多方向综合形变测量发展,对于曲面物体的测量,结合形貌更加准确测量其里面形变的形貌形变综合测量方法已经取得一些研究成果。对于散斑干涉法测量物体振动方法的研究也已逐步能够在非实验环境中进行,与散斑剪切干涉法相结合的散斑干涉测量法具有更好的抗环境扰动能力。未来,随着研究的进一步深入,数字全息和散斑干涉技术将更好地融入人们的生活,为工业测量、生物医学研究提供更加精确的测量手段。

参考文献:

[1] Bettens S, Yan H, Blinder D, et al. Studies on the sparsifying operator in compressive digital holography [J]. ***Opt Express***, 2017, 25(16): 18656–18676.

[2] Asundi A, Cai P, Hao Y, et al. Investigation of the systematic axial measurement error caused by the space variance effect in digital holography [J]. ***Opt Lasers Eng***, 2018, 112: 16–25.

[3] Hao Y, Asundi A. Impact of charge-coupled device size on axial measurement error in digital holographic system[J]. ***Opt Lett***, 2013, 38 (8): 1194–1196.

[4] Yan F, Yan H, Yu Y, et al. The suppression of phase error by applying window functions to digital holography [J]. ***Opt Lasers Eng***, 2016, 86: 206–215.

[5] Bhaduri B, Kothiyal M P, Mohan N K. A comparative study of phase-shifting algorithms in digital speckle pattern interferometry[J]. ***Optik***, 2008, 119(3): 147–152.

[6] North Morris M, Millerd J, Brock N, et al. Dynamic phase-shifting electronic speckle pattern interferometer [J]. ***Opt Manuf Test***, 2005, 5869: 58691B.

[7] Awatsuji Y. Parallel phase-shifting digital holography [J]. ***Multi-Dimensional Imaging***, 2014, 85(6): 1069–1071.

[8] Cai L Z, Liu Q, Yang X L. Reply to comment on "phase-shift extraction and wave-front reconstruction in phase-shifting interferometry with arbitrary phase steps" [J]. ***Opt Lett***, 2004, 29(19): 1808–1810.

[9] Kao C C, Yeh G B, Lee S S, et al. Phase-shifting algorithms for electronic speckle pattern interferometry [J]. ***Appl Opt***, 2007, 41(1): 46–54.

[10] He X, Nguyen C V, Pratap M, et al. Automated Fourier space region-recognition filtering for off-axis digital holographic microscopy [J]. ***Biomed Opt Express***, 2016, 7 (8): 3111–3123.

[11] Arai Y. Electronic speckle pattern interferometry based on spatial information using only two sheets of speckle patterns [J]. ***J Mod Opt***, 2014, 61(4): 297–306.

[12] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography[J]. ***Appl Opt***, 2008, 39(23): 4070–4075.

[13] De la Torre Ibarra M H, Flores Moreno J M, Aguayo D D, et al. Displacement measurements over a square meter area using digital holographic interferometry [J]. ***Opt Eng***, 2014, 53(9): 092009.

[14] Vandenrijt J F, Thizy C, Martin L, et al. Digital holographic interferometry in the long-wave infrared and temporal phase unwrapping for measuring large deformations and rigid body motions of segmented space detector in cryogenic test [J].

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Opt Eng, 2016, 55(12): 121723.

[15] Wang Y H, Feng J Y, Wang X, et al. Shearing speckle interfermometry based on slit aperture for dynamic measurement[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23 (3): 645-651. (in Chinese)

[16] Liu K, Wu S J, Gao X Y, et al. Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane deformations using dual-beam spatial-carrier digital speckle pattern interferometry [J]. ***Appl Mech Mater***, 2015, 782: 316-325.

[17] Kemao Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. ***Opt Lasers Eng***, 2007, 45(2): 304-317.

[18] Xiao Q, Li J, Zeng Z. A Denoising scheme for DSPI phase based on improved variational mode decomposition[J]. ***Mech Syst Signal Process***, 2018, 110: 28-41.

[19] Zhao M, Kemao Q. Quality-guided phase unwrapping implementation: An improved indexed interwoven linked list [J]. ***Appl Opt***, 2014, 53(16): 3492-3500.

[20] Schwede R, Babovsky H, Kiessling A, et al. Measurement of three-dimensional deformation vectors with digital holography and stereophotogrammetry[J]. ***Opt Lett***, 2012, 37(11): 1943-1945.

[21] Yan H, Pan B. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital holography and digital image correlation[J]. ***Opt Lett***, 2014, 39(17): 5166-5169.

[22] Khaleghi M, Lu W, Dobrev I, et al. Digital holographic measurements of shape and three-dimensional sound-induced displacements of tympanic membrane[J]. ***Opt Eng***, 2013, 52 (10): 101916.

[23] Kulkarni R, Rastogi P. Three-dimensional displacement measurement from phase signals embedded in a frame in digital holographic interferometry [J]. ***Appl Opt***, 2015, 54 (11): 3393-3397.

[24] Jiang Y P, Wu S J, Yang L X, et al. Simultaneous measurement of contour and micro-deformation using full-field optical methods[J]. ***Journal of Appl Opt***, 2017, 38(1): 67-71. (in Chinese)

[25] López U U, Hernández-Montes M del S, Mendoza-Santoyo F. Fully automated digital holographic interferometer for 360Deg contour and displacement measurements [J]. ***Opt Eng***, 2016, 55(12): 121719.

[26] Li P F, Cai P, Long J, et al. Measurement of out-of-plane deformation of curved objects with digital speckle pattern interferometry [J]. ***Chinese Optics Letters***, 2018, 16(11): 111202. (in Chinese)

[27] Ma J, Wang Y H, An D, et al. Three-dimensional object shape measurement based on deflection method [J]. ***Tool Eng***, 2014, 48(6): 80-83. (in Chinese)

[28] Song C, Guru Prasad A S, Chan K H K, et al. Characterization and optimization of illumination vector for contouring surface form and feature using DSPI [J]. ***Rev Sci Instrum***, 2016, 87(6): 063116.

[29] Stipcevic M, Demoli N, Skenderovic H, et al. Effective procedure for determination of unknown vibration frequency and phase using time-averaged digital holography [J]. ***Opt Express***, 2017, 25(9): 10241-10254.

[30] Krzemień L, Łukomski M, Kijowska A, et al. Combining digital speckle pattern interferometry with shearography in a new instrument to characterize surface delamination in museum artefacts[J]. ***J Cult Herit***, 2015, 16(4): 544-550.

[31] Statsenko T, Chatziioannou V, Moore T, et al. Deformation reconstruction by means of surface optimization Part II: time-resolved electronic speckle pattern interferometry [J]. ***Appl Opt***, 2017, 56(3): 654-661.

[32] Oliveira G N, Rodrigues D M C, Nunes L C S, et al. Digital Fourier transform holography applied to investigate mechanical deformation in polymers [J]. ***Opt Lasers Eng***, 2012, 50(12): 1798-1803.

[33] Furlong C, Dobrev I, Rosowski J, et al. Assessing eardrum deformation by digital holography [J]. ***SPIE Newsroom***, 2013: 4612-4614.

[34] Xia P, Ri S, Wang Q, et al. Nanometer-order thermal deformation measurement by a calibrated phase-shifting digital holography system [J]. ***Opt Express***, 2018, 26(10): 12594-12604.

[35] Kumar M, Birhman A S, Kannan S. Measurement of initial displacement of canine and molar in human maxilla under different canine retraction methods using digital holographic interferometry[J]. ***Opt Eng***, 2018, 57(9): 094106.

[36] Maile N C, Mahadik S B, Takale M V, et al. Surface deformation studies of MnO_2 film by double exposure digital holographic interferometry technique [J]. ***Mater Res Express***, 2019, 6(4): 1-8.

[37] Li B, Yang G B. Electronic speckle pattern interferometry method applied to measurement of shrinkage deformation of light-cured composite resin[J]. ***Journal of Tongji University (Natural Science)***, 2012, 40(1): 133-136. (in Chinese)

[38] Xu X, Wang K F, Gu G Q, et al. Measurement of internal material flaws based on out-of-plane displacement digital

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

speckle pattern interferometry [J]. ***Laser Tech***, 2012, 36(4): 548-552. (in Chinese)

[39] Kumar M, Shakher C, Agarwal R, et al. Deformation measurements in cortical bone-miniscrew interface in human maxilla by using digital speckle pattern interferometry [C]// SPIE, 2018, 10834: 1083412.

[40] Gao C, Gao Z, Wang X, et al. Real-time measurement of microcantilever displacement based on linnik microscopic speckle interferometer[J]. ***Opt Eng***, 2018, 57(12): 124101.

[41] Rajput S K, Matoba O, Awatsuji Y. Characteristics of vibration frequency measurement based on sound field imaging by digital holography[J]. ***OSA Contin***, 2018, 1(1): 200-212.

[42] Gandhi P S, Deepak S A, Agrawal P. Experimental measurement of vibration of liquid droplet at low bond numbers using ESPI [C]//Fluid Mechanics and Fluid Power-Contemporary Research, 2017: 1371-1379.

[43] Ma Y H, Tao N, Dai M L, et al. Investigation on vibration response of aluminum foam beams using speckle interferometry[J]. ***Exp Tech***, 2018, 42(1): 69-77.

[44] Mrozek P, Mrozek E, Werner A. Electronic speckle pattern interferometry for vibrational analysis of cutting tools [J]. ***Acta Mech Autom***, 2018, 12(2): 135-140.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net