

壁画文物缺陷的数字全息检测与分析

周文静^{1,3*}, 李安琦¹, 陈振凯¹, 李广华^{2,3}, 曲亮^{2,3}, 于瀛洁^{1,3}¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;²故宫博物院, 北京 100009;³中国—希腊文物保护技术“一带一路”联合实验室, 北京 100009

摘要 利用漫反射表面全息图记录原理,结合声波扫频激励方式,针对壁画文物表面及亚表面存在的裂纹、空鼓等缺陷检测需求,本团队研制了便携式数字全息形变检测系统;采用基于高斯 1σ 准则和直方图分割消除声波振动引入的背景相位,实现缺陷与背景信息的剥离,并将研制的系统应用于北京故宫博物院内壁画文物的原位检测与分析。结果表明:声波激励可以有效激励表面或亚表面微观缺陷形成异常干涉条纹;基于所提出的背景相位消除算法能有效提取缺陷的位置和轮廓特征,实现被测壁画表面微观裂纹或亚表面空鼓、异常结构的检测与分析,为壁画健康诊断、修复和保护提供可量化的参考依据。

关键词 全息; 壁画; 漫反射表面; 缺陷检测; 声波激励

中图分类号 TH878 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230866

1 引言

我国现存古建筑中保存着大量的古代壁画类文物^[1],这些文物蕴含着丰富的人文、宗教、经济、生活等史料信息^[2]。但历经千百年风雨洗礼后,壁画表面及亚表面存在不同程度的损害,如开裂、空鼓、地仗脱落、霉变和颜料脱落等^[3-5],不同的损害都有对应的缺陷结构特征,实现缺陷检测有利于文物损害的诊断与修复。光学检测技术作为一种先进的诊断手段已被应用于文物修复与保护领域,如光谱分析(拉曼光谱技术^[6-7]、高光谱技术^[8]、多光谱技术^[9]等)和成像技术(如热-准反射成像^[10-11]、X射线成像^[12-14]、太赫兹成像^[15-16]、光学干涉成像^[17-18]等),但这些技术多为二维图像检测或化学成分检测。文物表面肉眼不可见的微观缺陷或亚表面缺陷是引起文物进一步损害的根源,如能获得文物表面或亚表面缺陷的关键信息,就有利于实现文物损害的诊断以及缺陷的形成分析与生长预测。数字全息技术能记录和重建物体的相位信息,不仅能实现三维形貌检测,还能结合外部激励方式通过干涉条纹的异常特征表征被测物体表面或亚表面的微观形变,非常适合于壁画文物表面或亚表面的缺陷检测。全息技术具有三维性、无损性及全场性等特点,早在1974就被用于壁画文物缺陷成像研究^[19],当时采用单板双曝光记录或双板双曝光记录,但由于全息干板记录系统的成本很高,处理起来比较费时,不适合现场采集文物信

息,因此未在文物保护领域广泛应用。随着电子技术的发展,传统全息技术结合电子记录器件可以方便地实现原位检测。为了区别于传统的全息技术,加之壁画表面表现为漫反射光学特性,研究人员将该技术称为“电子散斑干涉技术”^[19]。基于传统全息技术原理的电子散斑干涉技术已被广泛应用于文物保护研究,如用于实现一些文物表面损坏和裂缝的检测^[20],或者温度湿度变化下缺陷变化的检测等^[21],对缺陷的检测精度能够达到微米、亚微米量级^[22]。但是,上述研究中均采用异常干涉条纹对缺陷进行定性分析,未能实现缺陷自身特征信息的表达和分析。

本团队根据数字全息漫反射成像原理,结合声波扫频激励方式,设计并研制了便携式数字全息形变检测系统,该系统基于数字全息图相位提取算法和声波振动引入球差相位消除算法,获取形变的相位分布。将该系统应用于故宫博物院如亭内廊壁画文物的原位检测与分析,结果表明,数字全息的无损检测特性与声波的无损激励方式相结合,使得该系统能以无损的方式获得被测文物表面及亚表面的损伤状态,从而为壁画文物的修复和保护提供科学依据。

2 数字全息漫反射成像原理及形变检测系统设计

2.1 数字全息漫反射成像原理

壁画文物表面粗糙,具有漫反射光学特性。相干

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-07-02; 录用日期: 2023-07-06; 网络首发日期: 2023-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0204600)

通信作者: *lazybee@shu.edu.cn

光源照射漫反射表面时,由于散射光到达成像面的光程差不同,彼此之间会在像面上形成随机干涉现象,在空间分布上表现为明暗变化的颗粒图样,即散斑图像。

因此,与参考光束干涉后形成的全息图也被称为散斑干涉图。数字全息漫反射成像系统的原理如图 1 所示。

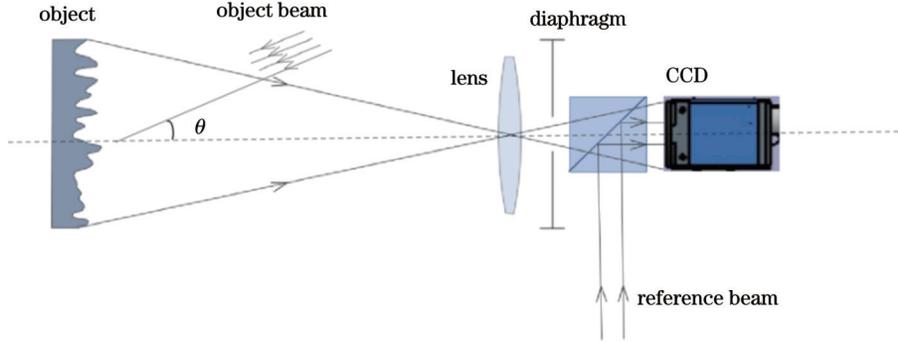


图 1 数字全息漫反射成像系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital holographic diffuse imaging system

基于光学干涉原理,物体变形前后用 CCD 记录的全息图可以表达为

$$h_k(x, y) = a(x, y) + c_k(x, y) + c_k^*(x, y), \quad (1)$$

式中: $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; $c_0(x, y)$ 代表物体表面受激励发生变形前的物波复振幅; $c_k(x, y) (k = 1, 2, 3, \dots)$ 表示物体表面受激励发生变形后第 k 张图像的物波复振幅; $c_k^*(x, y)$ 表示共轭像的复振幅; $a(x, y)$ 是零级像。

复振幅 $c_0(x, y)$ 和 $c_k(x, y)$ 的具体表达式为

$$c_0(x, y) = \frac{b(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]}{2}, \quad (2)$$

$$c_k(x, y) = \frac{b(x, y) \exp\{j[\varphi(x, y) + \Delta\varphi_k(x, y)]\}}{2}, \quad (3)$$

式中: $b(x, y)$ 是调制光; $\varphi(x, y)$ 是初始相位; $\Delta\varphi_k(x, y)$ 是第 k 张图像的变形相位。

为了获得变形相位 $\Delta\varphi_k(x, y)$, 在 x 和 y 方向引入载波(即离轴式干涉), 载波频率分别为 f_x 和 f_y , 将式(1)进行傅里叶变换, 得到全息图 $h(x, y)$ 的频谱分布为

$$H_k(\omega_x, \omega_y) = A(\omega_x, \omega_y) + C_k(\omega_x - f_x, \omega_y - f_y) + C_k^*(\omega_x + f_x, \omega_y + f_y), \quad (4)$$

式中: ω_x 和 ω_y 分别是频域中的坐标, 其中 x 和 y 分别是

空间域中的坐标; $H_k(\omega_x, \omega_y)$ 和 $A(\omega_x, \omega_y)$ 表示零级像; $C_k(\omega_x - f_x, \omega_y - f_y)$ 表示正一级像; $C_k^*(\omega_x + f_x, \omega_y + f_y)$ 表示负一级像(即共轭像)。对频谱进行带通滤波, 提取出正一级像并将其移动到频谱中心(以消除频移量和负一级像), 然后进行傅里叶逆变换, 获得复振幅 $c_0(x, y)$ 和 $c_k(x, y)$ 。

由于复振幅 $c_0(x, y)$ 和 $c_k(x, y)$ 彼此只存在相位差, 因此, 与光学干涉原理类似, 可将 $c_0(x, y)$ 和 $c_k(x, y)$ 进行干涉处理, 得到变形相位 $\Delta\varphi_k(x, y)$ 的表达式为

$$\Delta\varphi_k(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[c_0(x, y) \times c_k^*(x, y)]}{\text{Re}[c_0(x, y) \times c_k^*(x, y)]} \right\}. \quad (5)$$

变形相位分布 $\Delta\varphi_k(x, y)$ 与物体实际变形量分布 $w_k(x, y)$ 的关系为

$$w_k(x, y) = \Delta\varphi_k(x, y) \cdot \frac{\lambda}{(1 + \cos \theta) 2\pi}, \quad (6)$$

式中: λ 表示激光波长; θ 表示物光与 CCD 轴线之间的夹角。

综上, 可将数字全息形变检测流程总结为如图 2 所示的流程图。

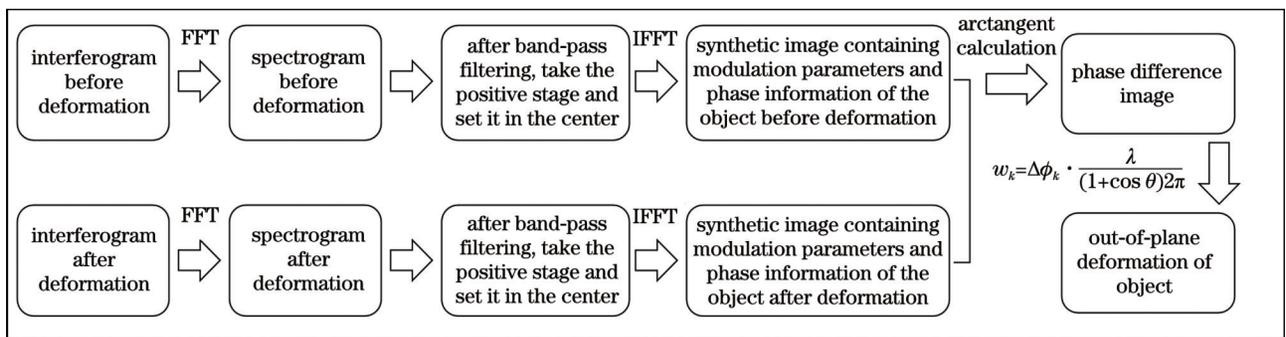


图 2 数字全息形变检测流程图

Fig. 2 Flow chart of digital holographic deformation detection

2.2 数字全息形变检测系统设计及测试

基于上述漫反射表面数字全息干涉原理,本团队设计了数字全息形变检测实验系统,如图 3(a)所示。该系统采用波长为 532 nm 的绿色激光器作为相干光源,光源经光纤分束器分为两束光波,一束光波照射待测漫反射表面,经其反射后形成物光,物光经成像透镜、光阑和分光棱镜后在 CCD 感光面上成像。另一束光波作为参考光,其经过渐变密度减光片、分光棱镜后以一定角度投射到 CCD 感光面上,与物光会合形成干

涉图,干涉图由 CCD 记录。CCD 感光面的像素量为 3648×5472 ,单个像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$ 。

为验证数字全息形变检测系统对漫反射表面缺陷检测的可行性,选取表面涂有白色颗粒漆的铝板作为实验样本,如图 3(b)所示。在铝板背后安装一个千分螺旋测微头,如图 3(c)所示,通过旋转螺旋测微头进行力激励,使铝板在轴向产生微小的位移。系统检测视场范围约为 $80 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,即光路系统的缩小倍率约为 $1/10$,如图 3(b)所示。

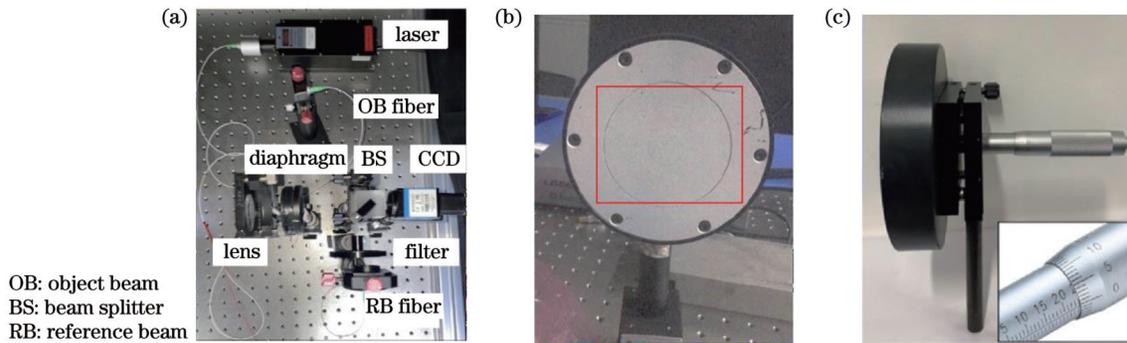


图 3 数字全息形变检测系统及实验样本。(a)实验系统照片;(b)铝板样本;(c)螺旋测微头

Fig. 3 Digital holographic deformation detection system and experimental samples. (a) Photo of the experimental system; (b) aluminum plate sample; (c) spiral micrometer

根据图 2 所示数字全息形变检测流程,首先采集未施加激励的铝板表面的全息图,然后手动旋转螺旋测微头的旋钮,使铝板分别产生 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的微位移(由于通过手动旋转螺旋测微头进行力激励,存在旋转距离误差),对应不同的激励力度,采集施加力激励

后铝板表面的全息图。图 4 所示为采集的全息图及其频谱分布。其中图 4(a)为原始全息图,图 4(b)为力激励后的全息图,图 4(c)是全息图对应的频谱分布图。由于参考光和物光之间的夹角在激励前后并未发生变化,所以激励前后全息图的频谱分布空间位置不变。

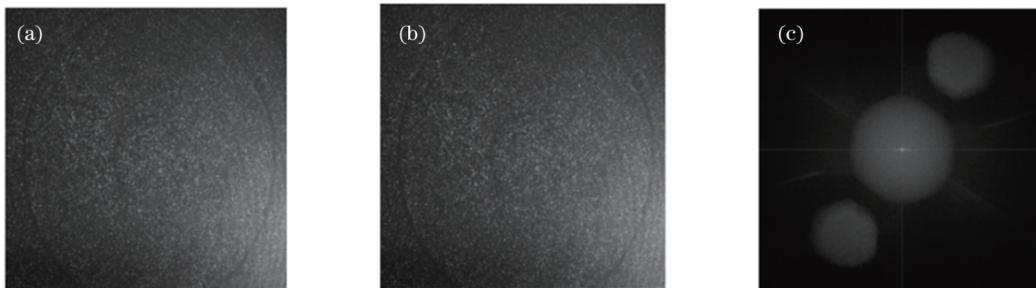


图 4 激励前后采集的全息图及其频谱分布。(a)激励前的全息图;(b)激励后的全息图;(c)全息图的频谱

Fig. 4 Holograms collected before and after excitation and spectrum distribution. (a) Hologram collected before excitation; (b) hologram collected after excitation; (c) spectrum distribution of holograms

分别对两幅全息图进行滤波处理和傅里叶逆变换计算,获得不包含零级及负一级频谱的全息图,然后根据式(5)进行反正切计算,得到施加力激励后铝板表面微小位移产生的变形条纹,如图 5(a)和图 5(d)所示。可见:1)材料结构均匀的物体在较为规则的激励下,其变形条纹具有连续性和对称性;2)螺旋测微头旋转的力度不同,铝板表面产生的位移也不同,且力度的大小与条纹密度成正比;3)螺旋测微头旋转时相当于点作用力,各向施力均衡,因此铝板受力中心区域形成的变形条纹呈均匀的近似圆形分布。对变形条

纹进行降噪、解包裹处理后,根据式(6)可计算获得变形量的三维分布,分别如图 5(b)和图 5(e)所示。可见,变形量的三维分布特征与点作用力引起的变形特征是符合的。取图 5(b)、图 5(e)的中心截线,截线图分别如图 5(c)、图 5(f)所示,得到螺旋测微头手动旋转 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 所产生的力激励条件下铝板表面的最大变形量分别约为 $6 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 。

上述实验结果表明,本团队设计的数字全息形变检测实验系统是可行的,通过数字全息图滤波处理及变形条纹相位提取算法可以获得漫反射表面可量化的

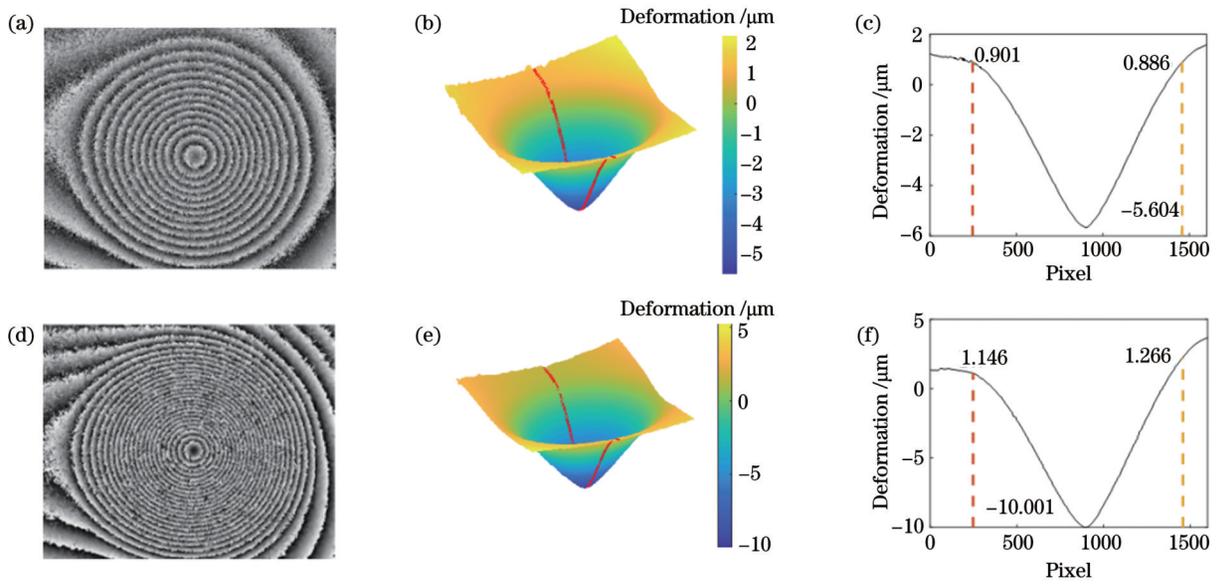


图 5 铝板表面的变形条纹及其三维分布。(a) 5 μm 位移产生的变形条纹;(b) 5 μm 位移对应的力激励铝板表面产生的变形条纹的三维分布;(c)图(b)所示三维变形分布的中心截线图;(d) 10 μm 位移产生的变形条纹;(e) 10 μm 位移对应的力激励铝板表面产生的变形条纹的三维分布;(f)图(e)所示三维变形分布的中心截线图

Fig. 5 Deformation fringes and three-dimensional distribution of aluminum plate sample surface. (a) Deformation fringes produced by 5 μm displacement; (b) three-dimensional distribution of deformation fringes produced on force-excited aluminum plate surface by 5 μm displacement; (c) central cross-section diagram of three-dimensional deformation distribution shown in Fig. 5(b); (d) deformation fringes produced by 10 μm displacement; (e) three-dimensional distribution of deformation fringes produced on force-excited aluminum plate surface by 10 μm displacement; (f) central cross-section diagram of three-dimensional deformation distribution shown in Fig. 5(e)

离面变形。实验中螺旋测微头采用手动操作,最小量及位移间距只能控制在 5 μm 左右,但根据数字全息技术的特点,理论上轴向形变分辨率可达纳米量级^[23],横向分辨率取决于 CCD 的单个像素尺寸,因此依据光路系统的缩小率,检测视场内缺陷的识别分辨率大约为 22 μm 。

3 便携式数字全息形变检测系统设计

针对壁画文物不可移动的特点,同时考虑到力激励方式对文物具有一定的破坏性,不满足文物无损检测的条件,本团队对 2.2 节所述数字全息形变检测实验系统进行便携式集成设计,并以自制壁画样本及普通室内墙壁为实验对象,开展声波激励数字全息形变检测实验研究。声波振动可视为周期运动,利用声波

激励待测物体使其受迫振动,可使物体内部缺陷或表面微观缺陷引发物体表面产生微观变形^[24-25],同时声波对文物具有非接触性,且参数可控、操作方便,是安全的激励手段。将待测对象视为 1 个本体,则本体上的不同缺陷对应着不同的应力结构分布,即在受迫振动条件下各缺陷区域的共振频率不同。采用声波递增扫频的加载方式,使声波信号从低频向高频连续变化并作用于物体表面,当某一频率与缺陷处的共振频率相等或接近时,缺陷处就会发生共振,振幅最大,通过数字全息图记录振动引起的干涉信息,就可以解调或表征缺陷的相关信息。

便携式数字全息形变检测系统如图 6 所示,其中图 6(a)为集成后的数字全息形变检测系统照片。

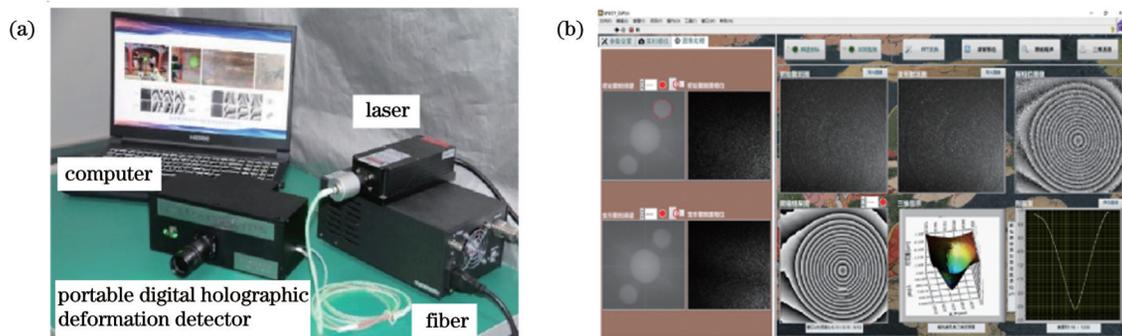


图 6 光路系统及集成。(a)数字全息形变检测系统照片;(b)数据采集和处理软件界面

Fig. 6 Optical system and integration. (a) Photo of digital holographic deformation detection system; (b) interface of software about data collection and processing

CCD(大恒 DMK33UX183)的像素数为 3648×5472 , 单个像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$ 。集成后系统主体的质量约为 2.5 kg , 尺寸为 $123 \text{ mm} \times 122 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$ 。系统投射光源至待测物表面的距离约为 1 m , 检测视场范围为 $80 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。声波激励工具选用 NTi Audio 公司的 MR-PRO 音频信号发生器及扩音器。图 6(b) 为数据采集和处理软件界面, 软件处理系统基于 LabVIEW 和 MATLAB 编制完成, 包括参数设置、数据处理和结果显示三大模块。

3.1 自制壁画样本

依据壁画结构和缺陷检测目标, 本团队自制了包含缺陷信息的壁画样本, 如图 7(a) 所示。壁画样本结构包括木板基底、地仗层、粗泥层、细泥层、白粉层、颜料层, 壁画亚表面缺陷包括木板基底背后孔洞和木板基底的二次粘接^[26], 如图 7(b) 所示。确保待测物体能够充分受激, 实验中声波发生器设置为扫频模式, 声波加载电压为 -10 dBV , 频段在 $200 \sim 300 \text{ Hz}$ 之间, 每个频率持续 4 s 。

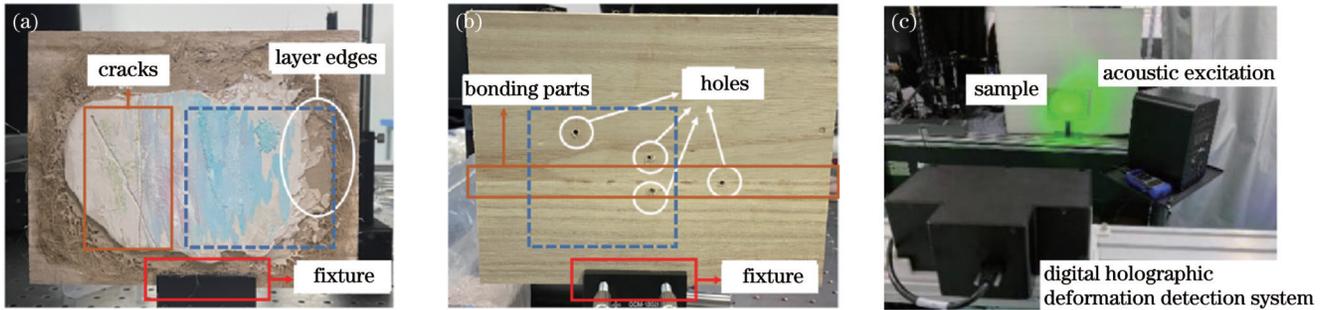


图 7 木板基底壁画缺陷示意图。(a) 样本正面; (b) 样本反面; (c) 自制壁画样本检测现场照片

Fig. 7 Schematic diagram of defects on wood-based mural sample. (a) Front side of the sample; (b) reverse side of the sample; (c) photo of mural sample defect detection

图 7(c) 为自制壁画样本亚表面缺陷数字全息形变检测现场照片。自制壁画样本通过夹具固定在光学平台上, 检测仪投射光源照射壁画样本正面, 图 7(a) 中长方形虚线框是光波照射区域, 声波扩音器放置于壁画样本正面的侧边。声波激励前采集原始全息图, 声波扫频过程再采集一系列全息图, 按照图 2 所示处理流程得到一系列变形条纹, 如图 8 所示。由于壁画样本仅由一个支点支撑, 故受激励时整体的振动大于局部振动, 产生的形变条纹反映的是壁画背后基底的状态; 若木板基底本身无缺陷, 则应以固定处为定点产生整体均匀的振动, 对应明暗相间、宽度相等的变形条纹特征, 但图 8 所示为非均匀变形条纹, 因此非均匀部位可大致定位为缺陷区域。

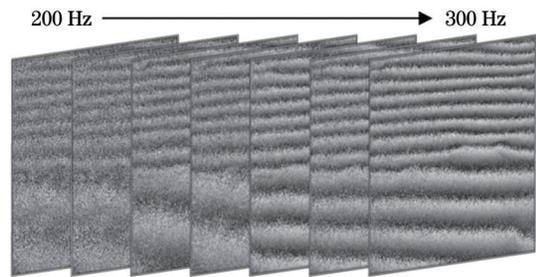


图 8 声波扫频激励木板基底壁画缺陷形成的一组变形条纹图
Fig. 8 A group of deformation fringes produced from defects on wood-based mural sample by acoustic scanning excitation

选取典型数据进一步分析, 分析结果如图 9 所示, 其中图 9(a) 对应层与层边缘处在 250 Hz 下的扫频结果, 图 9(b) 对应木板二次粘接部位在 224 Hz 下的扫频

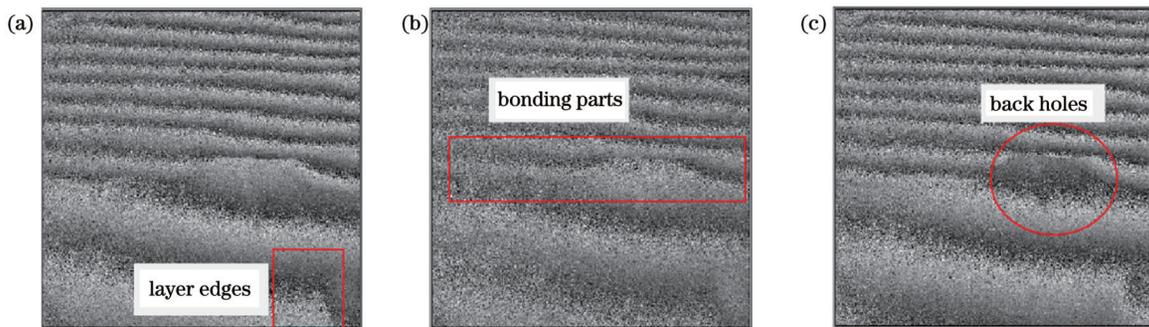


图 9 声波激励木质基底壁画样本形成的变形条纹。(a) 层与层边缘形成的变形条纹 (250 Hz 声波激励); (b) 木板粘接部位形成的变形条纹 (224 Hz 声波激励); (c) 背后孔洞部位形成的变形条纹 (280 Hz 声波激励)

Fig. 9 Deformation fringes produced from defects on wood-based mural sample by acoustic scanning excitation. (a) Deformation fringes produced from layer edges (acoustic excitation with 250 Hz); (b) deformation fringes produced from bonding parts (acoustic excitation with 224 Hz); (c) deformation fringes produced from back holes (acoustic excitation with 280 Hz)

结果,图 9(c)对应背后孔洞部位在 280 Hz 下的扫频结果。

对比图 7(b)所示壁画样本背面的缺陷特征,分析图 9(a)~(c)所示变形条纹分布,可知:图 9(a)中长方形线框区域内的条纹图与周围区域明显不同,其分界位置与图 7(a)所示壁画层与层的边缘相对应;图 9(b)中长方形线框区域上方条纹分布明显比线框区域下方密集,观察木板基底发现该分界区域对应二次粘接部位。再观察图 7(b)所示孔洞缺陷,其直径约为 1 mm,如果声波激励引起孔洞共振,理论上应在该点处出现完整的封闭条纹,但上文已述由于自制壁画样本比较

薄,声波激励会引起样本整体振动,而小孔洞并没有引起最大共振,因此图 9(c)所示的非封闭式条纹应是打孔时孔洞周围沿木纹方向受到力学辐射而产生的异常条纹。

3.2 室内建筑墙体样本

壁画通常附着于大型墙体表面,因此本团队在实验室墙壁上选取一定区域开展内部缺陷检测实验研究。建筑墙体亚表面如图 10(a)所示,现场检测照片如图 10(b)所示。检测仪投射光源直接照射墙壁待测区域,照射距离约为 1 m,声波扩音器置于待测墙壁侧边。

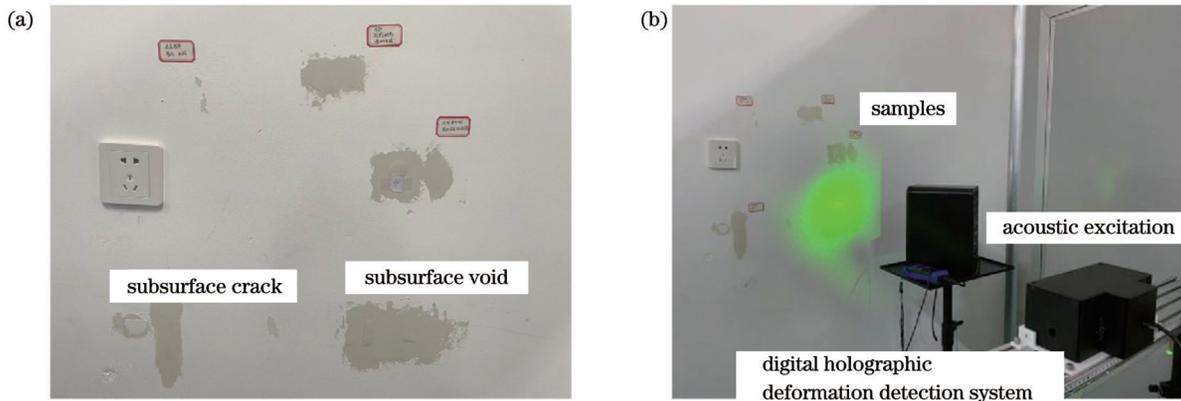


图 10 建筑墙体缺陷检测。(a)建筑墙体亚表面;(b)建筑墙体缺陷检测现场照片

Fig. 10 Building walls defect detection. (a) Subsurface of building walls; (b) photo of building walls defect detection

在待测区域设置了两种缺陷特征:1)亚表面裂纹。在墙壁细裂纹表面涂刷乳胶漆,模拟壁画内部开裂缺陷,实物图与截面示意图分别如图 11(a)和图 11(b)所

示。2)亚表面空鼓。在乳胶漆层和原墙壁层之间埋一张三角形纸片,模拟壁画的空鼓结构,实物图与截面示意图如图 11(c)和图 11(d)所示。

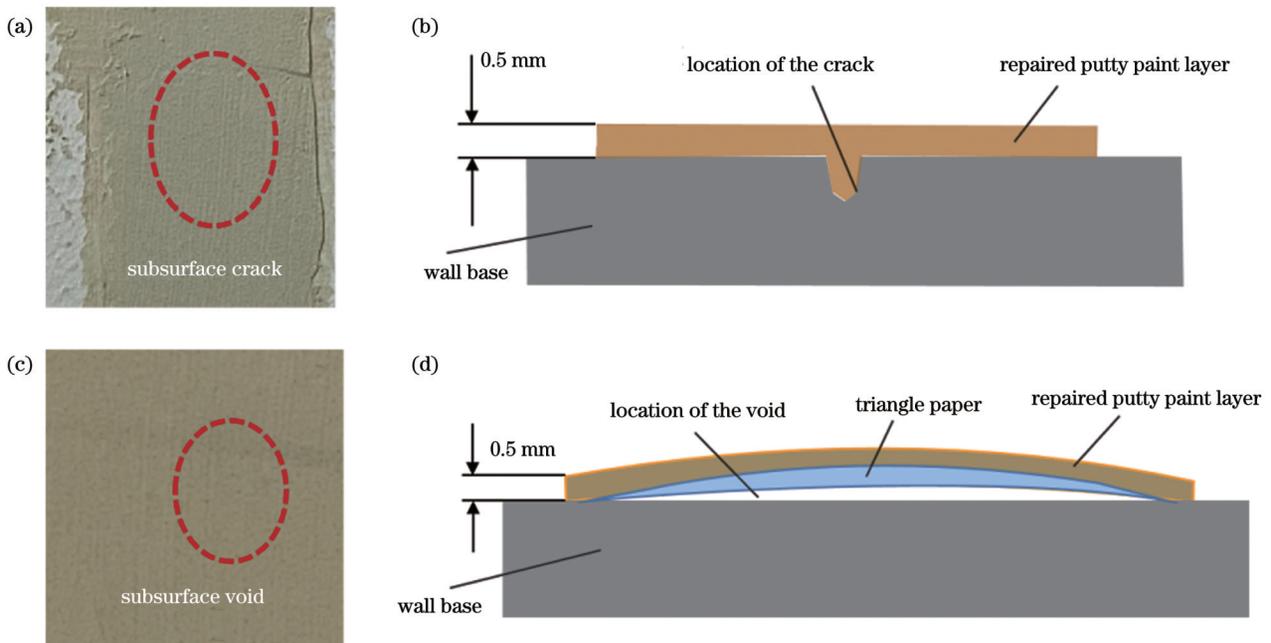


图 11 建筑墙体亚表面缺陷。(a)亚表面裂纹缺陷实物图;(b)亚表面裂纹缺陷截面示意图;(c)亚表面空鼓缺陷实物图;(d)亚表面空鼓缺陷截面示意图

Fig. 11 Subsurface defects on building walls. (a) Photo of subsurface crack defect; (b) schematic diagram of subsurface crack defect cross-section; (c) photo of subsurface void defect; (d) schematic diagram of subsurface void defect cross-section

实验中,设置声波发生器为扫频模式,声波加载电压为 0 dBV,频段在 100~800 Hz 之间,每个频率持续 4 s。声波激励前采集原始全息图,声波扫频过程中再采集一系列全息图,按照图 2 所示处理流程得到一系列变形条纹,如图 12 所示。选取典型数据进一步展开分析,如图 13(a)、(b)所示。图 13(a)所示为 224 Hz 声波激励下的变形条纹,其裂纹特征很明显,虚线标注的分界线即为墙壁与乳胶漆之间的分界线,可以清楚地定位自制亚表面裂纹的位置,表明裂纹结构受激振动后形成了对应的条纹特征。图 13(b)所示为 620 Hz 声波激励下亚表面空鼓缺陷对应的变形条纹,其具有明显的闭环条纹结构,符合埋入的模拟空鼓缺陷对应的

条纹特征。

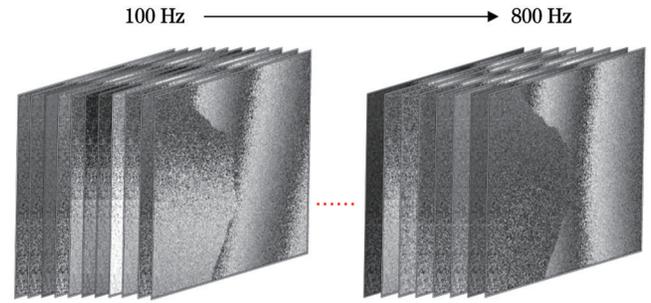


图 12 声波扫频激励墙体亚表面裂纹形成的一组变形条纹图
Fig. 12 A group of deformation fringes produced from subsurface cracks by acoustic scanning excitation

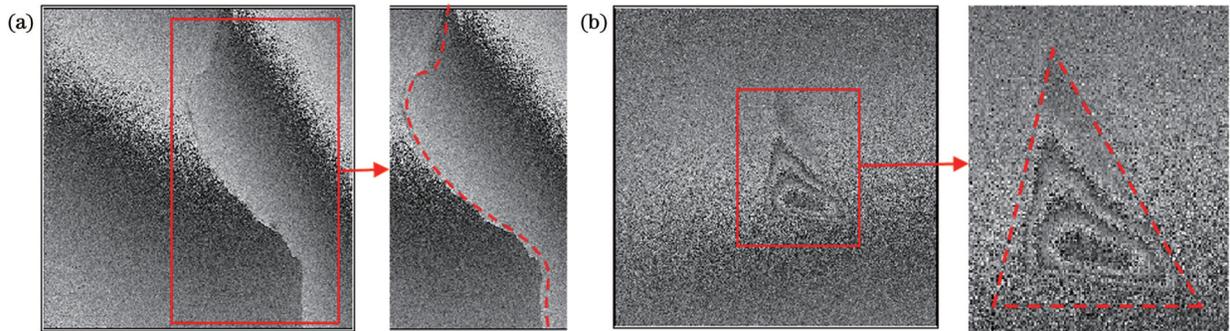


图 13 声波激励墙体亚表面缺陷形成的变形条纹。(a)亚表面裂纹形成的变形条纹(224 Hz 声波激励);(b)亚表面空鼓形成的变形条纹(620 Hz 声波激励)

Fig. 13 Deformation fringes produced from subsurface defects by acoustic excitation. (a) Deformation fringes produced from subsurface crack (acoustic excitation with 224 Hz); (b) deformation fringes produced from subsurface void (acoustic excitation with 620 Hz)

上述实验结果表明,结合声波激励方式的便携式激光全息形变检测系统可以有效实现独立小面积壁画样本的缺陷检测,也能实现建筑物室内墙壁亚表面的缺陷检测。声波的扫频激励方式可适用于对不同深度和不同结构缺陷的激励。

4 故宫博物院壁画文物缺陷原位检测与分析

如亭位于北京故宫博物院内外东路宁寿宫区颐和

轩西侧的一个小院内。小院由三面廊子围成,廊北、西、南三面墙壁上绘有彩色壁画。因回廊围成天井状,壁画处于半开放状态,壁画表面附有尘土,南北墙下因雨水溅落有部分损伤,因此壁画均有不同程度的损伤。图 14(b)和图 14(c)所示为如亭内廊壁画的南墙和西墙部分区域照片,表面均已出现肉眼可见的裂缝或起甲。如亭壁画为木质基底,其结构从内到外依次为木质建筑基底→地仗层→粗泥层→细泥层→白粉层→颜料层,结构剖面示意图如图 15 所示。

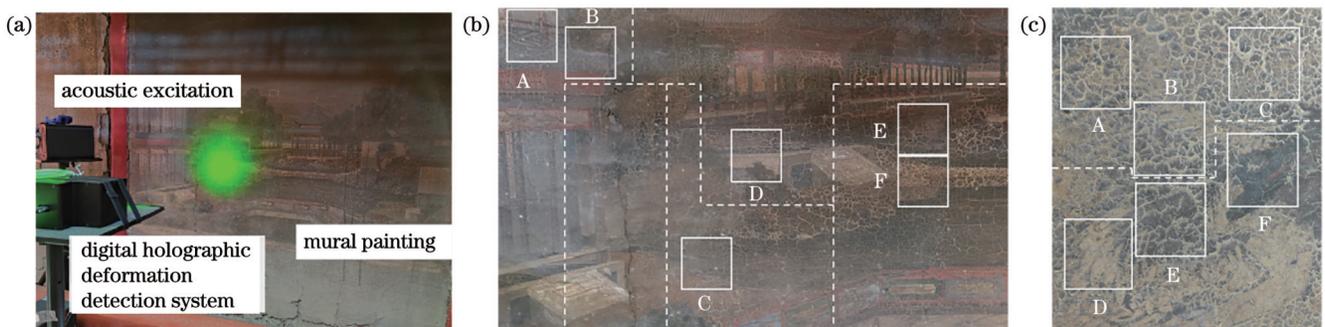


图 14 壁画原位检测照片及检测区域。(a)原位检测照片;(b)南墙检测区域;(c)西墙检测区域

Fig. 14 Photo of *in-situ* detecting of the mural and the detected zones. (a) Photo of *in-situ* detecting; (b) detection zones on the south wall; (c) detection zones on the western wall

如亭内空间狭小,地面凹凸不平,仅能依靠简单的支架支撑数字全息形变检测系统开展真实壁画缺陷的

原位检测工作。图 14(a)是原位检测现场照片。本次仅在南墙和西墙分别选取 6 个区域进行全息图采集,



图 15 被测壁画的结构剖面示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the structural section of the tested mural

图 14(b) 中的字母 A~F 标注的是南墙壁画的 6 个待测区域, 图 14(c) 中的字母 A~F 标注的是西墙壁画的 6 个待测区域。

在检测过程中, 检测仪投射光源直接照射壁画, 声波扩音器置于壁画侧边, 声波发生器设置为扫频模式, 声波加载电压为 5 dBV, 频段在 100~800 Hz 之间, 该频段实际涵盖了人类正常的声频范围^[27]。因为待测壁画处于北京故宫博物院, 本身属于保护文物, 不能因为声波的振动而产生破坏性结果。考虑到故宫博物院平时人声、喇叭声等比较多, 对待测壁画而言, 上述频段应该是相对比较安全的。本文选取覆盖人类正常声频范围的声波激励开展壁画缺陷检测工作, 确保文物不被破坏的同时也可观察人声、喇叭声等对文物的影响。

在实验过程中, 声波扫频时的每个频率持续 4 s。依据图 2 所示流程进行检测, 如亭南墙、西墙壁画各个标识区域的原位检测结果分别如图 16 和图 17 所示。图 16(a) 所示为南墙上 6 个检测区域的变形条纹分布, 字母 A~F 编号对应图 14(b) 中的 A~F 编号。图 16(a) 中的 A~D 图所示条纹只呈现出异常, 没有呈现出任

何封闭或对称结构。这是由于声波激励具有全局性, 而壁画由多层结构、不同材料组成, 因此所得变形条纹对应的是被测区域受激后不同结构、不同材料之间的非均匀应力分布在表面产生的整体变形, 这与 3.1 节实验结果表现一致。但结合文物保护人员的经验, 依据图 16(a) 中 C 图的条纹特征可知此处大概率存在内部空鼓缺陷, 只是该空鼓不在检测视场区域内, 所用频率并未使空鼓区域形成最大的共振, 因此没有获得如图 13(b) 所示的闭环条纹结构。图 16(a) 中 E、F 图所呈条纹为典型的裂纹特征, 表明该区域因声波激励引起了最大共振, 分别对应为十字起甲和纵向裂纹。为更直观地表达各检测区域的异常结构特征, 采用基于高斯 1σ 准则和直方图分割方法消除变形条纹相位中整体背景的相位^[28], 得到图 16(b) 所示的独立的、量化的异常结构的三维分布。该三维分布表达了异常结构的基本位置和轮廓特征, 如图中虚线轨迹所示。各图中的字母 A~F 编号对应于图 16(a) 中 A~F 编号。结合缺陷的变形条纹特征、位置区域、轮廓特征以及故宫博物院文物保护人员的经验, 可知南墙壁画除表面明显的裂纹、起甲外, 浅层亦存在微裂纹、断裂、空鼓等缺陷。

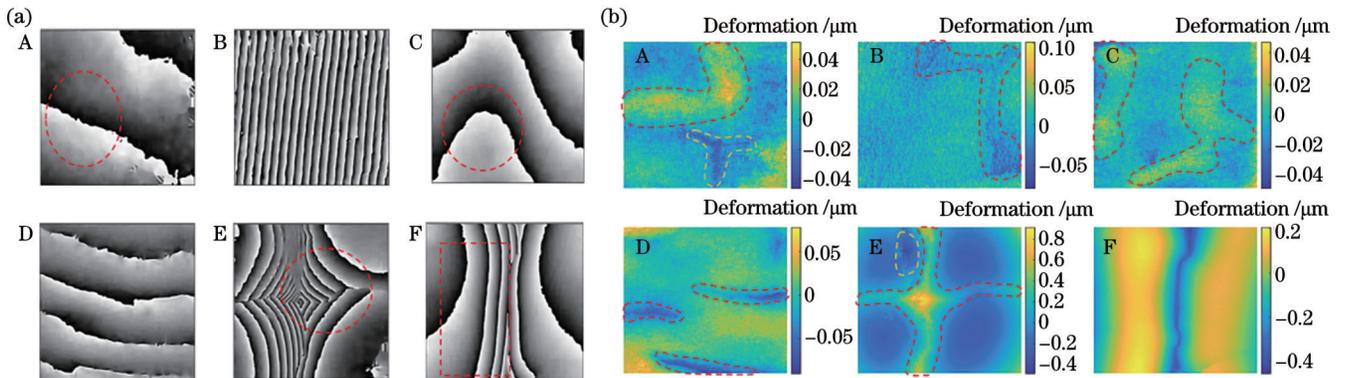


图 16 南墙微观缺陷的原位检测结果。(a) 采样区域 A~F 的变形条纹; (b) 采样区域 A~F 中异常结构的三维分布

Fig. 16 *In-situ* detection results of micro-defects on the south wall. (a) Deformation fringes of sampling zones A-F; (b) three-dimensional distributions of abnormal structures in sampling zones A-F

图 17(a) 和图 17(b) 分别为图 14(c) 所示西墙 A~F 区域的变形条纹分布及异常结构的三维分布, 可知西墙壁画的缺陷主要为起甲、裂纹、空鼓以及内部材

质断裂等。

图 16 中的 E~F 图和图 17 中的 E~F 图说明人声等常规声音对壁画文物是有损害的。

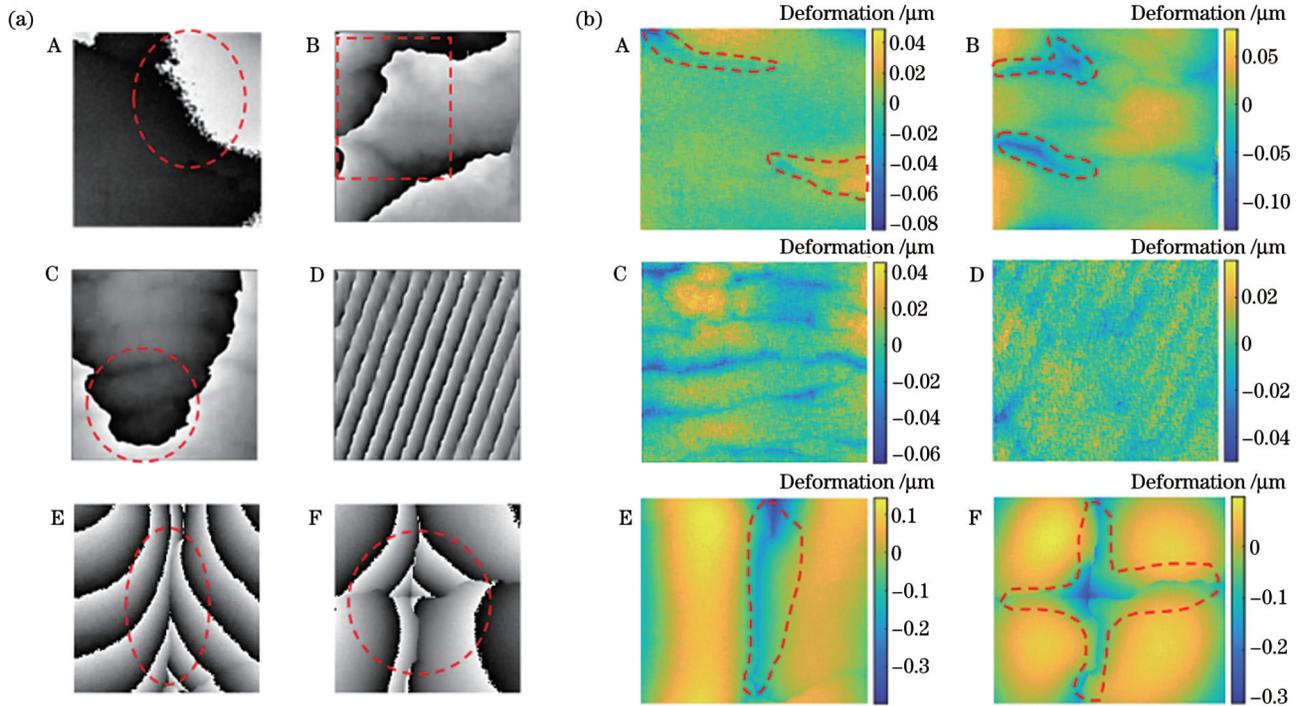


图 17 西墙微观缺陷的原位检测结果。(a)采样区域 A~F 的变形条纹图;(b)采样区域 A~F 中异常结构的三维分布
Fig. 17 *In-situ* detection results of micro-defects on the western wall. (a) Deformation fringes of sampling zones A-F; (b) three-dimensional distributions of abnormal structures in sampling zones A-F

5 结 论

壁画文物不同于工业制造器件,其缺陷特征不具有统一性和标准性,对检测手段和分析方法要求较高,尤其是对于不可移动的壁画文物,对其健康状态实现无损、实时的原位检测和准确分析是十分必要的。本团队基于漫反射表面数字全息成像原理,结合声波激励方式,设计了数字全息形变检测系统,分别针对铝板样本、自制壁画样本、室内建筑墙体样本开展了不同条件下的实验研究,并将该系统成功应用于故宫博物院真实壁画缺陷的原位检测,得到如下结论:

1) 结合声波激励手段,数字全息成像系统能够实时采集漫反射表面及亚表面微观缺陷形成的表面离面形变。声波激励方式具有非接触特点,激励参数可控且操作简单。

2) 由于声波激励具有全局性特点,因此对声波激励前后的全息图进行处理获得的表面离面形变相位中包含有非异常结构的形变量,采用背景相位消除算法可以直接从整体形变相位中提取出异常结构本身的特征,如位置和轮廓,有利于更准确地识别缺陷。

后期本团队将继续研究声波激励对文物缺陷检测的有效范围及其安全阈值,并结合故宫博物院如亭的空间和地面实际情况,设计高精度扫描拼接方法,对壁画整体进行扫描,采集全息图,重点实现大范围内亚表面的缺陷检测。

参 考 文 献

- [1] 王顺仁, 王小伟, 巩一璞. 3D扫描技术在古代壁画病害变化监测方面的应用初探[J]. 甘肃科技, 2020, 36(24): 14-19.
Wang S R, Wang X W, Gong Y P. Preliminary study on the application of 3D scanning technology in monitoring the changes of ancient mural diseases[J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(24): 14-19.
- [2] 张叶娥, 吴利刚. 基于深度学习的石窟壁画破损检测[J]. 云冈研究, 2022, 2(1): 85-90.
Zhang Y E, Wu L G. The detection of cave mural damage based on deep learning[J]. Yungang Research, 2022, 2(1): 85-90.
- [3] 胡文英. 中国古代壁画文物保护行业标准探究: 以繁峙南关村墓葬壁画和阳曲轩辕庙壁画价值评估为例[J]. 中国标准化, 2023(6): 95-100.
Hu W Y. Research on the industrial standards for the protection of ancient Chinese murals and cultural relics: taking the value evaluation of the tomb murals in Nanguan Village of Fanshi and the murals in Xuanyuan Temple of Yangqu as examples[J]. China Standardization, 2023(6): 95-100.
- [4] 吴卓桥, 陶宁, 李晓丽, 等. 红外热波检测技术在文物保护中的应用[J]. 无损检测, 2021, 43(10): 53-58.
Wu Z Q, Tao N, Li X L, et al. Application of infrared thermal wave detection technology in the protection of cultural relics[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(10): 53-58.
- [5] Sfarra S, Ibarra-Castaneda C, Tortora M, et al. Diagnostics of wall paintings: a smart and reliable approach[J]. Journal of Cultural Heritage, 2016, 18: 229-241.
- [6] 王晨露, 冯圆媛, 尤文浩, 等. 激光技术在文物保护中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 1700003.
Wang C L, Feng Y Y, You W H, et al. Application of laser technology in cultural relics protection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 1700003.
- [7] Imperi F, Caneva G, Cancellieri L, et al. The bacterial aetiology of rosy discoloration of ancient wall paintings[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(11): 2894-2902.

- [8] Eveno M, Moignard B, Castaing J. Portable apparatus for *in situ* X-ray diffraction and fluorescence analyses of artworks[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2011, 17(5): 667-673.
- [9] 丁云乐, 王慧琴, 王可, 等. 多尺度特征融合的壁画多光谱图像颜料 3D-CNN 分类方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(22): 2230001.
Ding Y L, Wang H Q, Wang K, et al. 3D-CNN classification method for multi-spectral image pigments of murals based on multi-scale feature fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(22): 2230001.
- [10] Parisotto S, Calatroni L, Daffara C. Digital cultural heritage imaging via osmosis filtering[M] // Mansouri A, Moataz A E, Nouboud F, et al. *Image and signal processing. Lecture notes in computer science*. Cham: Springer, 2018, 10884: 407-415.
- [11] Daffara C, Ambrosini D, Pezzati L, et al. Thermal quasi-reflectography (TQR): current research and potential applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8790: 87900S.
- [12] Daffara C, Parisotto S, Ambrosini D. Multipurpose, dual-mode imaging in the 3–5 μm range (MWIR) for artwork diagnostics: a systematic approach[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 104: 266-273.
- [13] Krug K, Dik J, Den Leeuw M, et al. Visualization of pigment distributions in paintings using synchrotron *K*-edge imaging[J]. *Applied Physics A*, 2006, 83(2): 247-251.
- [14] Calza C, Oliveira D F, Freitas R P, et al. Analysis of sculptures using XRF and X-ray radiography[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, 116: 326-331.
- [15] Groves R M, Pradarutti B, Kouloumpi E, et al. 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(6): 543-549.
- [16] Adam A J L, Planken P C M, Meloni S, et al. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3407-3416.
- [17] Paoletti D, Spagnolo G S, Facchini M, et al. Artwork diagnostics with fiber-optic digital speckle pattern interferometry[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(31): 6236-6241.
- [18] 苏榕, 刘嘉宇, 乔潇悦, 等. 用于表面形貌测量的扫描白光干涉技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312005.
- Su R, Liu J Y, Qiao X Y, et al. Advances in scanning white light interferometry for surface topography measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312005.
- [19] Ambrosini D, Paoletti D. Holographic and speckle methods for the analysis of panel paintings. *Developments since the early 1970s*[J]. *Studies in Conservation*, 2004, 49(sup1): 38-48.
- [20] Ibarra-Castaneda C, Sfarra S, Ambrosini D, et al. Diagnostics of panel paintings using holographic interferometry and pulsed thermography[J]. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2010, 7(1): 85-114.
- [21] Tornari V, Basset T, Andrianakis M, et al. Impact of relative humidity on wood sample: a climate chamber experimental simulation monitored by digital holographic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Imaging*, 2019, 5(7): 65.
- [22] Tornari V. A symmetry concept and significance of fringe patterns as a direct diagnostic tool in artwork conservation[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 236-257.
- [23] Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(9): R85-R101.
- [24] 周书宇, 李东杰. 基于动态散斑的光声成像技术探析[J]. *中国设备工程*, 2021(18): 182-184.
Zhou S Y, Li D J. Analysis of photoacoustic imaging technology based on dynamic speckle[J]. *China Plant Engineering*, 2021(18): 182-184.
- [25] 刘宝会, 何宇. 自控式音频扫描激振加载无损检测研究[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(28): 88-89, 263.
Liu B H, He Y. NDT of auto-controlled audio-frequency sweeps driving vibration[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(28): 88-89, 263.
- [26] 李长民. 浅谈传统壁画的制作与材料[J]. *美术观察*, 2010(1): 111.
Li C M. On the production and materials of traditional murals[J]. *Art Observation*, 2010(1): 111.
- [27] Latinus M, Belin P. Human voice perception[J]. *Current Biology*, 2011, 21(4): 143-145.
- [28] Chen Z K, Zhou W J, Duan L A, et al. Automatic elimination of phase aberrations in digital holography based on Gaussian 1σ -criterion and histogram segmentation[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 13627-13639.

Defect Detection and Analysis in Murals Using Digital Holography

Zhou Wenjing^{1,3*}, Li Anqi¹, Chen Zhenkai¹, Li Guanghua^{2,3}, Qu Liang^{2,3}, Yu Yingjie^{1,3}

¹*School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

²*The Palace Museum, Beijing 100009, China;*

³*China-Greece 'Belt and Road' Joint Laboratory on Cultural Heritage Conservation Technology, Beijing 100009, China*

Abstract

Objective Numerous murals containing abundant historical information have been preserved in the ancient architectural structures in our country. However, these murals have suffered varying degrees of damage after thousands of years, such as the formation of surface and subsurface cracks and voids. Optical inspection techniques, such as spectral analysis and imaging technology, are widely used in the restoration and preservation of cultural relics. However, these methods involve chemical composition analysis or primarily provide two-dimensional images, which cannot fulfill the demands of micro-defect detection. Digital holography enables three-dimensional surface profiling. Digital holography combined with excitation can be utilized for the detection of surface and subsurface defects in murals. Therefore, a portable deformation detection system based on digital holography is designed herein to meet the needs of *in-situ* defect detection in murals. The developed detector combined with acoustic sweep excitation is applied to the *in-situ* detection of defects in murals at the Palace Museum, Beijing. Combined with acoustic sweep excitation, this study confirms that digital holography can be used to determine the status of damage of the surface and subsurface of cultural relics through non-destructive methods. This research is conducive to the diagnosis of damage in cultural relics, as well as for analyzing defect formation and predicting defect growth, thereby providing a scientific basis for the restoration and protection of cultural relics.

Methods Based on the principle of holographic interference on diffuse reflection surfaces, a portable deformation detection system was designed. First, an aluminum plate, the surface of which was coated with white particulate paint, was selected as the experimental sample. Holograms of the surface of the aluminum plate were captured after applying force excitation. After applying filtering techniques to the digital hologram and extraction algorithms to the deformation fringe phase, the feasibility of the technique and capability of the system for quantitative analysis were validated. With the combination of acoustic sweep excitation, experiments were conducted on mural samples and interior architectural wall samples to inspect the internal defects. Deformation fringes corresponding to surface and subsurface defects were obtained, confirming the effectiveness of the frequency sweeping excitation method using acoustic waves. The portable deformation detection system based on digital holography combined with acoustic excitation was used to analyze the murals at the Palace Museum in Beijing. *In-situ* micro-defect detection was performed on the western and southern walls of Ru Ting. Gaussian 1σ criterion and histogram segmentation methods were applied to eliminate the overall background phase from the deformation fringe phase to obtain a three-dimensional distribution of the defects in order to analyze the locations and contour features of the defects.

Results and Discussions Firstly, theoretical analysis is used to prove that the principle of digital holographic interference on diffuse reflection surfaces is reasonable for extracting out-of-plane deformation data. Feasibility verification using aluminum plate samples reveals that the three-dimensional distribution of deformations could be quantified. The experimental system enables quantification of the out-of-plane deformation (Fig. 5). Combined with acoustic sweep excitation, sub-surface defects in mural samples and interior architectural wall samples are effectively detected. Different defects, such as voids and cracks, show distinct abnormal fringe patterns (Fig. 9, Fig. 13). *In-situ* micro-defect detection was performed on the murals on the southern and western walls of Ru Ting at the Palace Museum. By using phase extraction and spherical aberration phase elimination algorithms to determine the phase distribution of the deformations, the three-dimensional defect distribution could be determined. Visible cracks, paint peeling, and shallow-level defects such as micro-cracks, fractures, and voids are detected in the mural on the southern wall (Fig. 16). The main defects in the western wall mural are subsurface cracks and hollow spots. These results also prove that conventional sounds such as those made by tourists are still harmful to cultural mural relics (Fig. 17).

Conclusions A deformation detection system is designed herein based on the principle of digital holographic imaging of a diffuse reflection surface, combined with the acoustic excitation method. The system is successfully applied to the detection of defects in real murals at the Palace Museum, providing information about the locations and contours of the defects. The system is capable of detecting real-time micro-defect-induced deformations on the diffuse reflection surface. The acoustic excitation method offers controllable parameters and simple operation, while being a non-contact approach. By processing holograms and applying background phase elimination algorithms, defect characteristics such as positions and contours can be extracted from the overall deformation phase, enabling accurate identification of defects. This study demonstrates that the portable holographic deformation detection system, in combination with acoustic sweep excitation, can effectively detect defects such as voids, cracks, and holes on mural artifacts. This system provides a scientific basis for diagnosing the health of mural artifacts, as well as for restoration and preservation. In future work, we will further investigate the effective range and safety threshold of acoustic wave excitation for detecting defects in cultural relics. We will also consider the spatial and ground conditions of structures like Ru Ting at the Palace Museum to design a high-precision scanning and stitching method for capturing holograms of the entire mural, focusing on detecting defects in the subsurface within a large area.

Key words holography; mural; diffuse reflection surface; defect detection; acoustic excitation