

文章编号 1004-924X(2024)17-2663-13

## 激光电子散斑干涉法隐形牙齿矫治器 全场变形测量

王嘉雯<sup>1</sup>, 吴峻青<sup>2</sup>, 吴敏杨<sup>1</sup>, 安应彪<sup>1</sup>, 刘京京<sup>2</sup>, 严斌<sup>2\*</sup>, 杨福俊<sup>1\*</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189;

2. 南京医科大学附属口腔医院 正畸科, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 构建三维表面微变形同步干涉测量系统, 客观准确地测量隐形矫治器的全场变形信息, 为提高其临床矫治效能以及安全性提供数据支持。由蓝绿红激光构建三组各自独立的散斑干涉光路, 用于同步测量物体表面的二维面内和一维离面变形, 利用一个集成相移装置实现三色激光准 90°步长的同步相移, 并由一台 3CCD 彩色相机同时记录三色散斑干涉图。通过四步相移算法从分离的红、蓝及绿色散斑干涉图中计算出与离面和面内变形相关的干涉条纹相位; 最后, 结合自适应条纹滤波和数字差分算法计算得到与表面变形有关的 6 个应变分量。微转动实验表明: 系统的微转角测量精度为 2.4", 变形测量精度为 10  $\mu\epsilon$  (微应变)。对隐形矫治器的变形测量结果分析表明, 矫治器的变形效用与设定的矫治目标相一致。

**关键词:** 三维测量; 激光电子散斑干涉; 微变形; 隐形矫治器

中图分类号: O439 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243217.2663

## Whole-field deformation measurement of clear orthodontic aligner using electronic speckle pattern interferometry

WANG Jiawen<sup>1</sup>, WU Junqing<sup>2</sup>, WU Minyang<sup>1</sup>, AN Yingbiao<sup>1</sup>, LIU Jingjing<sup>2</sup>,  
YAN Bin<sup>2\*</sup>, YANG Fujun<sup>1\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Department of Orthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Nanjing Medical University,  
Nanjing 210029, China)

\* Corresponding author, E-mail: yang-fj@seu.edu.cn; byan@njmu.edu.cn

**Abstract:** To objectively and accurately measure the full-field deformation of clear aligners for improved clinical effectiveness and safety, a comprehensive three-dimensional deformation measurement system based on laser electronic speckle pattern interferometry has been established. The specimen's surface is illuminated with a tri-wavelength laser, generating a color speckle pattern. A phase-shift device produces a quasi  $\pi/2$  phase step for all three color channels. Multi-frame images of the color speckle pattern are captured using a 3CCD color camera. Deformation phases are extracted using a 90° step four-frame technique

收稿日期: 2024-05-03; 修订日期: 2024-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12072073, No. 82071143); 江苏省重点研发计划临床前沿技术项目 (No. BE2022795)

from the separated red, green, and blue channels. A window-deformable filter effectively denoises the phase fringe patterns, allowing six derivative components to be obtained directly from the three deformation components using a digital differential method. Results show that the system achieves a precision of no more than  $2.4''$  for micro-rotation and better than  $10\text{ }\mu\text{e}$  for strain measurements. Experimental results on clear aligners align closely with expected outcomes.

**Key words:** 3-D measurement; electronic speckle pattern interferometry; micro-deformation; clear aligner

## 1 引言

口腔正畸治疗不仅能够将牙齿排列整齐,恢复牙齿正常咬合功能,也有利于改善容貌外观进而实现形象提升。虽然超过半数的成年人认为传统的金属托槽在正畸治疗过程中对日常生活的影响是可以接受的,但接受透明矫治器(也称为隐形矫治器)进行正畸治疗的成人却高达  $90\%$ <sup>[1]</sup>;特别在青少年群体中,透明矫治器比固定、舌侧和陶瓷矫治器更具吸引力<sup>[2]</sup>。尽管透明矫治器发展之初主要用于治疗轻至中度的错颌畸形,随着无托槽隐形矫治技术的发展创新与透明矫治器材料的更新迭代,越来越多的正畸医师开始利用透明矫治器治疗更高难度的病例,逐渐推广了透明矫治器的治疗范畴。然而,透明矫治器与传统矫治器的生物力学存在着较大的差别,固定矫治器的生物力学研究并不能直接推及到透明矫治器上。因此,观测无托槽隐形矫治正畸牙移动与透明矫治器的变形关系,可为矫治器结构的优化设计和正畸医师制定更合理的治疗方案提供科学依据。

常用的透明矫治器力学特性测试与分析法主要有感压纸法<sup>[3-4]</sup>和应变片法<sup>[5-6]</sup>。感压纸是由转印膜和显影剂膜组成的厚约  $90\text{ }\mu\text{m}$  的薄膜,它在压力作用下转印膜内微型气泡破裂释放出能与显影剂膜层活性物发生反应的物质,从而使感压纸出现从淡粉红色到深红色不等的反映压力强弱的印记,由此可以测出和确定透明矫治器对牙齿表面施加的压力和施力点位。尽管感压纸法具有与牙面的紧密接触影响较小、准确性高、方便用于口内实测等优点,然而,其受力与光密度之间的关系是非线性的,且随环境温度、湿度和加载速率而变化,需要进行校准。另外,其测得的力通常包括瞬时就位力和剪切力等。应变

片法是将作为应变传感器的电阻应变片固定在被测物体表面上并连接到电路中,通过测量其电阻变化引起电压或电流的变化值,再根据应力-应变关系式确定被测物体表面的应力状态。虽然电测法所用传感元件尺寸小、测量精度高,但需要利用强力胶水粘贴在待测物表面导致局部刚度增加效应,且只能测定局部的应变,无法进行离面变形和全场测量;所以对于一个连续的整体透明矫治器,应变电测法并不能够测量出矫治器整体的受力。另外,由于牙齿面积太小导致应变片粘贴困难,实验中使用的模型与矫治器尺寸一般为数字化颌骨标准模型的数倍,这在一定程度上也影响了实验结果的准确性和科学性。

相对于上述接触测量方法,基于激光照明的全息干涉、电子散斑干涉及云纹干涉等光测技术具有高灵敏度、高精度的特点。其中,电子散斑干涉技术测试设备相对简单、测量范围广及对环境与试样表面要求低等,因此被广泛用于科研与工程领域中的结构表面小变形或应变、振动特性分析和微转动位移的测量中<sup>[7-11]</sup>。光学干涉技术通过设计不同的光路可以对物面的三维变形中某方向分量的测量,若需测其他方向的分量则要改变光路。因此,丹麦 Dantec Dynamics 公司研发了一款电子散斑干涉三维变形测量系统(Q-300)。该系统采用一个单色黑白相机作为图像采集单元,将单色激光束分成五束照明物面,其中四束分成正交的两组分别用于面内位移的水平与竖直分量的测量,另外一束采用迈克耳孙干涉仪光路布置测量离面位移。Q-300 通过光开关关闭实现三维变形的测量,很显然该系统不是同时测量 3 个方向的变形。为此,上海大学的张东升教授科研组开发了基于三色激光照明和一台 3CCD 彩色相机结合三个相移单元的三维变形同步测量系统<sup>[12]</sup>。某些情况下,应变测量比变形测

量对于某些产品质量和结构可靠性检测更重要。因此,科研人员采用三色激光照明和一台 3CCD 彩色相机及迈克耳孙干涉仪式剪切光路布置,实现三维应变或三维变形与应变的同步测量<sup>[13-14]</sup>。由于对应于物面三维变形的导数(即应变)共有 6 个分量,前述的应变同步测试方法一次只能测量应变的 3 个分量。尽管可以通过两次测量来得到 6 个应变分量,由于改变剪切方向需要耗费时间,因此对于塑性或蠕变等不可重复的变形测量,前述三维变形测量方法很难确保结果的准确性。

针对三维电子散斑干涉法用于隐形牙齿矫治器的测量需求,本文用三色激光和一台 3CCD 彩色相机同步测量物面变形的 3 个方向分量;通过一个相移装置实现三波长激光的同步准 90°相移,利用窗口自适应条纹滤波技术<sup>[15-16]</sup>对相位条纹图进行高保真降噪处理;基于测量得到的三维变形信息和数值差分法,得到了更有参考价值的 6 个应变分量。

## 2 原 理

图 1 仅给出用红蓝两种颜色的激光分别测量试样离面和面内变形分量的光路(彩图见期刊电子版)。图 1(a)为测量物体离面方向、即沿  $z$  轴方向的变形。红色激光束经过分束镜分成相互垂直的两束光,一束(称为物光 O 光)投射在试样表面、另一束(称为参考光 R 光)照射在参考物面;O 光和 R 光经物面和参考面反射后再次经过分束镜在相机成像靶面相互重叠并干涉形成散斑图。图 1(b)为测量物面沿  $x$  轴方向变形的光路布置示意图,蓝色激光束经分束镜分成方向相反的两束光,分别经反射镜 Mirror1 和 Mirror2 以相同的入射角  $\theta$  对称地投射在试样表面,而经物面漫反射后的光线在相机成像靶面相互重叠干涉形成另一散斑图。保持相机和试样不动,将图 1(b)中的光路系统整体绕  $z$  轴转 90°,把蓝色激光换成绿色激光就可以测量物面沿  $y$  轴方向的变形。需要说明的是:图 1(a)和 1(b)中  $k$  为波矢量。

虽然 3 种颜色激光束同时在物体表面相互重叠,但由于波长和光源均不相同而不会产生相互干扰。由于普通彩色相机的感光芯片上通常覆盖着与其各像元对应的滤波片阵列(由 R、G 和 B

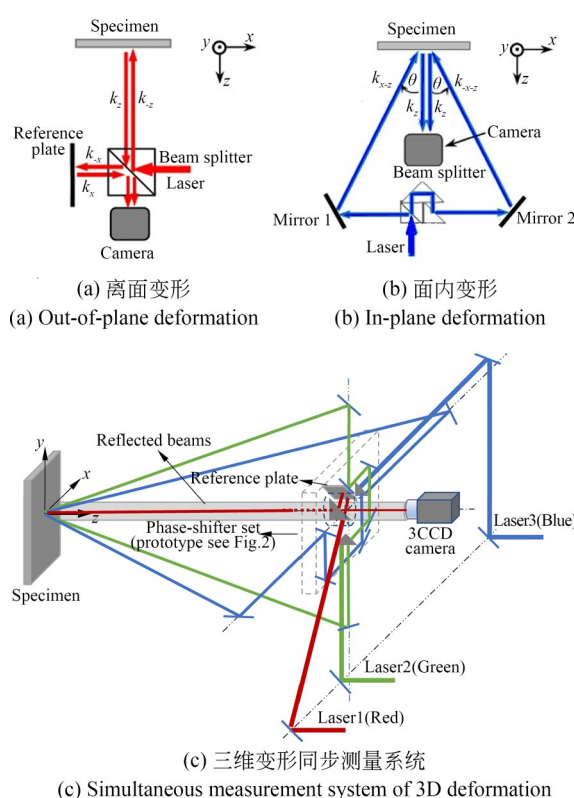


图 1 散斑干涉变形测量系统光路示意图

Fig. 1 Optical arrangement for speckle interference deformation measurement

3 种颜色的微型滤波片构成),与前者不同的,目前 3CCD 或 3CMOS 彩色相机利用 3 个感光芯片分别采集 R、G、B 的颜色信号。其内部的 3 个成像芯片前置有一个滤色棱镜,该棱镜将入射到相机的可见光分成 3 路不同带宽的单色光、即 R、G 和 B 3 个分量后分别由对应的芯片记录。因此,使用 3CCD 或 3CMOS 彩色相机能够同时记录 3 种颜色的散斑图而且互不干扰。本文将两个面内变形测量光路和离面变形测量光路集成为图 1(c)所示的三维变形同步测量系统,系统用三色激光同时照明和一台 3CCD 相机同时记录三色散斑干涉图。

设物面上点  $(x, y, z)$  处产生变形位移  $s = (u, v, w)$  时,变形前后图 1(a)中 O 光和 R 光间与光程之差对应的相位差为:

$$\varphi_r = (k_z - k_{-z}) \cdot s = \frac{2\pi}{\lambda_r} [(0, 0, e_z) - (0, 0, -e_z)] \cdot (u, v, w) = \frac{4\pi w}{\lambda_r} \quad (1)$$

其中:  $\lambda_r$  为红色激光波长,  $e_z$  为  $z$  轴方向单位矢量模。对于图 1(b) 两束光程之差对应的相位差则为:

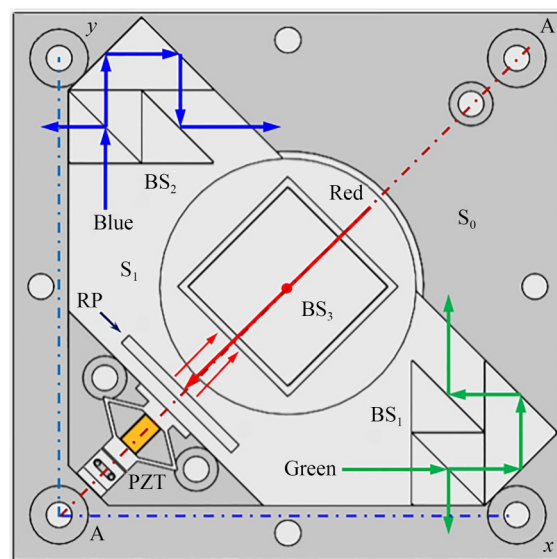
$$\begin{aligned} \varphi_b &= (k_{x-z} + k_z) \cdot s - (k_{-x-z} + k_z) \cdot s = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_b} [(e_x \sin \theta, 0, -e_z \cos \theta) - \\ &(-e_x \sin \theta, 0, -e_z \cos \theta)] \cdot (u, v, w) = \frac{4\pi u \sin \theta}{\lambda_b}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $\lambda_b$  为蓝色激光波长,  $e_x$  为  $x$  轴方向单位矢量模。类似地, 对于波长  $\lambda_g$  的绿色激光情形则有:

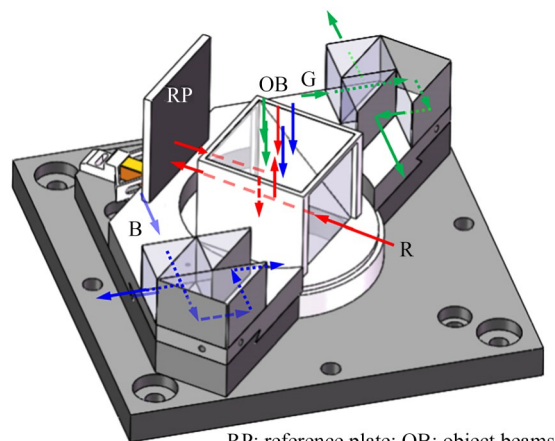
$$\varphi_g = \frac{4\pi v \sin \theta}{\lambda_g}. \quad (3)$$

通常情况下, 采用载波和傅里叶技术可基本满足动态变形定量测试的要求, 但该方式除了要用针孔滤波器滤除两束干涉光中的噪声以便于形成高质量的条纹外, 一般很难满足复杂变形的测量, 精度也难以达到差分法进行应变分析的要求。因此, 在静态或准静态变形测试时, 多采用相移技术实现更高精度的测量。相移测量与相位分析技术中, 一般采用步长  $90^\circ$  的四步相移。一般地, 三波长三维变形同步测量方案中因波长不同需一对一配置相移器, 即要用 3 个压电陶瓷去满足所有波长有相同相移步长的要求。所以, 这种相移方案需要额外配置同步控制单元。为此, 本文设计了一种相移机构, 该机构仅用一个长 10 mm 的压电陶瓷块 (PZT) 驱动就可以在三波长中产生几乎相同步长的相移。图 2(a) 和 2(b) 分别为所设计的相移器及三色光路布置和相应的三维结构原型示意图。

图 2(a) 中, 深灰色区域  $S_0$  为硬方块铝加工成的固定基板, 在其表面固定有两个走向与对角线 AA 平行的燕尾形导轨; 灰白色区域  $S_1$  为硬方块铝加工成的六边形可动支撑薄台板, 其背面有两个平行的燕尾槽, 与  $S_0$  上的燕尾型导轨精密匹配。灰白色区域  $S_1$  中  $BS_1$ ,  $BS_2$  和  $BS_3$  分别表示绿光、蓝光和红光的分束镜, RP 为用于测量离面变形的参考平板, 其中 RP,  $BS_1$  与  $BS_2$  固定在可滑动板  $S_1$  上,  $BS_3$  则固定在基板  $S_0$  上;  $S_1$  通过蝶形构件将压电陶瓷 PZT 与基板  $S_0$  连接 (见图 2(a) 的左下角), 由压电控制器驱动 PZT 产生微伸缩带动  $S_1$  沿 AA 方向平移, 从而在绿光、蓝光和红光光路中同时产生准相同步长的相移。经被测物面漫



(a) 光路布置  
(a) Optical layout



RP: reference plate; OB: object beams

(b) 结构原型  
(b) Prototype of mechanical structure

图 2 三色光相移器示意图

Fig. 2 Illustration of phase-shifter for tri-color

反射的三色物光束 OB (见图 2(b)) 透过  $BS_3$  进入 3CCD 相机, 而照射在参考板 RP 的红色参考光反射后经  $BS_3$  再次反射后也进入 3CCD 相机。

如图 3 所示, 当压电陶瓷块电致伸长  $\Delta$  时, 推动平台  $S_1$  沿 AA 方向平移  $\Delta$ , 这时通过分束镜  $BS_1$  和  $BS_2$  的绿色分光束  $GB_1$  和蓝色分光束  $BB_1$  的光程均改变  $\sqrt{2}\Delta$ ; 对于照射在参考板 RP 上红色光束的光程会改变  $2\Delta$ 。对于常用的波长 473, 532 及 671 nm 的蓝绿红三色激光, 若  $\Delta = 88.53$  nm, 则上述三色光束会分别产生  $95^\circ$ ,  $85^\circ$  和  $95^\circ$  的相位改变量, 即三色光的相移步长可近似认为  $90^\circ$ 。

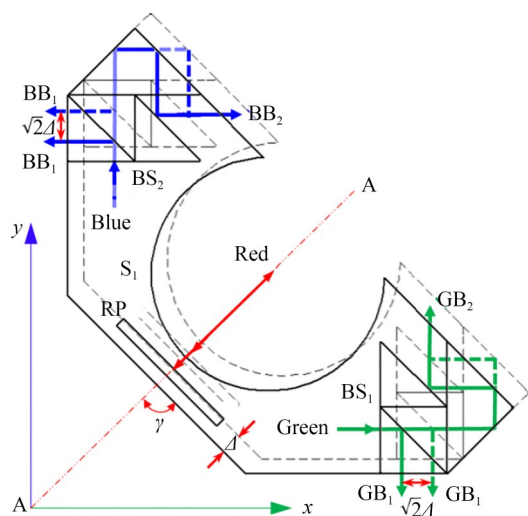


图3 三色光相移产生示意图

Fig. 3 Schematic of phase shift generating for tri-color beams

一般地,相机记录干涉形成的散斑图强度  $I(x, y)$  可记为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos \varphi(x, y), \quad (4)$$

式中:  $a(x, y)$  与两束光的光强有关,  $b(x, y)$  反映干涉的调制项,  $\varphi(x, y)$  是与两干涉光束光程差有关的相位差。因此, 四步相移方法记录的干涉图强度可表示为:

$$I_i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\varphi(x, y) + i\delta] \quad (i = 0, 1, 2, 3). \quad (5)$$

对于步长  $90^\circ$  相移的情形,  $\delta = 90^\circ$ 。此时, 相位差为:

$$\varphi(x, y) = \arctan \left( \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right). \quad (6)$$

### 3 隐形牙齿矫治器模型加工

本实验经过南京医科大学附属口腔医院伦理委员会审查批准(伦理审查号: PJ2020-071-001), 实验所用的实验模型筛选自 2021~2022 年于江苏省口腔医院正畸科结束主动矫治患者的牙列数字化三维模型。筛选的标准为: (1) 恒牙列、牙列完整; (2) 无明显牙形态异常、牙体缺损及严重磨损; (3) 牙周组织健康; (4) 患者及家长知情同意。

图 4 为本文的实验模型, 该模型是按筛选出

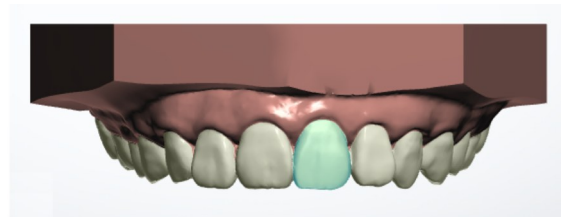
(a) 数字牙模  
(a) Digital teeth model(b) 制作好的矫治器及牙模  
(b) Prototypes of the clear aligner and teeth

图4 待测试样

Fig. 4 Specimen production

的患者上颌 1:1 的尺寸制作。图 4 中, 标亮(浅绿色)的牙齿(左上中切牙)为目标牙, 模型中设置目标牙唇向整体移动 0.5 mm, 其余牙齿保持原位不变。实验模型为专用软件设计的数字模型经 3D 打印而成, 材质为光敏树脂。为满足电子散斑干涉技术的测试条件, 上颌模型添加了与之形成一体化的底座并将模型底座前方尖端去除, 同时, 模型底座加高至目标牙端距底座底部平面 50 mm (参见图 4(b))。在牙弓腭中缝适当位置设置两个垂直于水平面, 贯穿底座的通孔便于其与支座固定, 以消除刚性位移。透明矫治器选用厚 0.8 mm 的 Erkodur 膜片制作, 由负压压膜机预热膜片并在工作模型上负压成型, 待透明矫治器自然冷却后对透明矫治器进行脱模及边缘修整。为避免实验模型放置过程中因环境温度、湿度的改变产生变形, 变形测量尽可能在实验模型制好后 48 h 内完成。

实验前, 为提高试样表面反光的均匀性和反光率, 需对透明矫治器待测外表面(唇侧)喷涂白色哑光漆。所用白色哑光漆的主要成分为无机

颜料和环氧树脂,与透明矫治器的主要成分聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己烷二甲醇酯和 Poly-ethylterephthalat (PET-G) 在常温下不发生反应。因此,哑光漆对透明矫治器材料特性的影响可以忽略。

## 4 实验与结果

### 4.1 测量系统的有效性验证

为了检验提出的相移步长为准  $90^\circ$  三维微变形测量系统的可行及准确、有效性,本文首先利用该系统对刚性平板面内微转动引起的二维位移分量进行测量。如图 5(a)所示,当平板  $ABCD$  在图 5(b)所示的角位移驱动器顺时针方向绕中心  $O(0,0)$  旋转一个微角度  $\beta$  时,板面内点  $A(x, y)$  的面内水平和竖直位移分量  $u$  和  $v$  分别为:

$$u = AA' \sin \alpha \simeq (OA \cdot \beta) \sin \alpha = (OA \cdot \sin \alpha) \beta = y\beta, \quad (7)$$

$$v = -AA' \cos \alpha \simeq -(OA \cdot \beta) \cos \alpha = -(OA \cdot \cos \alpha) \beta = x\beta. \quad (8)$$

实验使用的是北京卓立汉光公司生产的 RAUK100 型微步进转动器(见图 5(b)),其闭环控制模式下最小转动步距精度为  $0.0005^\circ$  ( $1.8''$ )。由式(7)和式(8)可知,反映刚性转动形

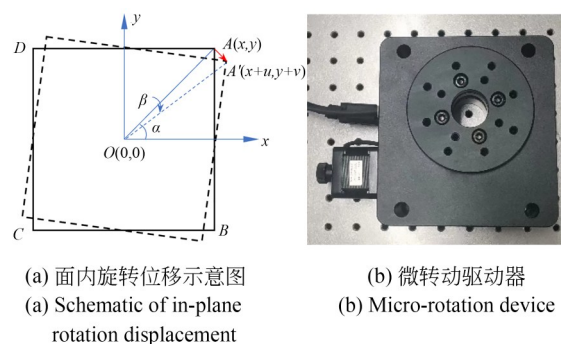


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

成的位移  $u$  和  $v$  的条纹应是水平和竖直平行等间隔的。微转动器以步距  $0.002^\circ$  ( $7.2''$ ) 带动平板转动 7 步。图 6 和图 7 为采用本文所设计的测量系统在仅用蓝色和绿色激光照明、同时测得的平板 7 次转动时的  $u$  和  $v$  相位条纹。图中  $A_2$  与  $B_2$  行的条纹图分别是采用相位滤波方法<sup>[17]</sup>对  $A_1$  与  $B_1$  行的散斑相位条纹图处理后的结果。所用滤波窗口尺寸为  $3 \times 3$  pixel, 均值滤波 150 次。

对图 6 中  $A_2$  和  $B_2$  行相位图进行去“包裹”, 并取其位于同一列(或行)的相位分布值进行线性拟合, 结果如图 7(a) 和 7(b) 所示。图 7 表明: 所有线性拟合的置信水平  $R$  均高于 0.9998。式(7)和式(8)表明, 微转动引起的面内微位移水平

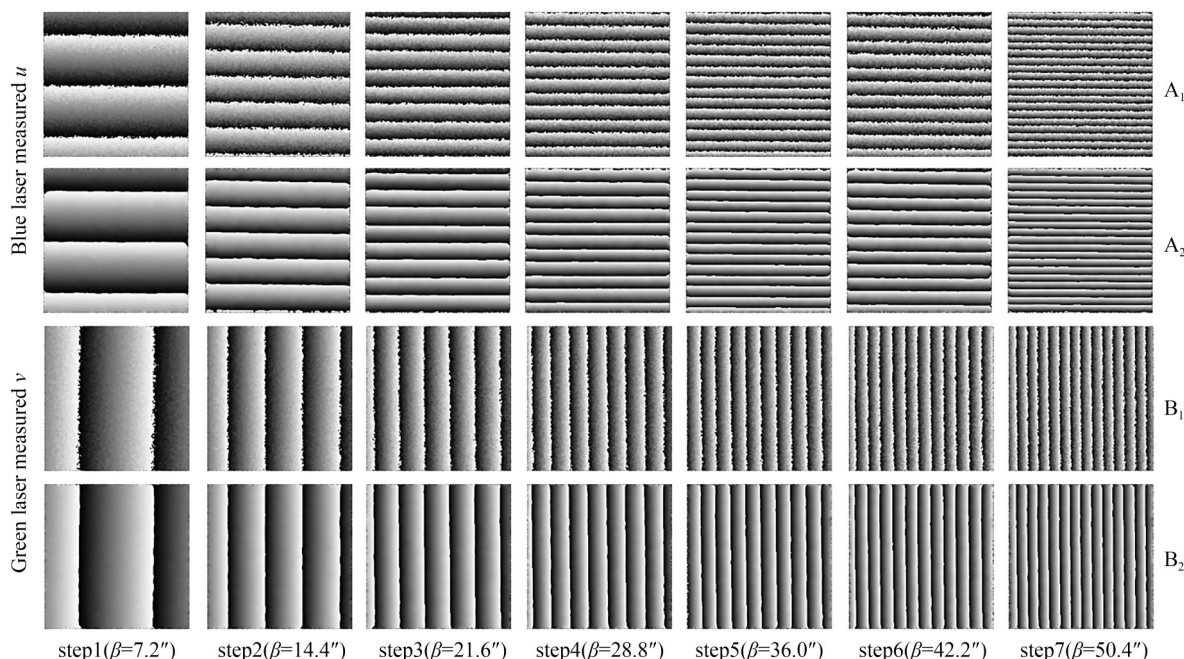


图 6 对应于  $u, v$  位移场的包裹相位条纹图

Fig. 6 Wrapped phase maps of  $u$  and  $v$  components

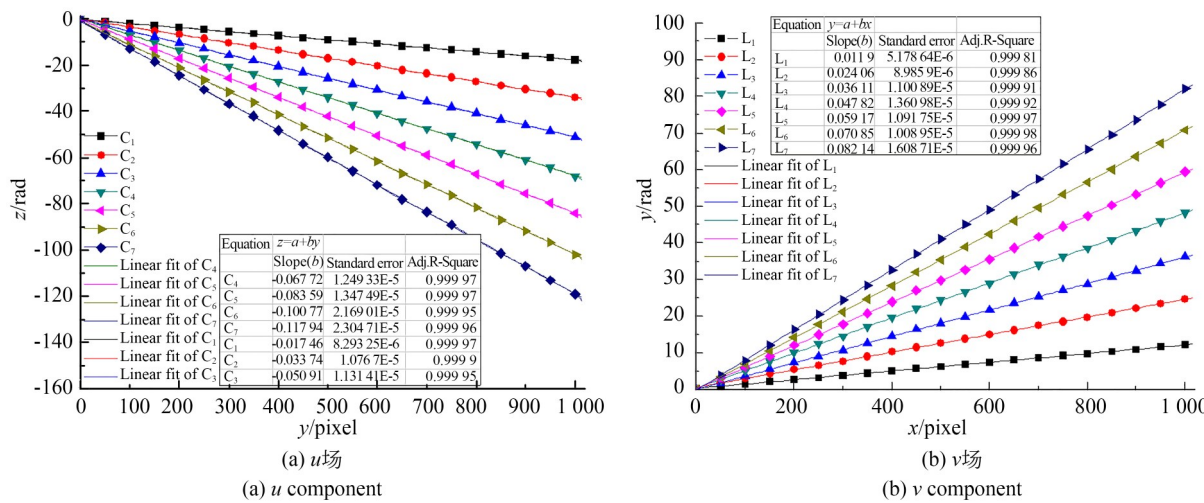


图 7 同一截线处相位分布及解包裹相位的线性拟合结果

Fig. 7 Phase distribution of same cross-section on phase maps and linear fitting results of unwrapped phase

分量  $u$  和竖直分量  $v$  分别是空间坐标  $y$  和  $x$  的一次函数。它们对坐标的一次导数即为转角。因此,线性拟合得到的斜率就是面板的转动角(需乘上标定系数),实际转动角度和蓝绿激光测得的转角结果见表 1。

表 1 激光散斑干涉系统测得的转角

Tab.1 Rotational angles measured by proposed ESPI configuration (")

| Driving step | Motor step | Based on $u$ | Based on $v$ |
|--------------|------------|--------------|--------------|
| 1            | 7.2        | 7.46         | 7.21         |
| 2            | 14.4       | 14.41        | 14.56        |
| 3            | 21.6       | 21.75        | 21.88        |
| 4            | 28.8       | 28.94        | 28.96        |
| 5            | 36.0       | 35.72        | 35.86        |
| 6            | 43.2       | 43.06        | 42.93        |
| 7            | 50.4       | 50.39        | 49.78        |

结合表 1、以及图 6 的 A1 和 A2 行的第一列条纹图可知:当平板转动  $7.2''$  时图像中会出现 3 条条纹;那么如果图像仅有一条纹时,则对应的转角为  $2.4''$ ,即系统的转角测量精度不大于  $2.4''$ 。同样地,如果物体表面的变形类似式(7)和式(8)分布,它们对坐标的一次导数则为应变,按此处理,系统的应变测量精度不大于  $10\text{ }\mu\epsilon$  (注: $1\text{ }\mu\epsilon=1.0\times 10^{-6}$ )。

4.2 隐形矫治器的三维变形特性测量

图 8 为自行搭建的隐形矫治器三维变形测试实验系统。表面喷涂白色哑光漆的透明矫治器及牙模固定在自制支座上,支撑试样的支座与固定光学测试系统的面包板一同固定在隔振实验台上以消除外在振动的影响。测量时,3 个功率均为 80 mW 的波长 671 nm 红色、532 nm 绿色及 473 nm 蓝色单纵模激光同时照射在试样表面;由自编软件控制的压电陶瓷控制器驱动 PZT 带动  $S_1$  平移三次将在三色光路中形成四步相移,同时软件控制 3CCD 彩色相机(JAIAT-140GE,日本)同步采集图像并存于计算机中。根据患者的临床感受和隐形矫治器材料制造商测试结果,当矫治器戴在受治者牙上约 60 s 后,矫治器变形达到最大并保持不变。因此,实验时启动图像自动采集程序后立即戴上矫治器,操作人员迅速将手移离测试区域并保持静止、屏气(最好戴口罩)以免呼吸或走动引起测试区域空气流动干扰测量。系统每隔 3 s 自动进行一次采存 4 幅彩色图像,共采集 21 次,持续 60 s。

图 8 中,水平方向蓝色光臂左、右反射镜间距为 54 cm,竖直方向绿色光臂上、下反射镜间距为 44 cm,试样到镜头(面包板)的距离为 42.5 cm;镜头为焦距 50 mm 的 3CCD 相机专用镜头。

图 9 为 3CCD 相机记录的彩色散斑图及其三色分量图(亮度增强显示)。需要说明的是,千兆网数据接口的 JAI 相机(厂商提供的软件包问题)

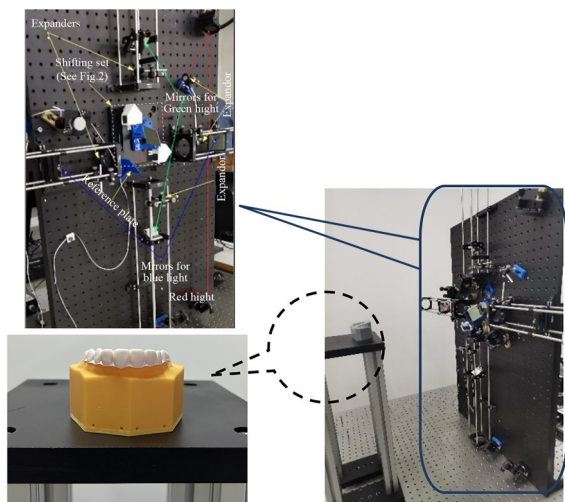


图8 隐形矫治器三维变形测试装置

Fig. 8 Experimental setup for measuring 3D deformation of clear aligner

显示和存储模式中红、蓝色色彩互换,即红色显示成蓝色,蓝色显示成红色。

图像采集完成后,将所有彩色图像进行RGB三色分离得到3组黑白灰度图像。对每组

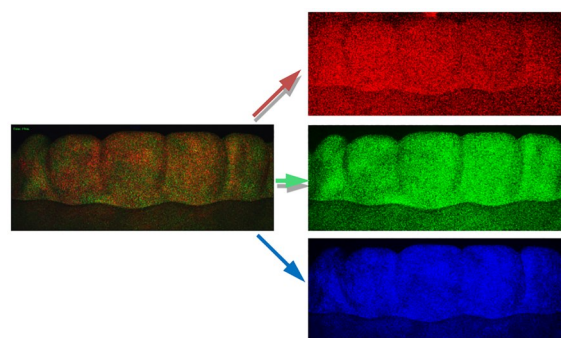


图9 彩色散斑图及其红绿蓝三色分量

Fig. 9 Color speckle pattern and its RGB components

图像用步长  $90^\circ$  的四步相移算法计算条纹的相位。图10为矫治器戴上牙模后采用图像减模式获得的最初3 s内反映三维变形的干涉条纹强度图。图11则是通过4步相移法相位计算公式(6)得到的条纹相位,它们对应于图10所示散斑条纹的相位。对比图10与图11可以看出,如果不采用相移技术电子散斑干涉测量方法很难获得反差好、精确度高的条纹,条纹相位解调则几乎无法进行。

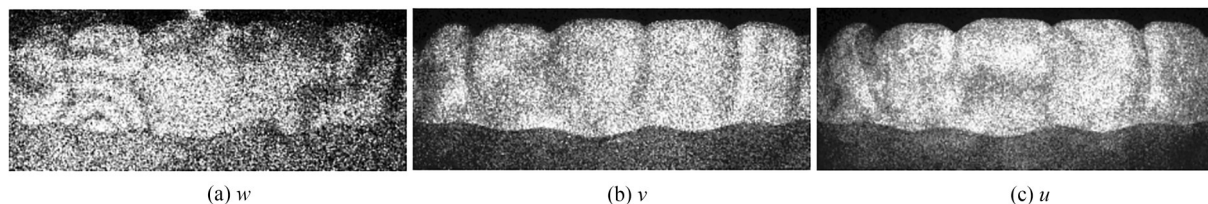


图10 初始受载时的矫治器变形条纹

Fig. 10 Speckle fringe patterns of deformation components at initial stage

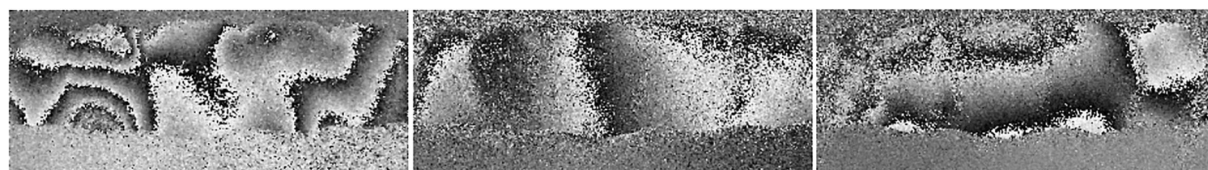


图11 对应于图10条纹的包裹相位

Fig. 11 Wrapped phase related to speckle fringe patterns shown in Fig. 10

限于篇幅,图12仅列出了被测试样离面方向每隔3 s反映相对变形的相位条纹。可以看出,矫治器唇侧表面初始变形最大,尔后10 s内近似匀速变化;再后30 s内逐渐递减,随后的20 s内渐渐减小至稳定不变(最后的6 s相对变形条纹相位图没有列出)。

图13为矫治器戴上60 s后3个方向总的变

形。图13(a)~13(c)为包裹相位条纹,图13(d)~13(f)为去包裹相位。面内变形的水平分量向右为正、竖直分量向下为正,离面变形指向唇侧为正向。由图13(d)~13(f)所示的变形云图可以看出:矫治器表面对应于目标牙部分(ROI)不论离面还是面内变形皆比较均匀;而对于目标牙左侧(L)及右侧(R)切牙部分的离面变形特

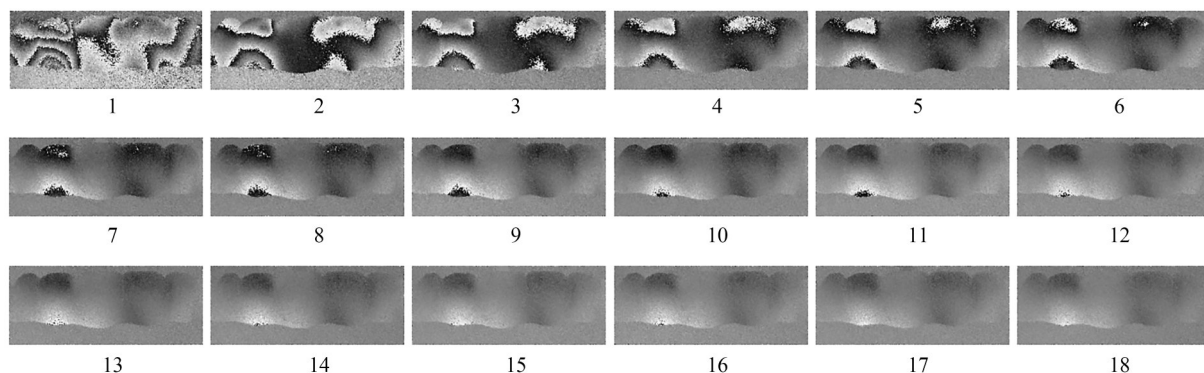


图 12 被测试样离面方向受载后 60 s 内每隔 3 s 的相对变形

Fig. 12 Evolution of relative deformation every other 3 s of tested aligner in following 60 s

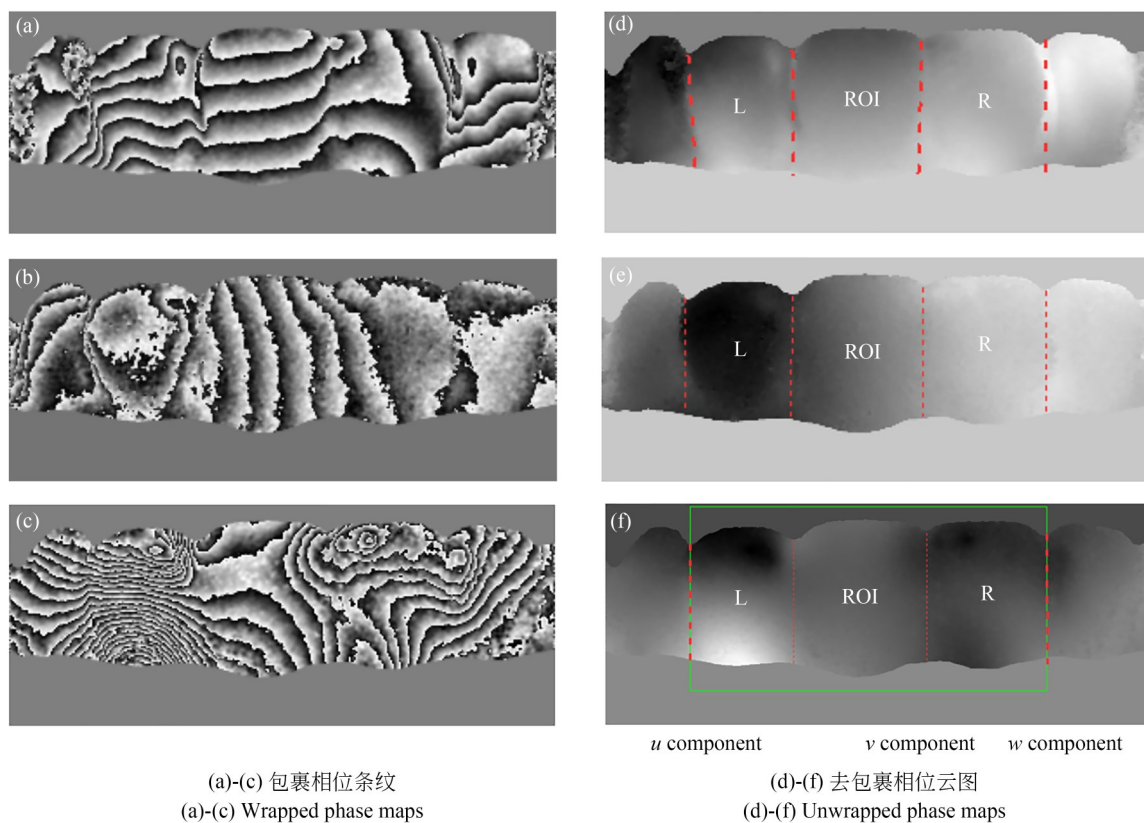


图 13 电子散斑干涉方法测得的加载 60 s 时三维变形分量

Fig. 13 Phase maps related to 3D deformation components at 60 s after loaded  $u$ ,  $v$  and  $w$  obtained by ESPI

性不太一致;结合图 13(a)~13(b)可以看出,与 3 个切牙接触的矫治器面内变形相对均匀(定量结果见图 15),另外就是面内微转动,表现为图 13(a)与图 13(b)对应区域的条纹近似互相垂直。

图 14 为利用窗口可变的自适应滤波技术<sup>[15-16]</sup>对图 13(a)~13(c)所示的相位条纹图进行高保真降噪滤波处理后的结果。与正余弦相

位滤波方法<sup>[17]</sup>相比,采用窗口可变的自适应滤波技术除了能有效滤除散斑噪声外,还能很好地保留条纹固有的分布形态,特别是对密集条纹的处理。

对滤波后的相位进行去包裹得到连续分布的相位,然后再根据式(1)~式(3)标定转换成位移图,并利用式(9)~式(14),通过数值差分算法即可得到试样表面各点的应变分量 $\epsilon_{ij}$ 及面内转

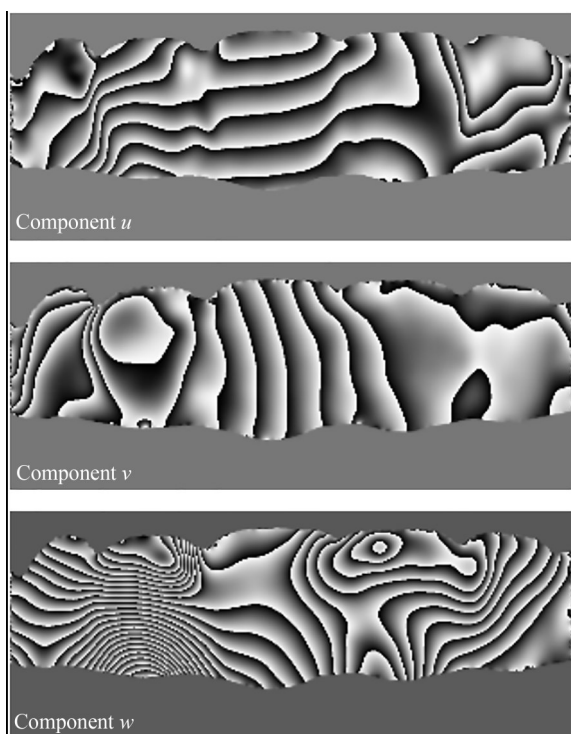


图 14 图 13 的散斑相位条纹经窗口可自适应滤波处理后的结果

Fig. 14 Denoised phase fringe patterns shown in Fig. 13 by window-deformable adaptive filter

角  $\Delta$ , 结果见图 15。本文中数值差分计算的步长为 1 pixel。

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u(x, y)}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v(x, y)}{\partial y}, \quad (10)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \right], \quad (11)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} \right], \quad (12)$$

$$\epsilon_{zx} = \frac{\partial w(x, y)}{\partial x}, \quad (13)$$

$$\epsilon_{zy} = \frac{\partial w(x, y)}{\partial y}. \quad (14)$$

由图 15 可知, 矫治器唇侧表面除了边缘区域外应变分量  $\epsilon_{yy}$  很小, 这是因为矫治器在  $y$  方向(即牙轴向)除了受矫治器与牙齿的摩擦力、材料泊松效应或温度变化引起的伸缩变形外, 该方向上不存在其他形式的力, 而摩擦力主要

与法向压力有关。矫治器唇侧表面对应待矫治的切牙区域(ROI)各应变分量基本都比较均匀, 而矫治器唇侧表面上的应变分量  $\epsilon_{xx}$  及  $\epsilon_{xy}$  的变化主要集中在牙缝对应的区域, 表明矫治器正畸力的形成主要是通过矫治器上与牙缝对应的 U 形褶皱槽的形变产生(具有弹簧的效用)。特别值得关注的:  $\epsilon_{xx}$  的值在切牙 L 的左侧牙缝至切牙 R 的右侧牙缝对应区域的大部分为正, 且在牙缝对应处急剧变化, 这意味着矫治器是通过它在唇侧面的结构收缩起到对目标牙的矫正作用。

本文对目标牙进行整体唇移的矫治, 此种类型的矫治方法在面内  $y$  方向的变形很小,  $\epsilon_{yy}$  相对于  $\epsilon_{xx}$  的大小及分布来说, 可以忽略不计, 因此, 将矫治器面内  $x$  方向上的变形看作简单的拉压变形, 并应用测量得到的膜片材料弹性模量结合  $\epsilon_{xx}$  计算矫治器变形应变最大处的应力, 进行定量的应力评估。

为了更直观地了解和说明矫治器唇侧部分对 3 个切牙表面的压力特性和施力“点(应该是一个小区域)”位的特点, 图 16 给出对应于图 13(d) 中矩形框内的矫治器表面离面挠曲变形值的三维分布。因为牙模型预先给目标牙(待矫正牙)设置了整体唇向移动 0.5 mm, 那么隐形矫治器需对其施加指向舌向的压力才能使其矫正回原位。根据作用与反作用原理, 矫治器表面对应于目标牙部分(ROI)受到牙对其施加压力则应指向唇向, 因此, 这部分的离面挠曲变形应为正值(即指向唇向), 实验测量结果与上述分析一致。图 16 中矫治器表面对应于目标牙部分(ROI)的离面变形比较均匀, 表明目标牙受到的压力比较均匀。

图 17 是水平方向正应变  $\epsilon_{xx}$  全场增强显示云图, 图中灰白区域为拉应变, 矫治膜片上最大拉应变为  $993 \mu\epsilon$ ; 灰黑区域则为压应变, 矫治膜片对应于中间三个切牙区域最大的压应变为  $-476 \mu\epsilon$ 。本实验所用 Erkodur 膜片的弹性模量值为  $2\,214.2 \text{ MPa}$ , 因此, 膜片水平方向最大的拉应力为  $2.199 \text{ MPa}$ , 膜片中间对应于 3 个切牙区域中最大压应力  $1.054 \text{ MPa}$ 。

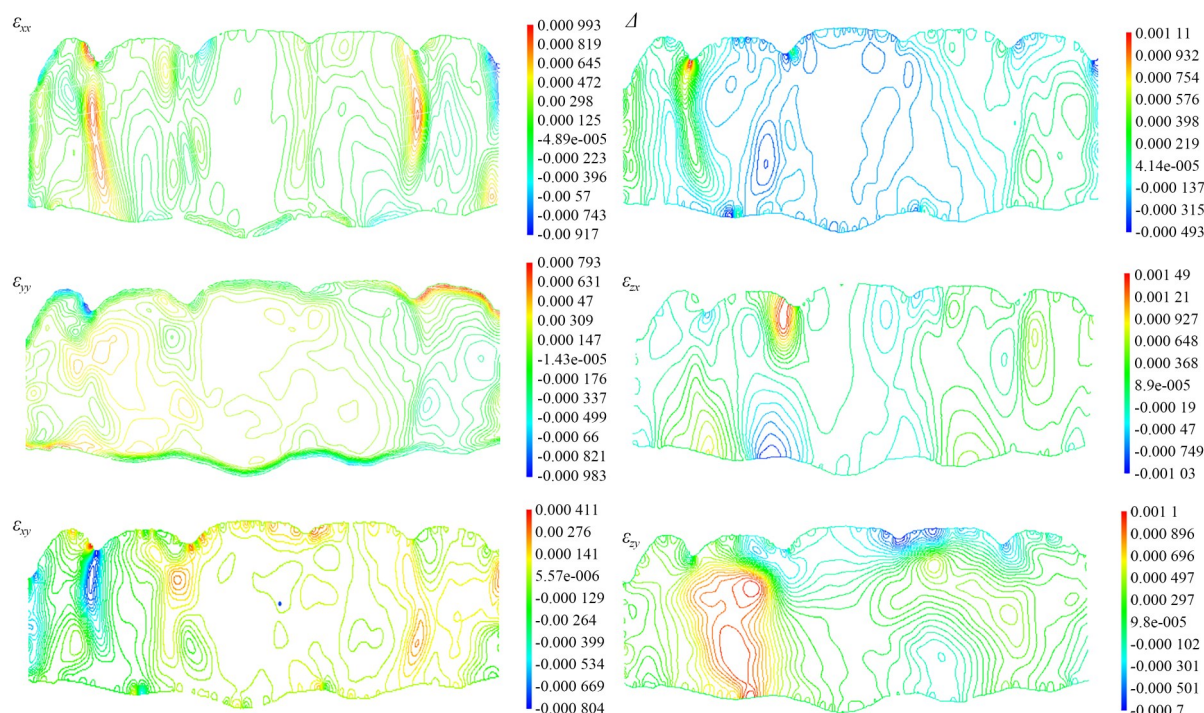


图 15 数值差分法作用于去包裹相位后得到的应变分量等值分布

Fig. 15 Isoline distribution of derivatives obtained by digital differential operation on those unwrapped phase maps

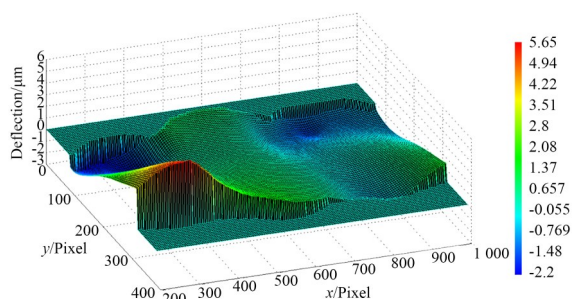
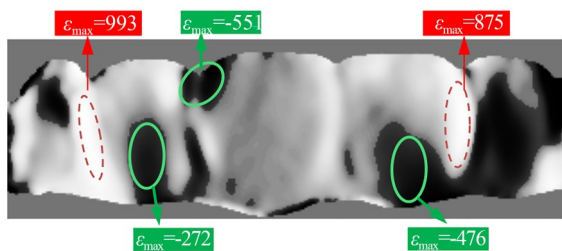


图 16 隐形矫治器离面挠曲变形的三维分布

Fig. 16 Three-dimensional distribution of clear aligner deflected deformation

图 17 应变  $\epsilon_{xx}$  全场增强显示云图Fig. 17 Enhanced nephogram of strain component  $\epsilon_{xx}$ 

## 5 结 论

本文提出采用三色激光干涉和3CCD彩色相机成像,并利用专门设计的三波长激光同步准90°相移装置,很好地实现了隐形矫治器三维全场变形的精确测量。采用数值差分法计算得到的全场应变,为矫治器力学行为的定量分析提供了重要的数据支撑。该方法具有三维变形完全同步测量,不需要任何物理实体剪切元件就可获得表面变形的6个应变分量的优点。与接触式测试方法只能单一地测量面内变形或离面压力相比,该测量方法对试样无任何附加力的影响,测量精度高、结果更准确,提供的是真正三维全场信息。由于隐形矫治器材料的杨氏模量特别是泊松比等力学本构参数,以及加工成矫治器后膜材厚度和形状等信息尚无法准确确定,因此还无法完全定量地进行矫治器的生物力学分析,有待后续的进一步研究。

## 参考文献:

- [1] ROSVALL M D, FIELDS H W, ZIUCHKOVSKI J, *et al.* Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2009, 135(3): 276-277.
- [2] WALTON D K, FIELDS H W, JOHNSTON W M, *et al.* Orthodontic appliance preferences of children and adolescents [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2010, 138(6): 698-699.
- [3] BARBAGALLO L J, SHEN G, JONES A S, *et al.* A novel pressure film approach for determining the force imparted by clear removable thermoplastic appliances [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2008, 36(2): 335-341.
- [4] CERVINARA F, CIANCI C, DE CILLIS F, *et al.* Experimental study of the pressures and points of application of the forces exerted between aligner and tooth [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(7): 1010.
- [5] 李晓玮. 应用传感器芯片测量隐形矫治力的初步研究 [D]. 北京: 首都医科大学, 2013.  
LI X W. *Preliminary Study on Measuring Invisible Orthodontic Force with Sensor Chip* [D]. Beijing: Capital Medical University, 2013. (in Chinese)
- [6] SKAIK A, WEI X L, ABUSAMAK I, *et al.* Effects of time and clear aligner removal frequency on the force delivered by different polyethylene terephthalate glycol-modified materials determined with thin-film pressure sensors [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2019, 155(1): 98-107.
- [7] RAJSHEKHAR G, GORTHI S S, RASTOGI P. Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane displacement derivatives using dual-wavelength digital holographic interferometry [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H16-H21.
- [8] 王永红, 姚彦峰, 李骏睿, 等. 剪切散斑干涉关键技术及应用进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 53-61.  
WANG Y H, YAO Y F, LI J R, *et al.* Progresses of shearography: key technologies and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 53-61. (in Chinese)
- [9] DAI X J, YUN H, SHAO X X, *et al.* Thermal residual stress evaluation based on phase-shift lateral shearing interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 105: 182-187.
- [10] 马银行, 蒋汉阳, 戴美玲, 等. 基于电子散斑干涉与数字剪切散斑干涉法的悬臂薄板振动分析 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 56-64.  
MA Y H, JIANG H Y, DAI M L, *et al.* Cantilevered plate vibration analysis based on electronic speckle pattern interferometry and digital shearing speckle pattern interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 56-64. (in Chinese)
- [11] WU M Y, LU G C, MA Y H, *et al.* Double speckle pattern interferometric measurements for micro-angular displacement and the center of rotation [J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 188.
- [12] 李晓东, 叶益民, 黄诚, 等. 电子散斑干涉三维变形测量技术研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(3): 397-406.  
LI X D, YE Y M, HUANG CH, *et al.* Research on simultaneous 3D displacement measurement using electronic speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(3): 397-406. (in Chinese)
- [13] WANG H Y, LIU C Y, WU S J, *et al.* Simultaneous measurement of three-dimensional displacement gradients using tri-color digital shearography [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, 64(1): 165-171.
- [14] ZHAO Q H, CHEN W J, SUN F Y, *et al.* Simultaneous 3D measurement of deformation and its first derivative with speckle pattern interferometry and shearography [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(31): 8665-8672.
- [15] 蒋汉阳, 戴美玲, 苏志龙, 等. 基于散斑相位条纹方向的自适应正弦/余弦滤波 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 81-88.  
JIANG H Y, DAI M L, SU ZH L, *et al.* An adaptive sine/cosine filtering algorithm based on speckle phase fringe orientation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 81-88. (in Chinese)
- [16] JIANG H Y, MA Y H, SU Z L, *et al.* Speckle-interferometric phase fringe patterns de-noising by

using fringes' direction and curvature [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 119: 30-36.

[17] AEBISCHER H A, WALDNER S. A simple and

effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Optics Communications*, 1999, 162(4/5/6): 205-210.

#### 作者简介:



王嘉雯(1999—),女,浙江湖州人,硕士,2021年于四川大学获得学士学位,2024年于东南大学获得硕士学位,主要研究方向为光测力学。E-mail: WangJiawen8627@163.com

#### 通讯作者:



杨福俊(1968—),男,江苏淮安人,博士,教授,博士生导师,2001年于大连理工大学获得博士学位,2002-2003年新加坡国立大学机械工程系研究工程师,2011-2012年美国匹茨堡大学医学院访问学者,主要从事光测力学及其图像处理等研究。E-mail: yang-fj@seu.edu.cn