

文章编号: 1001-4888(2017)05-0687-12

使用单彩色相机的单相机三维数字图像相关方法^{*}

俞立平, 潘兵

(北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100191)

摘要: 介绍了一种基于单个彩色相机的新型全靶面、单相机三维数字图像相关(3D-DIC)方法。借助于设计巧妙的颜色分光光路, 被测物体表面图像可以通过两条不同的光路达到相机靶面, 采集的标定靶和实验件表面的彩色图像可以分离得到蓝色和红色子图像。通过使用 3D-DIC 分析标定靶和实验件表面分离后的蓝色和红色子图像, 可以获得物体表面的三维形貌和变形。形貌测量、面内和离面平移、以及静态三维变形实验验证了该单彩色相机 3D-DIC 方法的有效性和测量精准度。由于可避免双相机同步, 且能实现无分辨率损失的全靶面三维形貌和变形测量, 本文方法在需要实现瞬态位移和变形测量的爆炸、冲击、振动等领域中具有广阔重要的应用前景。

关键词: 单相机三维数字图像相关方法; 彩色相机; 动态变形测量

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-303

0 引言

基于双目立体视觉原理的三维数字图像相关方法(Three-dimensional digital image correlation, 3D-DIC)可对任意形状物体的表面三维形貌和变形进行非接触、全场测量。由于对测量环境要求低、适用测量范围广泛和测量精度高等优势, 这项起源于实验力学领域的先进光测力学技术现已在科研和工程领域获得了广泛应用^[1-6]。然而, 使用双数字相机(及其同步触发装置)显然会极大地增加系统的硬件成本, 对于使用双高速相机(或超高速相机)的高速 3D-DIC 而言, 额外的高速相机和复杂的双高速相机同步技术将使高速 3D-DIC 系统价格(相比于单高速相机)增加几十万元至数百万元。因此, 发展一种仅使用单个相机的 3D-DIC 方法无疑会极大地降低系统搭建成本和技术复杂性, 并使测量系统更为紧凑便携, 这显然将更有利于 3D-DIC 方法的普及应用。

受成本优势和技术简便等优点所吸引, 近年来单相机立体视觉技术^[7-13]和单相机 3D-DIC^[14-24]获得了较多关注。在已报道的这些单相机 3D-DIC 方法中, 通常需在成像镜头前方放置一个额外的光学分光装置(如平面镜组^[14-18]、双棱镜^[19,20]或衍射光栅^[21-24])。借助于这些分光装置, 被测物体表面图像可通过左右两条不同的光路同时到达相机的左右靶面。例如, Pankow 等^[14]搭建了基于四平面镜组的单相机 3D-DIC 系统, 并成功地测量了铝板在冲击波作用下的离面变形。最近, 本文作者对该系统的抗环境光干扰性能进行了优化^[15], 并研究了测量系统的结构几何参数对位移测量精度的影响^[16]。通过将该系统与高速摄像技术结合, 将该方法成功地用于碳纤维增强复合材料板在冲击加载下的瞬态变形行为研究^[17]和结构动力学参数识别^[18]。此外, 基于双棱镜和衍射光栅的单相机 3D-DIC 方法近期也受到一些学者的关注, 并成功应用于相对较小物体的形貌和变形测量。

^{*} 收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(11272032, 11322220, 11427802 和 11632010)资助

通讯作者: 潘兵(1978—), 男, 博士, 教授。主要研究方向为实验固体力学。Email: panb@buaa.edu.cn

光学分光元件或装置是单相机 3D-DIC 方法的核心装置,它们的使用不仅能够避免复杂的双相机同步过程,也使测量系统更加经济、紧凑。然而,已有的这些单相机 3D-DIC 方法存在一个重要不足:以牺牲相机靶面空间分辨率实现单相机 3D-DIC 测量。因为物体表面通过两条不同光路分别成像于相机靶面的左右两侧,仅仅一半甚至小于一半的相机靶面可以用于实际测量,这显然极大地降低了系统的测量分辨率。对于动态变形测量而言,高速相机的分辨率通常非常有限,且会随着采集速度的增加而降低,空间分辨率的降低往往是难以接受的。因此,发展一种全靶面、单相机 3D-DIC 方法,可在不牺牲相机空间分辨率前提条件下实现三维形貌和变形测量,无疑具有重要的实用意义。

本文介绍了一种基于单彩色相机的新型全靶面、单相机 3D-DIC 方法。借助于设计巧妙的颜色分光光路,被测物体表面图像可以通过两条不同的光路达到相机靶面,并被彩色相机的红色和蓝色通道获取。采集到的彩色图像可分离得到相应的红色和蓝色子图像。通过使用常规的 3D-DIC 分析这些红色和蓝色子图像,可以提取物体表面的三维形貌和变形。由于该方法允许左右图像的相互重叠,因此能充分利用相机靶面的分辨率,彻底避免了已有单相机 3D-DIC 方法的缺陷。

1 基于单个彩色相机的全靶面、单相机三维数字图像相关方法

1.1 成像系统

本文所建立的全靶面、单相机 3D-DIC 系统见图 1。该系统由彩色 3CCD 或 CMOS 相机、分光棱镜、红色和蓝色带通滤波片以及三块平面反射镜(分别表示为 M_1 , M_2 和 M_3)组成。通过调整反射镜的位置和转角,物体表面图像可以通过两条不同的光路到达相机靶面,并形成不同颜色的子图像。与已有的单相机 3D-DIC 方法不同的是,由于分光棱镜和带通滤波片的使用,左右两条光路得到的红色和蓝色子图像都能够在彩色相机不同颜色的通道成像,因此允许其空间位置相互重叠,充满整个相机靶面,从而可实现单相机全靶面三维形貌和变形测量。

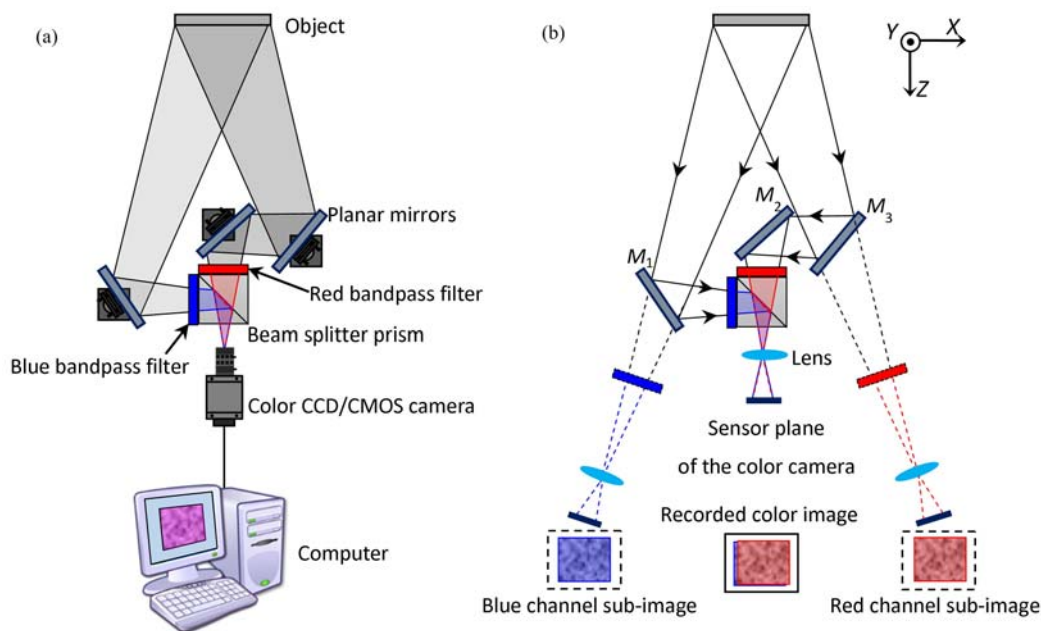


图 1 单彩色相机 3D-DIC 系统:(a)示意图;(b)光路图

Fig. 1 (a) Optical arrangements of the established single-camera stereo-DIC system; (b) The schematic of optical path

本文首先搭建了基于 3CCD 彩色相机的单相机 3D-DIC 测量系统,相比于普通 CMOS 彩色相机,3CCD 彩色相机在图像分离中更有优势。图 2(a)给出了 3CCD 彩色相机的成像原理示意图,3CCD 彩色相机是由三个独立 CCD 芯片和三色分光棱镜组成,且每个芯片只能接收一种颜色的光^[25]。因此,不同颜色的光线在进入相机经三色分光棱镜分离后分别到达相应的靶面。这三个通道的子图像结合起来即为相机采集到的 24 位真实彩色图像,相应的相机量子效率曲线如图 2(b)所示。通过在图 1 所示的

两条光路上分别放置一个蓝色和一个红色的带通滤波片,每条光路上仅有特定波长的光线才能到相应的靶面。由于相机的量子效率曲线在两个滤波片的带通范围内没有任何重叠,因此采集到的彩色图像可以直接分离出不含颜色串扰的红色和蓝色子图像。通过使用常规的 3D-DIC 分析分离的蓝色和红色子图像,即可获得物体表面的三维形貌和变形。

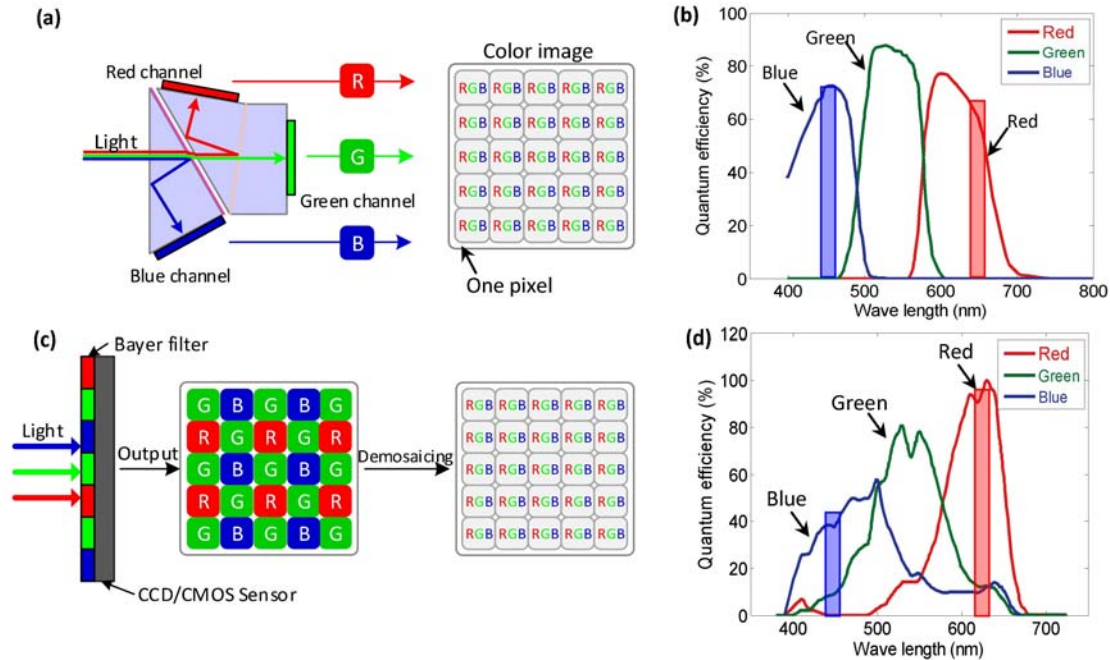


图2 (a)3CCD 彩色相机成像原理;(b)3CCD 彩色相机的量子效率曲线;

(c)普通 CMOS 彩色相机成像原理;(d)普通 CMOS 相机量子效率曲线

Fig. 2 Schematic diagrams of the imaging mechanisms for (a) 3CCD color camera and

(c) conventional CMOS based color camera with their quantum efficiency curves shown in (b) and (d)

虽然采用 3CCD 彩色相机可有效地避免各子图像中的颜色串扰问题,但 3CCD 彩色相机成本高(其价格约为普通 CCD 相机的 4~5 倍甚至更高)、空间分辨率相对较低(通常为 100~200 万像素)且采集帧率较低。而成本较低、分辨率高的普通彩色相机以及动态变形测量所需的高速彩色相机(如 Photron、Phantom 和 IDT 等)都是基于 CMOS 芯片制造的,因此提出一种适用于普通 CMOS 彩色相机的全靶面、单相机三维数字图像相关方法是十分必要的。而实现基于单个 CMOS 彩色相机 3D-DIC 测量的关键就是如何从采集到的彩色图像中提取出无颜色串扰的蓝色和红色子图像。为便于理解,这里简单介绍一下使用普通 CMOS 彩色相机存在的颜色串扰现象。图 2(c)给出了最常见的基于拜耳滤波器的普通彩色相机的成像原理示意图。可以观察到,相机芯片表面覆盖着一系列规律分布的红色、绿色和蓝色滤波片,其中绿色滤波片的数量是红色和蓝色滤波片数量的二倍,这是因为人眼对绿色图像细节的分辨能力比红色和蓝色更高^[26]。因此,当光线通过拜耳滤波器后,每一个像素仅有一个通道的强度值,而缺失的另外两个色彩值则需通过插值来获得(即去马赛克过程)。经过去马赛克后的 CMOS 相机的量子效率曲线如图 2(d)。相机的响应光谱显示,三个通道的光谱响应相互重叠。即使在左右光路分别加上带通滤波片后,其光谱响应仍存在一定的重叠。这直接导致直接分离的蓝色和红色子图像中出现相互影响的颜色串扰,而颜色串扰可能会在立体匹配中引起较大的系统误差,甚至导致匹配失败。因此,消除 CMOS 彩色相机采集到图像中的颜色串扰是实现全靶面三维变形准确测量的关键。

1.2 颜色串扰校正

为消除普通 CMOS 彩色相机中的颜色串扰问题,本文采用了一种简单而有效的颜色串扰校正方法^[27]。该方法主要包括以下两步:颜色标定和图像校正。颜色标定的主要目的是建立每条光路蓝色和红色子图像灰度强度之间的关系。如图 3(a)所示,首先通过屏蔽一条光路来采集一幅蓝色和一幅红色

的彩色标定图像,然后从这两幅彩色标定图像中分别提取出相应的蓝色和红色通道子图像用于颜色标定函数的求解。

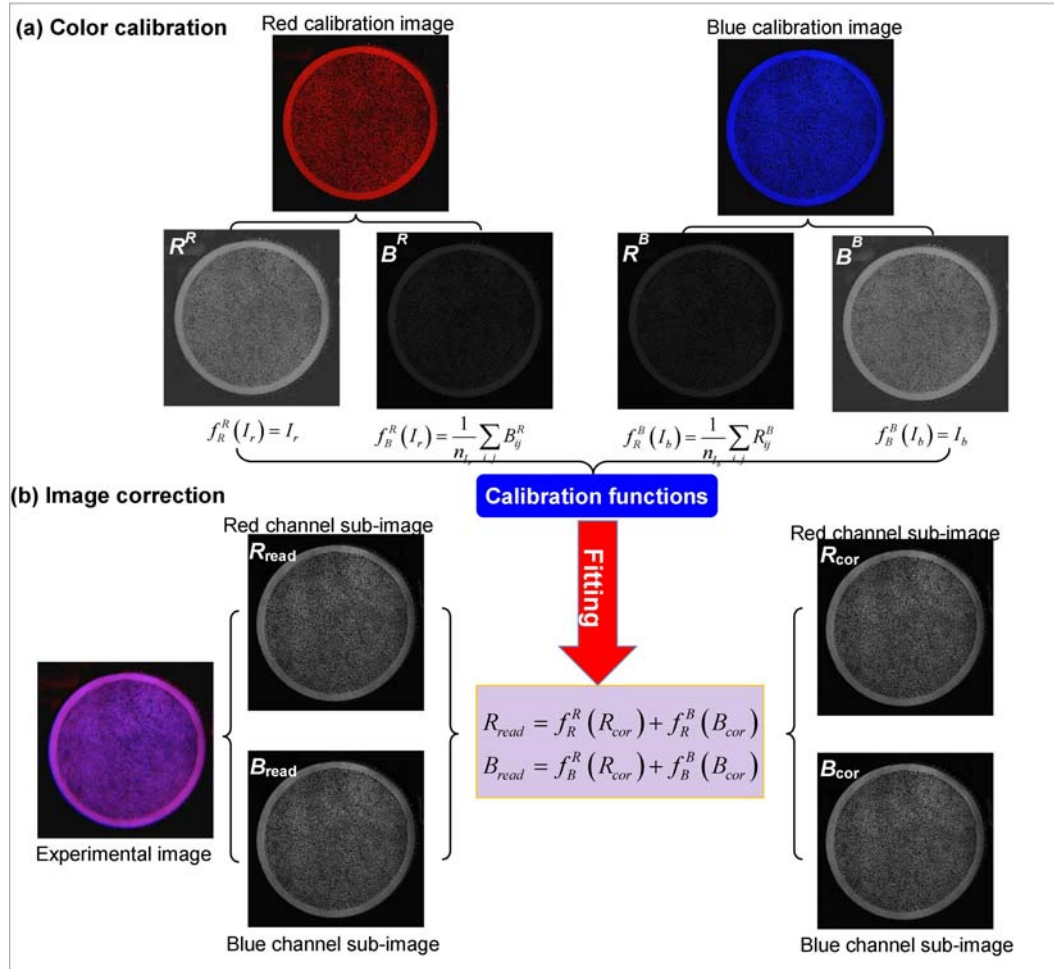


图 3 (a)颜色标定过程;(b)图像校正过程

Fig. 3 The procedures (a) to determine the color calibration functions, and (b) to correct the images with color crosstalk

这里以红色标定图像为例来说明颜色标定函数的求解过程。如图 3(a)所示,红色标定图像的红色和蓝色通道的子图像灰度强度分别表示为 R^R 和 B^R (上标 R 表示红色标定图像)。为了确定颜色标定函数,需要建立 R^R 和 B^R 之间的关系。其中, R^R 通过统计红色标定图像中红色通道子图像的灰度强度分布获得。这里,我们将红色通道子图像中灰度强度为 I_r 的点集表示为

$$\{(i, j) \mid R_{ij}^R = I_r, \quad I_r \in [0, 2^n - 1]\} \quad (1)$$

其中, I_r 和 n 分别为红色通道子图像的灰度强度分布范围和图像的位数; i 和 j 分别表示相应的行列坐标。

理想情况下只有红色波段的光可以到达相机靶面,红色标定图像中蓝色通道子图像的灰度强度应该均为 0。然而实际上,因为颜色串扰的存在,蓝色通道子图像在 (i, j) 位置上的灰度强度值并非为 0。考虑到蓝色通道子图像中相应位置点的灰度强度不一定完全相等,这里取其平均值作为蓝色通道子图像相应的响应灰度强度。通过对红色通道子图像中每一个灰度级重复这个过程,可以建立红色和蓝色通道子图像灰度强度的一一对应关系。

类似地,可以在蓝色标定图像中建立红色(R^B)和蓝色(B^B)通道子图像灰度强度的对应关系。相应的数学关系可以表示为

$$f_R^R(I_r) = \frac{1}{n_{I_r}} \sum_{i,j} R_{ij}^R = I_r, \{(i,j) | R_{ij}^R = I_r\} \quad (2)$$

$$f_B^R(I_r) = \frac{1}{n_{I_r}} \sum_{i,j} B_{ij}^R$$

$$f_R^B(I_b) = \frac{1}{n_{I_b}} \sum_{i,j} R_{ij}^B, \{(i,j) | R_{ij}^B = I_b\} \quad (3)$$

$$f_B^B(I_b) = \frac{1}{n_{I_b}} \sum_{i,j} B_{ij}^B = I_b$$

其中 $f_R^R(I_r)$ 和 $f_B^B(I_b)$ 分别为相应的颜色标定函数; n_{I_r} 和 n_{I_b} 分别是满足 $\{(i,j) | R_{ij}^R = I_r\}$ 和 $\{(i,j) | R_{ij}^B = I_b\}$ 关系的所有点的数量。

需要指出的是,彩色 CMOS 相机的标定函数不仅与相机类型有关,同时也受到光照强度的影响。在确定颜色标定函数之后,可以构造出相应的颜色串扰校正公式。如图 3(b) 所示,对于任意一幅实验图像,直接分离得到的红色和蓝色子图像灰度强度可以表示为

$$R_{read} = f_R^R(R_{cor}) + f_R^B(B_{cor})$$

$$B_{read} = f_B^R(R_{cor}) + f_B^B(B_{cor}) \quad (4)$$

其中, R_{read} 和 B_{read} 分别为未进行颜色串扰校正的红色和蓝色子图像灰度强度; R_{cor} 和 B_{cor} 是校正后的灰度强度。

将公式(2)和(3)代入公式(4)后,通过求解公式(4)可以获得校正后的子图像。然而,公式(2)和(3)中的颜色标定函数均为离散的数据点,不能直接代入公式(4)。因此,采用一阶多项式来拟合这些离散数据,相应的颜色标定函数可以近似表示为

$$f_B^R(R_{cor}) = aR_{cor} + b$$

$$f_R^B(B_{cor}) = cB_{cor} + d \quad (5)$$

其中, a, b, c 和 d 为拟合系数。

将公式(2)、(3)和(5)代入公式(4)后,得到的颜色串扰校正公式可表示为

$$R_{read} = R_{cor} + cB_{cor} + d$$

$$B_{read} = aR_{cor} + B_{cor} + b \quad (6)$$

由于 R_{read} 、 B_{read} 以及拟合系数均为已知值,因此通过求解方程组(6)即可获得无颜色串扰的红色和蓝色通道子图像。

$$R_{cor} = \frac{R_{read} - cB_{read} + bc - d}{1 - ac}$$

$$B_{cor} = \frac{B_{read} - aR_{read} + ad - b}{1 - ac} \quad (7)$$

1.3 测量原理

对于基于 3CCD 彩色相机的全靶面、单相机 3D-DIC 方法,实验图像直接分离得到的红色和蓝色通道子图像即可用于三维形貌和变形测量。如采用普通 CMOS 彩色相机,则需要按 1.2 节的方法对所采集的标定和实验图像进行额外的颜色串扰校正。最后通过采用常规的三维数字图像相关方法分析校正后的红色和蓝色通道子图像即可获得物体表面的三维形貌和变形。

图 4 给出了本文提出方法的三维形貌和变形的测量过程。如图所示,与常规的 3D-DIC 类似,首先采集一组彩色立体标定图像用于标定两个虚拟相机的内部和外部参数。然后,分析实验图像可获得被测物体表面的形貌和三维变形。为了准确地确定三维形貌重建中所需要的视差信息,可采用基于图像子区的相关匹配算法来确定每个测量点在红色和蓝色通道子图像中的位置。如图 4 所示,在初始状态下的蓝色通道子图像中,选择以计算点为中心的长方形子区,在红色通道子图像中搜索目标子区。在相关匹配过程中,采用零均值归一化最小平方和相关函数以及二阶形函数来定量地评估参考子区和目标子区的相似性。然后,利用反向组合一高斯牛顿算法优化相关函数来确定初始状态下该计算点的视差。最后,基于视差、先前标定的虚拟双相机内外参数和三角测量原理,可以获得测试区域参考状态下的三

维空间坐标点云。类似地,变形后测试区的三维空间坐标也可以通过匹配获得。变形前后的三维空间点云数据相减即可获得被测物体表面的三维位移,对三维位移数据进一步进行差分可以计算出全场应变信息。

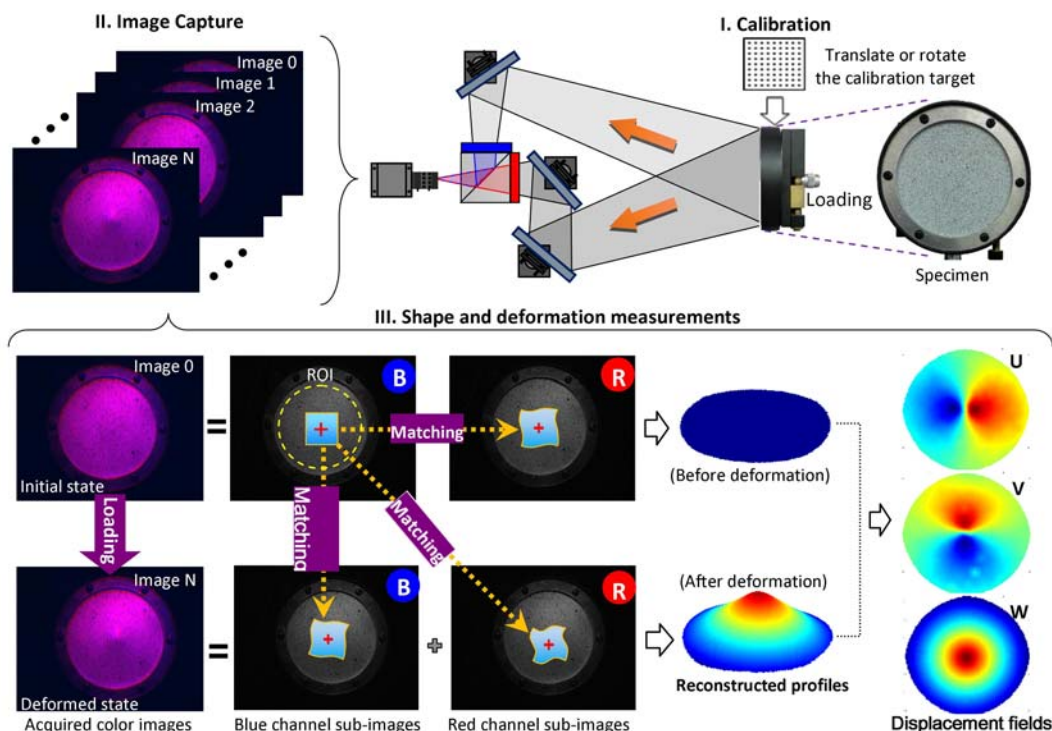


图 4 三维形貌和变形测量过程

Fig. 4 The procedure to measure 3D shape profile and deformation

2 基于单个 3CCD 彩色相机的三维形貌、位移和变形测量

2.1 实验

为了验证基于 3CCD 相机的全靶面、单相机 3D-DIC 方法的有效性和测量精度,本文进行了包括圆柱面的形貌测量、平移平板的面内和离面位移测量和塑料圆板中心加载下的三维变形测量等一系列实验。如图 5 所示,测量系统主要由一个分光棱镜、一个蓝色滤波片(中心波长 $450 \pm 2\text{nm}$,半带宽 30nm)、一个红色滤波片(中心波长 $630 \pm 2\text{nm}$,半带宽 30nm)、三块平面反射镜、一个分辨率为 1392×1040 像素的 3CCD 相机(相机型号:AT-140CL)以及一个焦距为 25mm 的定焦镜头(镜头型号:LM25NC3)组成。验证实验中所用的圆柱体的直径为 65.8mm 、平板尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 、塑料圆板的直径为 100mm ,实验前,在这些试件表面都制作了黑白散斑。在系统调节完毕后,对测量系统进行立体标定,并记录了 15 幅彩色的立体标定图像。

在实验过程中,首先对圆柱体的三维形貌进行了测量,并记录了一幅数字图像。然后,采用一个平移精度为 $10\mu\text{m}$ 的双向平移台进行了平板的面内和离面平移实验。实验时,平板固定在平移台上,并先后沿着 X 轴和 Z 轴以每次 0.5mm 的平移量平移 -2.5mm 到 2.5mm 。每次平移采集一幅图像用于三维位移测量。最后,将制作好散斑的塑料薄板固定在图 5 所示装置上,通过背后的压头在薄板中央施加离面载荷,并用本文搭建系统在加载前后各采集一幅图像用于三维变形测量。

2.2 圆柱体形貌测量

图 6(a)是由 3CCD 相机采集的圆柱体试样表面图像,其相应的蓝色和红色通道子图像分别显示在图 6(b)和(c)中。如图 6 所示,在蓝色通道图像上选取一块矩形区域作为测量区域,并通过在红色通道子图像中搜索对应点来确定测量区域内每一个计算点的视差。然后,基于已标定的相机内部和外部参数以及三角测量原理,得到了测量区域内一共 3760 个点的三维形貌数据。图 6(d)和(e)分别给出了测

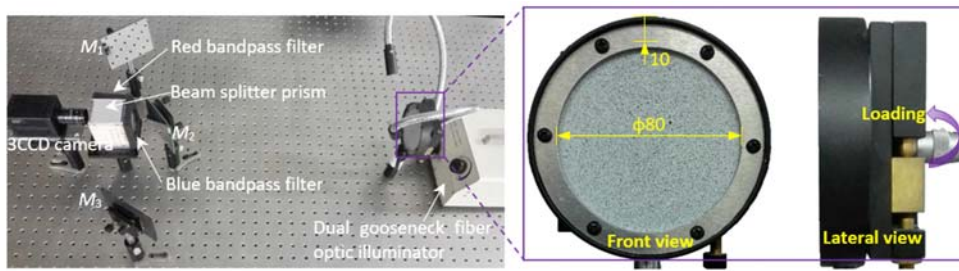


图5 本文搭建的单相机三维数字图像相关测量系统用于中心加载的塑料薄板的三维变形测量

Fig.5 Photograph of the established single-camera stereo-DIC system for 3D deformation measurements of a centrally loaded circular plastic plate

量区域内的三维形貌重建图和沿直线 AB 的轮廓图。可以发现,重建的三维形貌是一个完美的圆柱面,而且沿 AB 分布的轮廓线也基本与其拟合曲线完全重合。最后,为验证系统的测量精度,通过对重建的三维形貌进行拟合^[28],得到圆柱面的拟合直径为 65.34mm。与游标卡尺测量的实际直径相比(65.80mm),相对误差为 0.7%,从而验证了本文方法在形貌测量上的测试精度。

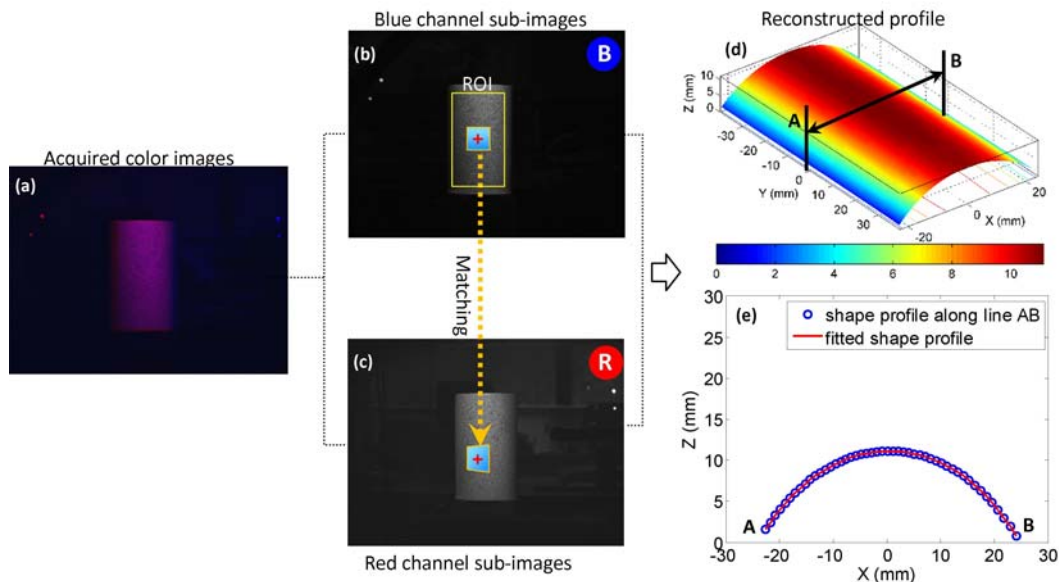


图6 (a)直接采集到的试样表面图像,(b)和(c)分别为相应的蓝色和红色通道子图像;

(d)和(e)分别是重建的三维形貌和沿 AB 的轮廓

Fig.6 (a) The captured color image of the cylinder surface with the blue and red channel images extracted in (b) and (c), respectively, and reconstructed profile of the cylinder surface;

(d) contour plot imposed on the reference image, (e) profile along line AB

2.3 平板的面内和离面位移测量

通过分析面内和离面平移实验记录的彩色图像,可以获得测量区域内全场三维位移。在计算过程中,首先选择一个矩形区域作为计算区域,然后采用相同的处理方法对所采集的平移图像进行分析,获得每次平移后的全场三维位移。对于每次平移,取所有测量点位移的平均值作为测得位移,并与实际施加的位移进行比较。由于平移过程中没有任何外力干扰,因此每次测得平移量应该几乎相等。图 7(a)和(b)显示了面内和离面平移实验测得三维位移与施加位移之间的关系。如图所示,测得面内平移实验的 X 方向和离面平移实验的 Z 方向的平移几乎与施加位移一致,而其他两个方向上的位移几乎为 0。通过从测得的全场位移中减去实际施加的位移,可以得到全场测量误差、误差的平均值和标准差。统计数据显示,平均位移误差基本都小于 $40\mu\text{m}$,且 Z 方向的位移场标准差都大于 X 方向和 Y 方向的标准差。需要指出的是,Z 方向较大的标准差是由系统的结构参数决定的,如虚拟基线、虚拟相机之间的相对转角^[16,29]。

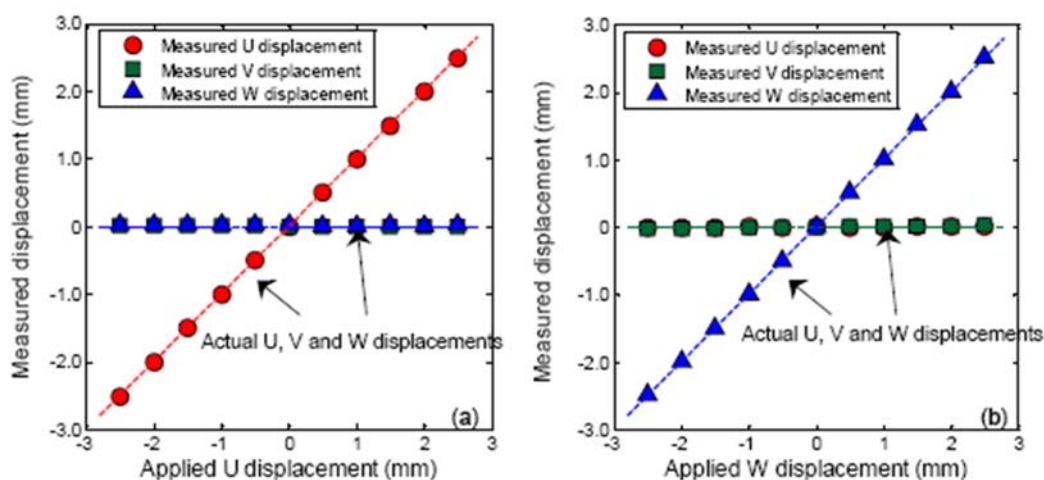


图 7 (a)面内平移实验和(b)离面平移实验中测得 U、V 和 W 位移与施加位移之间的关系

Fig. 7 Measured U, V and W displacements as a function of the applied displacements for (a) in-plane translation tests along the X direction and (b) out-of-plane translation tests along the Z direction

2.4 塑料薄板受压下的三维变形测量

类似地,通过分析塑料薄板变形前后的彩色图像可以获得离面载荷引起的三维变形。图 8 显示了塑料薄板在中心受压下的全场三维 U、V 和 W 位移。可以观察到,位移场 U 和 V 分别以 y 轴和 x 轴为对称轴对称分布,且对称轴上的水平或竖直位移几乎为 0。而 Z 方向位移场 W 显示了一个完美的同心圆分布,这种分布与预期分布基本一致。此外, W 方向测得最大位移为 6.56mm,与施加的 6.50mm 位移基本相等。简而言之,上述结果验证了本文方法在实际三维变形测量中的有效性。

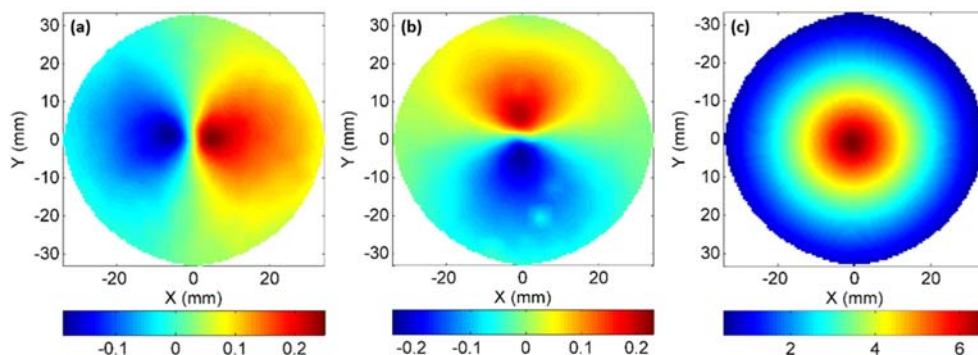


图 8 塑料薄板在垂直于试样表面的载荷作用下的三维变形场:(a)U;(b)V;(c)W

Fig. 8 3D deformation measurements of a circular plastic plate subjected to a central load normal to the specimen surface: (a) U, (b) V, and (c) W

3 基于单个 CMOS 彩色高速相机的三维动态变形测量

3.1 实验

为了验证基于彩色 CMOS 高速相机的 3D-DIC 方法在三维动态变形测量中的可行性,本文搭建了一个彩色 CMOS 高速相机的三维变形测量系统,并采用该系统测量了双面鼓在背后敲击下前表面的振动响应。搭建的测量系统与前文实验基本一致。不同的是,这里采用了一个彩色 CMOS 高速相机(相机型号:Y3C,Integrated Design Tools, Inc)。如图 9(a)所示,双面鼓的测试面已在实验前用黑色马克笔制作好散斑,并固定在隔振台上。由于本文采用的高速相机对红光更为敏感,因此在白光照明下红蓝通道的子图像光强差异较大。为保证两个通道子图像亮度相近,本文采用一个额外的蓝色光源作为补光。实验时,首先采集一幅蓝色和红色的颜色标定图像用于颜色串扰校正,随后采集一组双目立体标定图像用于两个虚拟相机的立体标定。实验时,用木制鼓槌敲击双面鼓背面,成像系统同时以 1000 帧/

秒的采集速率和 1024×1024 像素的分辨率记录下双面鼓在敲击下的前表面图像。实验过程中一共记录了 1000 幅彩色振动图像。此外,为了估计系统的测量稳定性,我们采集了 1000 幅双面鼓静止时的彩色图像用于后续分析。

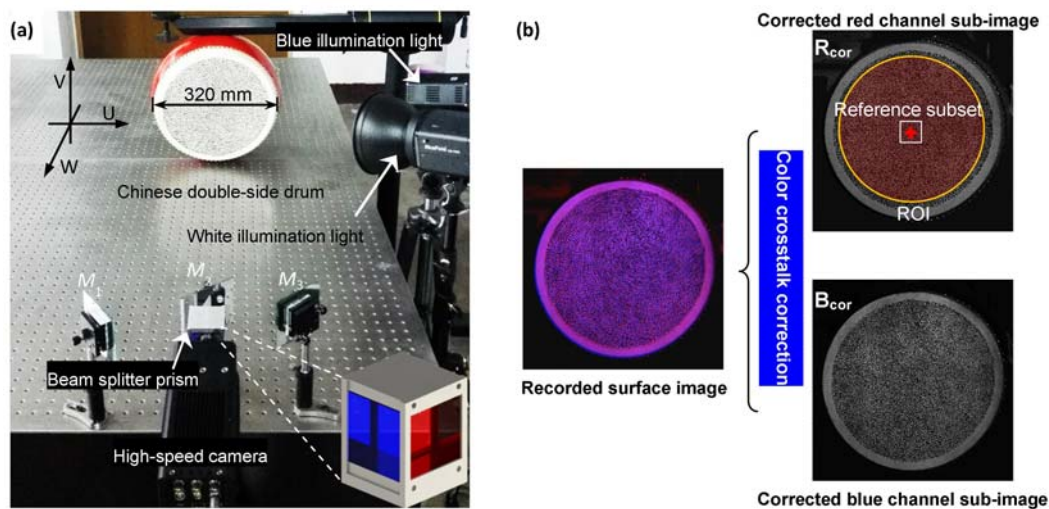


图9 (a)用于双面鼓三维变形测量的实验设备;(b)一幅由彩色 CMOS 高速相机记录的彩色图像及校正后的红色和蓝色通道子图像

Fig. 9 (a) Experimental set-up for 3D full-field vibration measurements of a Chinese double-side drum;

(b) a recorded surface image of the drum and the corresponding corrected red and blue channel sub-images

通过采用前文介绍的方法分析以上彩色图像,可以获得双面鼓测试面在敲击下的振动响应。图 9(b)是系统采集到的一幅实验图像。可以看到,两个通道的子图像几乎重叠在一起,显示为粉色(红色和蓝色复合色)的图像。在经过颜色串扰校正后,红色和蓝色通道子图像如图 9(b)所示。计算时,选择鼓面中央圆形区域作为计算区域,对其 3D 变形进行分析。

3.2 实验结果

如前所述,实验时采集了 1000 幅静态图像用于估计系统的测量稳定性。由于没有任何外部载荷作用,理论上三个方向的位移应该为 0,而实际测得的位移即可认为是系统的测量误差。图 10 分别给出了 1000 幅连续图像三个方向上测得位移的平均值和标准差。可以发现,三个方向上的位移误差均小于 $5 \mu\text{m}$ 且在 0 值上下波动,而 W 位移场的标准差远大于其他两个方向上位移场的标准差。标准差的巨大差异是由测量系统的结构参数决定的。当然,如调整平面镜的位置增加虚拟相机的基线长度,W 位移场的标准差将会降低。

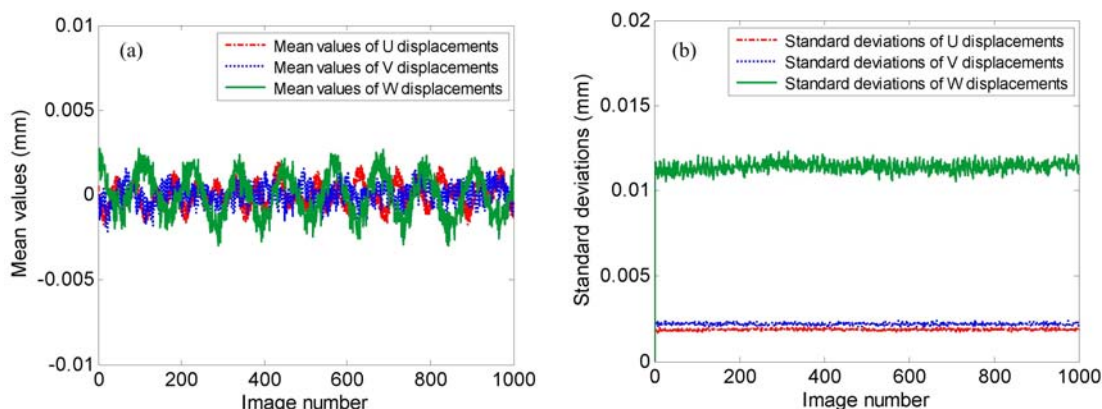


图10 由 1000 幅连续采集的静态图像分析得到的 U,V 和 W 位移的(a)平均值和(b)标准差

Fig. 10 (a) Mean values and (b) standard deviation errors of the measured U, V and W displacements for the 1000 continuously recorded static images

图 11 显示了不同时刻双面鼓在鼓槌敲击下的 W 位移场(即双面鼓前表面的振动响应)。为了便于对比,所有图像的颜色显示范围都设为相同。可以清晰地从这些振动响应图中观察到,双面鼓前表面在共振作用下呈现周期性鼓起或凹下。这与鼓面的 $(0,1)$ 阶振动模态基本一致。

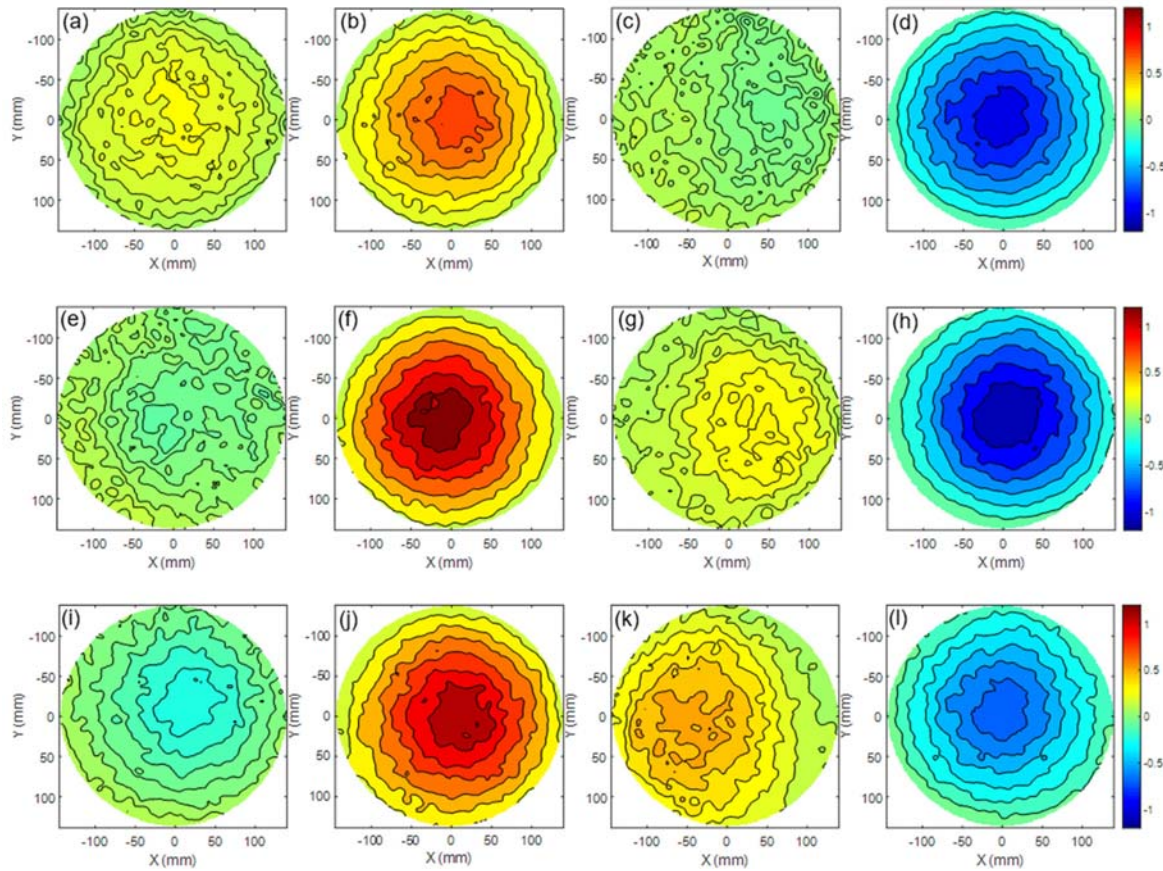


图 11 不同时刻测得双面鼓在敲击下的全场 W 位移: (a) 682ms; (b) 683ms; (c) 684ms; (d) 685ms; (e) 686ms; (f) 687ms; (g) 688ms; (h) 689ms; (i) 690ms; (j) 691ms; (k) 692ms; (l) 693ms

Fig. 11 Measured full-field W displacements (i. e. vibration responses) on the surface of the Chinese double-side drum under the excitation of a drumstick at different time: (a) 682ms; (b) 683ms; (c) 684ms; (d) 685ms; (e) 686ms; (f) 687ms; (g) 688ms; (h) 689ms; (i) 690ms; (j) 691ms; (k) 692ms; (l) 693ms

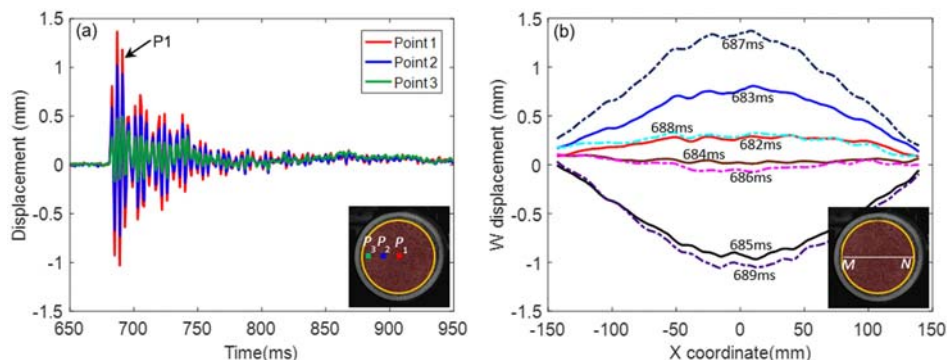


图 12 (a)选取的三个点从 650ms 到 950ms 的 W 位移—时间曲线;(b)682ms 到 689ms 沿直线 MN 的 W 位移分布

Fig. 12 (a) W displacement histories of three points on the drum from 650ms to 950ms;

(b) W displacement distributions along line MN from 682 ms to 689 ms

为了直观地显示双面鼓的振动响应,在测量区域内选择了三个测量点(P1 点在圆板中心,P3 在圆板边缘,P2 在这两个点之间)并提取了这三个点不同时刻的 W 位移,如图 12(a)所示。可以发现,P1 点的振幅最大,P2 点次之,P3 点最小,且随着能量的耗散,这三个点的振动显著地减小。通过用 FFT 处

理这些位移—时间信号,可以获得双面鼓的一阶自然频率,约为214.8 Hz。此外,图12(b)显示了测试区域沿直线MN的振动响应。这些抛物线形的曲线表明(0,1)阶变形在振动中占主导。

4 结论

本文提出了一种基于彩色相机和颜色分光光路的全靶面、单相机3D-DIC方法,与已有的基于衍射光栅、双棱镜以及组合式平面镜的单相机3D-DIC方法相比,本文提出的方法允许左右两条光路不同颜色的图像相互重叠,因此可充分利用彩色相机的图像分辨率,实现全靶面全场三维形貌和变形测量。该单彩色相机3D-DIC方法的有效性和准确性通过圆柱体形貌测量、刚体平移、静态和动态三维变形测量实验获得了良好的验证。由于可避免双相机同步,且能实现无分辨率损失的全靶面测量,本文方法在需要实现高速瞬态位移和变形测量的爆炸、冲击、振动等领域中具有广阔重要的应用前景。

参考文献:

- [1] 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(2):123—132.
- [2] Garcia D, Orteu J J, Penazzi L. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 125:736—742.
- [3] Sutton M A, Yan J, Deng X, et al. Three-dimensional digital image correlation to quantify deformation and crack-opening displacement in ductile aluminum under mixed-mode I/III loading[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5): 051003-051003-17.
- [4] Pan B, Xie H M, Yang L H, et al. Measurement of carbon fiber composite satellite antenna surface using three-dimensional digital image correlation method[J]. *Strain*, 2009, 45(2):194—200.
- [5] Berke R B, Sebastian C M, Chona R, et al. High temperature vibratory response of hastelloy-X: stereo-DIC measurements and image decomposition analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(2):231—243.
- [6] Pan B, Wu D F, Yu L P. Optimization of a three-dimensional digital image correlation system for deformation measurements in extreme environments[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19):4409—4419.
- [7] Zhu J, Li Y, Ye S. Design and calibration of a single-camera-based stereo vision sensor[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8):083001-083001-6.
- [8] Wang R, Li X, Zhang Y. Analysis and optimization of the stereo-system with a four-mirror adapter[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 2008, 3:08033.
- [9] Xue T, Qu L, Cao Z, et al. Three-dimensional feature parameters measurement of bubbles in gas-liquid two-phase flow based on virtual stereo vision[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 27:29—36.
- [10] Lim K B, Xiao Y. Virtual stereovision system: new understanding on single-lens stereovision using a biprism[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(4):043020-043020-11.
- [11] Cui X, Lim K B, Guo Q, et al. Accurate geometrical optics model for single-lens stereovision system using a prism[J]. *JOSA A*, 2012, 29(9):1828—1837.
- [12] Trivi M, Rabal H J. Stereoscopic uses of diffraction gratings[J]. *Applied optics*, 1988, 27(6):1007—1009.
- [13] Henao R, Medina F, Rabal H J, et al. Three-dimensional speckle measurements with a diffraction grating[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(5):726—729.
- [14] Pankow M, Justusson B, Waas A M. Three-dimensional digital image correlation technique using single high-speed camera for measuring large out-of-plane displacements at high framing rates[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(17):3418—3427.
- [15] Yu L P, Pan B. Single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror adapter: optimized design and validation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87:120—128.
- [16] Yu L P, Pan B. Structure parameter analysis and uncertainty evaluation for single-camera stereo-digital image correlation with a four-mirror adapter[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25):6936—6946.
- [17] 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.
- [18] Yu L, Pan B. Single-camera high-speed stereo-digital image correlation for full-field vibration measurement[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 94:374–383.
- [19] Genovese K, Casaletto L, Rayas J A, et al. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3):278–285.
- [20] Wu L F, Zhu J G, Xie H M, et al. An accurate method for shape retrieval and displacement measurement using Bi-prism-based single lens 3D digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(9):1611–1624.
- [21] Xia S, Gdoutou A, Ravichandran G. Diffraction assisted image correlation: a novel method for measuring three-dimensional deformation using two-dimensional digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(5):755–765.
- [22] Pan B, Wang Q. Single-camera microscopic stereo digital image correlation using a diffraction grating[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21):25056–25068.
- [23] Pan Z, Xia S, Gdoutou A, et al. Diffraction-assisted image correlation for three-dimensional surface profiling[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1):155–165.
- [24] Pan B, Ma L J, Xia Y. A novel technique for measuring 3D deformation of adhesively bonded single lap joint[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59(1):1–8.
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Three-CCD_camera.
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter.
- [27] Zhong Y W, Qi G, Jinjun W. A triple-exposure color PIV technique for pressure reconstruction[J]. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, 2017, 60(1):1–15.
- [28] Luo P F, Chen J N. Measurement of curved-surface deformation in cylindrical coordinates[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4):345–350.
- [29] Ke X D, Schreier H W, Sutton M A, et al. Error assessment in stereo-based deformation measurements[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(4):423–441.

Single-Camera Three-Dimensional Digital Image Correlation using a Single Color Camera

YU Li-ping, PAN Bing

(Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper presents a novel full-frame, single-camera three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) using a single color camera. With the aid of a skillfully designed color separation optical path, the surface image of the test object can arrive at the camera sensor through two different optical paths. The recorded color images of the calibration target and test object are then separated into blue and red channel sub-images. By processing these sub-images using the regular stereo-DIC algorithm, full-field 3D shape and deformation on the object surface can be retrieved. The effectiveness and accuracy of the proposed technique are demonstrated by the experiments of shape, in-plane and out-of-plane translation, and static and dynamic deformation measurement. Due to the avoidance of the complicated camera synchronization and the realization of full-field 3D shape and deformation measurement without the loss of its spatial resolution, the proposed technique demonstrates great potentials in the fields of explosive, impact and vibration, in which full-field transient displacement and deformation measurements are required.

Keywords: single-camera stereo-DIC method; color camera; dynamic deformation measurement