

# 使用双远心镜头的高精度二维数字图像 相关测量系统

潘 兵 俞立平 吴大方

(北京航空航天大学航空科学与工程学院固体力学研究所, 北京 100191)

**摘要** 通过比较变形前后同一平面物体表面的两幅数字图像, 二维数字图像相关方法可获得亚像素精度的像面位移(以像素为单位)和应变。但在实际测量中, 变形物体表面的离面位移、相机传感器平面位置的微小改变以及镜头的成像畸变, 都会使原先假设的物、像面位移间的线性对应关系不再严格成立, 在某些情况下会引起不能忽略的测量误差。详细分析了被测物体的离面位移、相机自热和镜头畸变对二维数字图像相关方法位移和应变测量结果的影响。通过实验研究了 3 种典型的成像镜头(标准成像镜头、物方远心成像镜头和双远心成像镜头)对以上不利因素的抗干扰能力。实验显示高质量的双远心镜头不仅对被测物体表面的离面位移和相机自热不敏感, 并且镜头畸变也小到可以忽略不计的程度, 因此该镜头是高精度二维数字图像相关测量中的关键光学元件。

**关键词** 测量; 数字图像相关方法; 离面位移; 镜头畸变; 双远心镜头

中图分类号 O348.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0412004

## High-Accuracy Two-Dimensional Digital Image Correlation Measurement System Using a Bilateral Telecentric Lens

Pan Bing Yu Liping Wu Dafang

(*Institute of Solid Mechanics, School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*)

**Abstract** By comparing the two images recorded in different configurations on the same object surface, two-dimensional digital image correlation (2D-DIC) method produces full-field displacement with sub-pixel accuracy and full-field strains in the recorded images. In a practical measurement, however, various deteriorative factors, such as small out-of-plane motion of the test object surface, small out-of-plane motion of the sensor target and geometric distortion of the imaging lens may seriously impair the originally assumed linear correspondence between images displacement and object motions. In certain cases, these disadvantages may lead to significant errors in measuring displacements and strains. The measurement errors of 2D-DIC due to the above three unavoidable deteriorative factors are first described briefly. Then, the performances of three typical imaging lenses, including a standard lens, an object-side telecentric lens and a bilateral telecentric lens, against these three deteriorative factors are investigated experimentally using easy-to-implement static, out-of-plane and in-plane rigid body translation tests. A detailed examination reveals that a high-quality bilateral telecentric lens is not only insensitive to out-of-plane motions of the test object and the self-heating of a camera being used, but also demonstrates negligible lens distortion. So the bilateral lens is highly recommended for high accuracy 2D-DIC measurement.

**Key words** measurement; digital image correlation; out-of-plane motion; lens distortion; bilateral telecentric lens

**OCIS codes** 120.3490; 100.2000

收稿日期: 2012-11-13; 收到修改稿日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11272032, 11172026, 11002012, 91216301)、教育部新世纪优秀人才计划、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20101102120015)、中国航天科技集团公司航天科技创新基金(CASC201101)、航空科学基金(2011ZD51043)和人事部留学人员科技活动项目择优资助项目资助课题。

作者简介: 潘 兵(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事实验力学方法基础理论及其应用等方面的研究。

E-mail: panb@buaa.edu.cn

# 1 引言

由于具有测量设备和测量过程简单、适用测量范围极其广泛(从小变形到超大变形、从微尺度到宏观尺度、从常规金属材料到复合材料、从实验室到室外甚至极端高温环境)、全场测量及测量精度高等突出优点,使用光学镜头和单相机的二维数字图像相关方法(2D-DIC)<sup>[1,2]</sup>已在实验力学领域被广泛用于各种材料和结构表面的面内位移和应变测量。在测量过程中,安装了成像镜头的数字相机放置在被测物体的正前方,并尽可能使镜头光轴与被测平面试样表面垂直,记录不同状态下试样表面的散斑图像。用基于灰度相似原理的模板匹配算法,可跟踪“参考图像”中各感兴趣点在“变形后图像”中亚像素精度的像面位移和全场应变,所获得的像面位移和应变可进一步转换为物体表面的真实变形。

在二维数字图像相关测量中绝大多数文献都采用简单的针孔成像模型描述像面位移和物面位移之间的对应关系,即认为利用数字图像相关方法获得的图像位移( $u, v$ )与真实位移( $U, V$ )之间存在着简单的线性对应关系: $u = MU, v = MV$ ,这里  $M$ (等于针孔成像模型的像距  $L$  与物距  $Z$  之比)为成像系统的放大倍数。虽然物面、像面位移间的这种简单的线性比例关系已被广泛地使用,但在实际测量中,由于各种不利因素的存在,这种理想的线性对应关系并不严格成立或在变形后发生不同程度的改变。

首先,由于实际被测平面与相机传感器平面(像面)之间不会严格平行<sup>[3]</sup>、加载方向也会与像面存在一定偏差、被测材料会发生泊松效应等各种因素的存在,试样加载过程中其表面各点将不可避免地出现或多或少的离面位移<sup>[4]</sup>。离面位移会改变针孔成像模型的物距  $Z$ ,导致像面图像放大倍数的改变,从而引起额外的压缩或拉伸虚应变。其次,相机通电后产生的自热或测量过程中环境温度的变化会使其内部机械支撑部件产生热变形,从而使相机传感器的位置发生微小改变,进而改变针孔成像模型中的像距  $L$ 。近期研究显示一般商业相机自热会在记录图像中引起约  $200 \mu\epsilon$  的虚应变<sup>[5]</sup>。此外,由于光学透镜固有的像差、加工误差和镜片装配误差等原因,任何镜头都或多或少地存在畸变。镜头畸变会使实际像点偏离其理想位置,并引起额外的位移和应变测量误差。由于镜头畸变具有非均匀分布特性,因此由其引起的位移和应变测量误差也是非均匀分布的<sup>[6]</sup>。

使用普通镜头的二维数字图像相关测量系统对物距、像距的微小改变非常敏感,某些镜头还存在较大的、不可忽略的畸变,因此会引起较大的位移和应变测量误差。客观地说,要准确测量材料在弹性范围内的小变形,以上这些不利因素所引起的测量误差往往是不可忽略的。如何避免或消除以上 3 种不利因素引起的测量误差以获得高精度的变形测量结果是数字图像相关方法研究人员和使用者最为关心的问题。

基于这一目的,本文分析了二维数字图像相关测量中由被测物体的离面位移、相机自热和镜头畸变引起的测量误差。使用高质量的双远心镜头建立了高精度二维数字图像相关测量系统,并通过实际实验仔细研究了使用 3 种不同镜头(标像镜头、物方远心镜头和双远心镜头)的二维数字图像相关测量系统在 3 种不利因素出现情况下的位移和应变测量结果。实验结果显示高质量的双远心镜头不仅对被测物体表面的离面位移和相机自热不敏感,并且镜头畸变也非常小,因此是高精度二维数字图像相关测量中必不可少的光学元件。

## 2 二维数字图像相关方法及其误差分析

### 2.1 二维数字图像相关方法简介

图 1 为二维数字图像相关方法测量系统示意图以及一幅典型的散斑图。被测平面物体表面需具有随机的灰度分布(通常称为散斑场),该散斑场作为变形信息载体随试样表面一起变形。实验过程中,不同加载条件下被测物体表面的散斑图由放置在被测物体正前方的数字相机采集并存入计算机,随后用数字图像相关方法分析可提取像面位移和应变信息,所获得的像面变形可进一步转换为物体表面的真实变形。

成像镜头是二维数字图像相关测量系统中最重要的重要组成部分,其作用是将变形前后被测平面物体表面的散斑图案成像到相机传感器平面上以获得数字图像。有关二维数字图像相关方法的文献多用简单的针孔成像模型定量地描述像点坐标( $x, y$ )和物点坐标( $X, Y$ )的对应关系,认为变形前后的物距和像距为常数,而且不考虑成像镜头的畸变。在这种理想条件下,由数字图像相关方法获得的像面位移 $[u(x, y), v(x, y)]$ 显然与物体表面的位移 $[U(X, Y), V(X, Y)]$ 呈线性比例关系,即  $u(x, y) = MU(X, Y), v(x, y) = MV(X, Y)$ 。

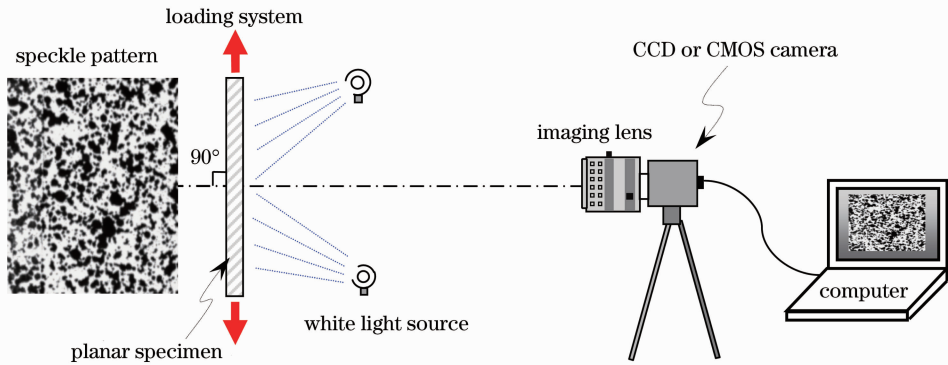


图 1 二维数字图像相关方法测量系统示意图及一幅典型的散斑图  
Fig.1 Measuring system of 2D-DIC and a typical speckle pattern

## 2.2 由离面位移、相机自热以及镜头畸变引起的测量误差分析

尽管在众多文献中,物面、像面位移的线性比例关系被广泛地使用,但在实际的位移、应变测量中,由于以下各种不利因素的存在,这种理想的线性对应关系并不严格成立,在某些情况下会引起不可忽略的较大测量误差。首先,由于实际被测物面和相机传感器平面(像面)之间不会严格平行、加载方向也与像面存在不同程度的偏差、被测材料会产生泊松效应等各种因素的存在,试样加载过程中其表面各点将不可避免地出现或多或少的离面位移。离面位移会改变物距,如果物距减小,会使图像放大;反之,图像缩小。因此,离面位移即意味着图像中会出

现拉伸或压缩正应变。

图 2 显示了物距为  $Z$  的平面试样出现了刚体离面位移  $\Delta Z$ (假设物体移向成像镜头的离面位移  $\Delta Z$  为正),可见高度为  $Y$  的物点在像平面中的高度由  $y$  变成  $y'$ 。由简单的推导可知,对坐标  $(X, Y)$  的物点,刚体离面位移引起的面内位移和正应变分别为

$$\begin{cases} u(\Delta Z) \approx \frac{L}{Z} X \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \\ v(\Delta Z) \approx \frac{L}{Z} Y \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \\ \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} \approx -\frac{\Delta Z}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

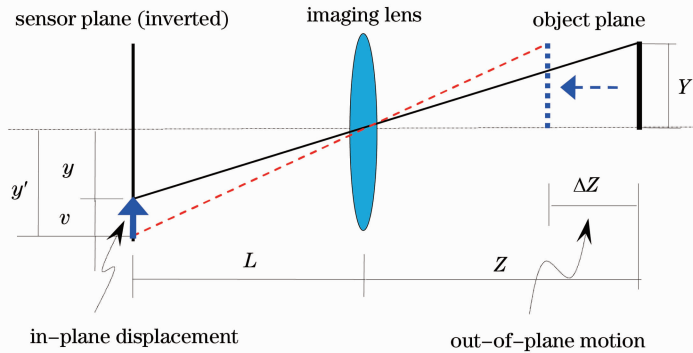


图 2 物体的离面位移会在像平面产生附加的面内位移

Fig. 2 Out-of-plane motion of the test object produces in-plane sensor plane displacement

显然,当物体表面靠近相机时,刚体离面位移将带来双向拉伸虚应变;当物体远离相机时,刚体离面位移将带来双向压缩虚应变,并且虚应变在数值上随着离面位移量  $\Delta Z$  的增加而增大。如果被测物体产生了非均匀的离面位移(如加载过程中出现了离面转动或试样局部出现了颈缩),则在像面产生非均匀分布的虚应变。为减小离面位移对二维数字图像相关方法的影响,可使成像系统尽可能远离被测物体,

即通过增加物距  $Z$  来减小离面位移  $\Delta Z$  的影响。

其次,相机作为一种电子器件,在通电后其内部的电子元器件会因电阻发热效应产生热量,使相机内部温度升高,即所谓的“相机自热”。最近 Ma 等<sup>[5]</sup>对 6 种不同型号相机的测试显示,相机自热会在通电后的 1.5 h 后产生约  $10^\circ\text{C}$  的温升,随后进入较稳定的热平衡阶段。相机自热(或测量过程中环境温度的变化)会使相机内部的支撑机械元件产生

热变形(如图 3 所示),导致相机传感器位置(像距  $L$ )出现微小改变,从而改变原来的线性对应关系,在像平面引起  $100\sim 250\ \mu\text{e}$  的虚应变。为减小相机自热的影响,文献[5]中建议在相机达到热平衡后再使用。

最后,由于光学透镜固有的像差、加工误差和镜片装配误差等原因,任何成像镜头都或多或少地存在畸变。镜头畸变会使实际像点偏离其理想位置,并引起额外的位移测量误差。由于应变场是通过位移场差分获得,因此由畸变引起的应变误差将更为明显。图 4 显示镜头畸变的存在对数字图像相关方法位移测量结果的影响,图中  $(C_x, C_y)$  为假想的畸变中心;  $(x_u, y_u)$ 、 $(x_d, y_d)$  分别为无畸变和畸变

的像点坐标;  $\delta_r$  为径向畸变,  $\delta_t$  为切向畸变。图 4 中的插图显示,由于径向畸变的存在,实际测量获得的位移矢量  $\mathbf{d}_m$  与真实位移矢量  $\mathbf{d}_a$  存在一定的偏差。

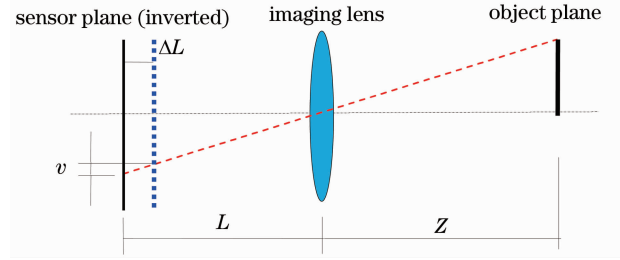


图 3 相机自热对像面位移的影响

Fig. 3 Effect of the self-heating of a camera on in-plane sensor plane displacement

文献[6]显示,径向畸变在参考图像中某点引起

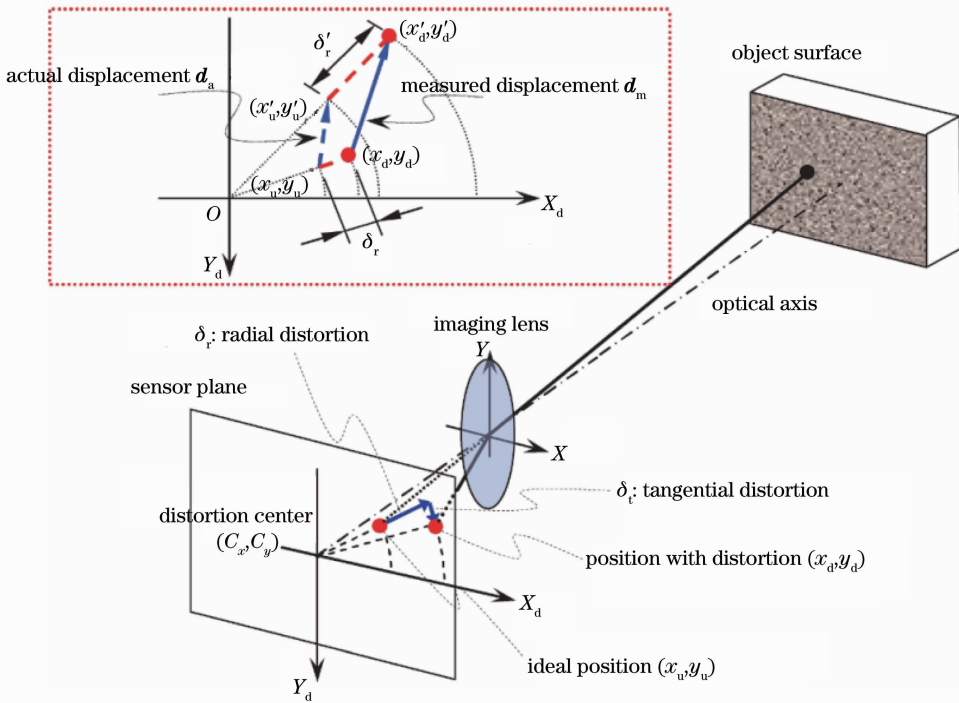


图 4 考虑镜头畸变的针孔成像模型

Fig. 4 Schematic figure of the pinhole camera model considering the influence of lens distortion

的位移测量误差  $(\Delta u, \Delta v)$  与径向畸变系数  $k_1$ 、该点的图像坐标  $(x_d, y_d)$  和该点由数字图像相关方法直接计算获得的畸变位移  $(u', v')$  有关:

$$\begin{cases} \Delta u(x_d, y_d) = -k_1(3x_d^2 u' + 3x_d u'^2 + 2x_d y_d v' + x_d v'^2 + u'^3 + y_d^2 u' + 2y_d u' v' + u' v'^2) \\ \Delta v(x_d, y_d) = -k_1(3y_d^2 v' + 3y_d v'^2 + 2x_d y_d u' + y_d u'^2 + v'^3 + x_d^2 v' + 2x_d u' v' + u'^2 v') \end{cases} \quad (2)$$

推导显示,由径向畸变引起的应变测量误差  $(\Delta \epsilon_x, \Delta \epsilon_y, \Delta \gamma_{xy})$  也与以上 3 个参数有关,即

$$\begin{cases} \Delta \epsilon_x = \frac{\partial(\Delta u)}{\partial x_d} = -k_1(6x_d u' + 3u'^2 + 2y_d v' + v'^2) \\ \Delta \epsilon_y = \frac{\partial(\Delta v)}{\partial y_d} = -k_1(2x_d u' + u'^2 + 6y_d v' + 3v'^2) \\ \Delta \gamma_{xy} = \frac{\partial(\Delta u)}{\partial y_d} + \frac{\partial(\Delta v)}{\partial x_d} = -4k_1(x_d v' + y_d u' + u' v') \end{cases} \quad (3)$$

为了保证数字图像相关测量结果的准确性，必须要研究成像镜头的畸变程度。不同研究人员也提出不同的畸变校正方法，有兴趣的读者可参考文献[6~10]。

### 3 双远心镜头原理简介

在机器视觉领域，特殊设计的远心镜头常用来避免传统镜头的透视畸变。在物方远心镜头中，孔径光阑被放置在镜头像方的焦平面上，仅使与光轴平行的光线通过焦平面上的孔径光阑在相机靶面成像[见图 5(a)]，因此所有的光线可看作来自无穷远处。这种特殊的平行光路设计使其可以在一定的物距(远心深度)范围内，使得到的图像放大倍率不会

随物距的变化而变化。在图 5(b)像方远心镜头中，孔径光阑被放置在镜头物方焦平面上，使像方主光线平行于光轴。因此像方远心镜头对相机图像传感器(像平面)位置的微小变化不敏感，即像距的改变不会影响图像的大小。图 5(c)所示的双远心镜头综合了物方远心镜头和像方远心镜头的优点，对在其远心深度内变化的物距和像距变化均不敏感<sup>[11]</sup>。将双远心镜头用在二维数字图像相关测量系统中，其对物距和像距变化均不敏感的优点将有助于在被测物体变形前后获得放大倍数恒定的图像，对因加载出现的离面位移和因相机自热或环境温度变化引起的靶面位置的微小移动不敏感，从而有助于实现高精度的面内位移和应变测量。

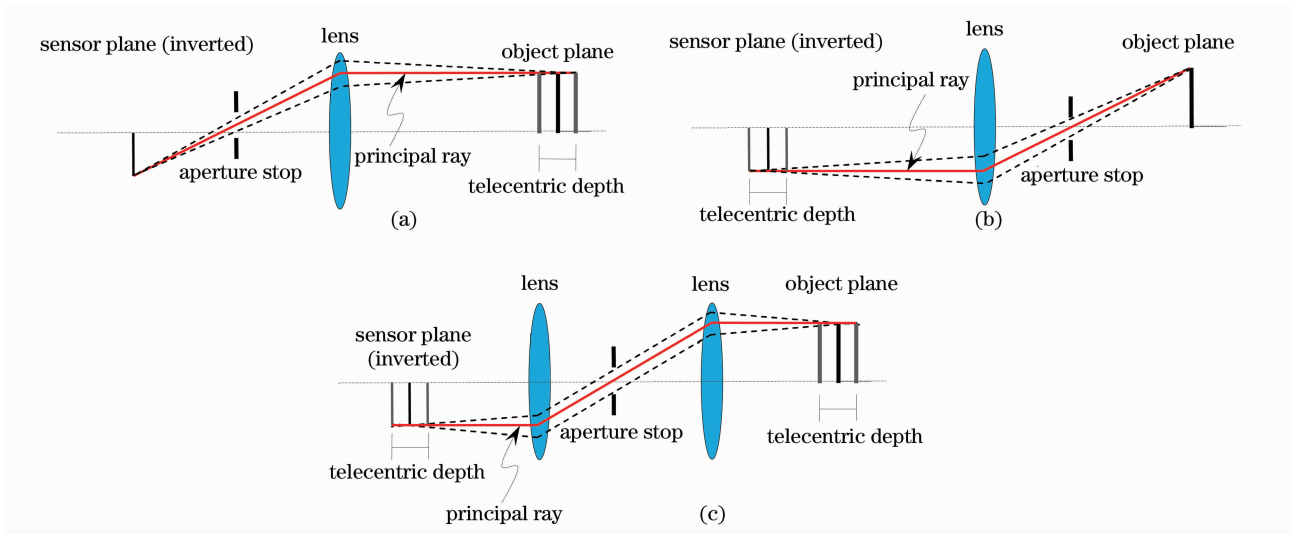


图 5 (a)物方远心镜头、(b)像方远心镜头和(c)双远心镜头原理示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of (a) object-side telecentric lens, (b) image-side telecentric lens and (c) bilateral telecentric lens

## 4 实验研究

### 4.1 二维数字图像相关测量系统

为了定量研究使用双远心镜头的二维数字图像相关测量系统在以上 3 种不利因素存在情况下的测量精度并与其他镜头比较，本实验中使用了如下 3 种具有代表性的镜头：1)日本 CBC 集团公司生产的焦距为 55 mm 的定焦镜头(型号: Tec-55); 2)北京大恒光电生产的物方远心镜头(型号: GCO-2301 + GCO-235); 3)德国施耐德光学公司生产的双远心镜头(型号: Xenoplan 1:5)。这 3 种镜头分别与空间分辨率为 1280 pixel × 1024 pixel 的 CMOS 数字摄像机(DH-HV1351UM, 大恒图像)组成 3 种不同的二维数字图像相关测量系统。这 3 种不同镜头如图 6 所

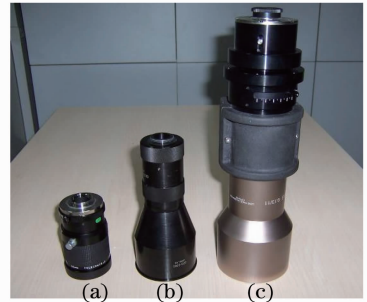


图 6 实验中使用的 3 种不同镜头。(a)普通镜头；(b)物方远心镜头；(c)双远心镜头

Fig. 6 Three different types of imaging lenses used in the experiments. (a) Computer standard lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens

示,表1给出了3种镜头在实验中的实际工作距离、远心深度以及放大倍数。

图7是使用施耐德双远心镜头的二维数字图像相关测量系统照片。实验中的被测平板玻璃试件表

表1 实验所用3种镜头的关键参数

Table 1 Key parameters of the three imaging lenses used in the experiments

| Lens type                    | Working distance /mm | Telecentric depth /mm | Magnification /(pixel/mm) |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Conventional lens            | 350                  | 0                     | 45.2                      |
| Object-side telecentric lens | 210                  | $\pm 5$               | 42.2                      |
| Bilateral telecentric lens   | 268                  | $\pm 10$              | 38.5                      |

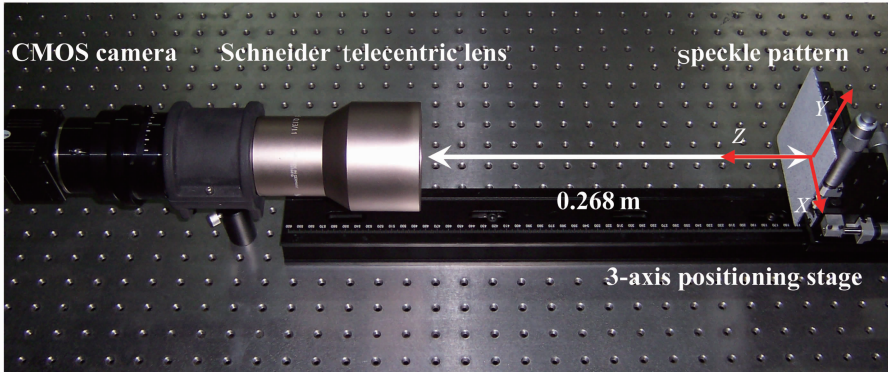


图7 使用施耐德双远心镜头的二维数字图像相关测量系统

Fig. 7 Established 2D-DIC system using a Schneider bilateral telecentric lens

## 4.2 实验

为全面准确地分析使用不同镜头的二维数字图像相关测量系统的测量精度,设计了3个实验以重现上述3种不利因素结果的影响。

1) 离面刚体位移实验。在该实验中,平板玻璃试样放置在各种镜头的工作距离处清晰成像,并保存一幅参考图像。随后用精密平移台使试样沿Z轴正(靠近镜头)、负(远离镜头)方向每次平移1 mm后保存1幅图像,最大离面刚体位移为5 mm,共保存10幅沿Z轴刚体平移的图像。为了尽可能地减小相机自热对数字图像相关方法测量的位移场和应变场的影响,根据文献[5]的建议对相机事先预热了2 h后才进行图像采集。

2) 相机自热实验。在该实验中,平板玻璃试样始终牢靠地固定在平移台上并保存静止,相机通电后首先采集一幅图像作为参考图像,随后每隔2 min保存1幅图像,图像采集持续5 h,共保存150幅不同时间的静态图像。为尽量避免环境温度变化的影响,实验在环境温度变化极小的密闭室内进行。因为试样保持静止状态,所以由数字图像相关方法获得的图像位移只可能是由相机自热引起的传感器靶面移动导致的。

面制作了随机散斑,该平板玻璃固定在一个定位精度为 $5 \mu\text{m}$ 的精密三维平移台上,可沿着水平(X轴)、竖直(Y轴)和光轴(Z轴)3个方向准确平移。

3) 面内平移实验。该实验用以定量分析各镜头的畸变造成的测量误差。平板玻璃试样放置在各种镜头的工作距离处清晰成像,并保存1幅参考图像。随后用精密平移台使试样沿X轴正、负方向每次平移0.5 mm后保存1幅刚体位移后的图像,最大面内刚体位移为2 mm,共保存8幅平移后的图像。同样,相机也是事先预热了2 h后再进行实验。

## 4.3 数字图像相关计算

以上实验所采集的变形前后的数字图像用自编的数字图像相关分析软件进行处理可获得像面位移和应变。具体计算时,选择位于参考图像中间大小为 $820 \text{ pixel} \times 680 \text{ pixel}$ 的矩形区域作为计算区域,计算位移场时所用图像子区大小为 $41 \text{ pixel} \times 41 \text{ pixel}$ ,步长为10 pixel,共计算了5727个计算点。位移计算采用了作者最近提出的快速、高精度Newton-Raphson算法<sup>[12]</sup>。计算应变场则采用作者之前提出的逐点最小二乘应变估计方法<sup>[13]</sup>,应变计算窗口大小为 $21 \text{ pixel} \times 21 \text{ pixel}$ 。此外,在计算整个计算区域的平均应变时,采用线性平面拟合的方法<sup>[14]</sup>,即对两个位移场分别用双线性函数进行最小二乘拟合,拟合函数的系数可直接作为计算区域的平均应变。

## 5 实验结果

### 5.1 离面刚体位移

图 8 是平板玻璃沿 Z 轴正方向平移 5 mm 后由 3 种不同类型镜头拍摄获得的水平和垂直方向的位移场。从图 8(a) 中等间距均匀分布的位移等值线可以看出普通镜头对离面刚体位移非常敏感, 离面位移引起的像面位移场呈明显的双向“拉伸”状态,

这与第 3 节分析吻合。从图 8(b) 对于大恒光电的物方远心镜头位移场也能看出双向拉伸状态, 但因拉伸位移较小, 图像噪声的影响较为明显。这表明离面位移对大恒光电的物方远心镜头影响相对较小。而施耐德双远心镜头采集的图像几乎完全不受离面位移的影响, 图 8(c) 中的位移场不仅数值较小, 而且看不出任何规律性的分布。

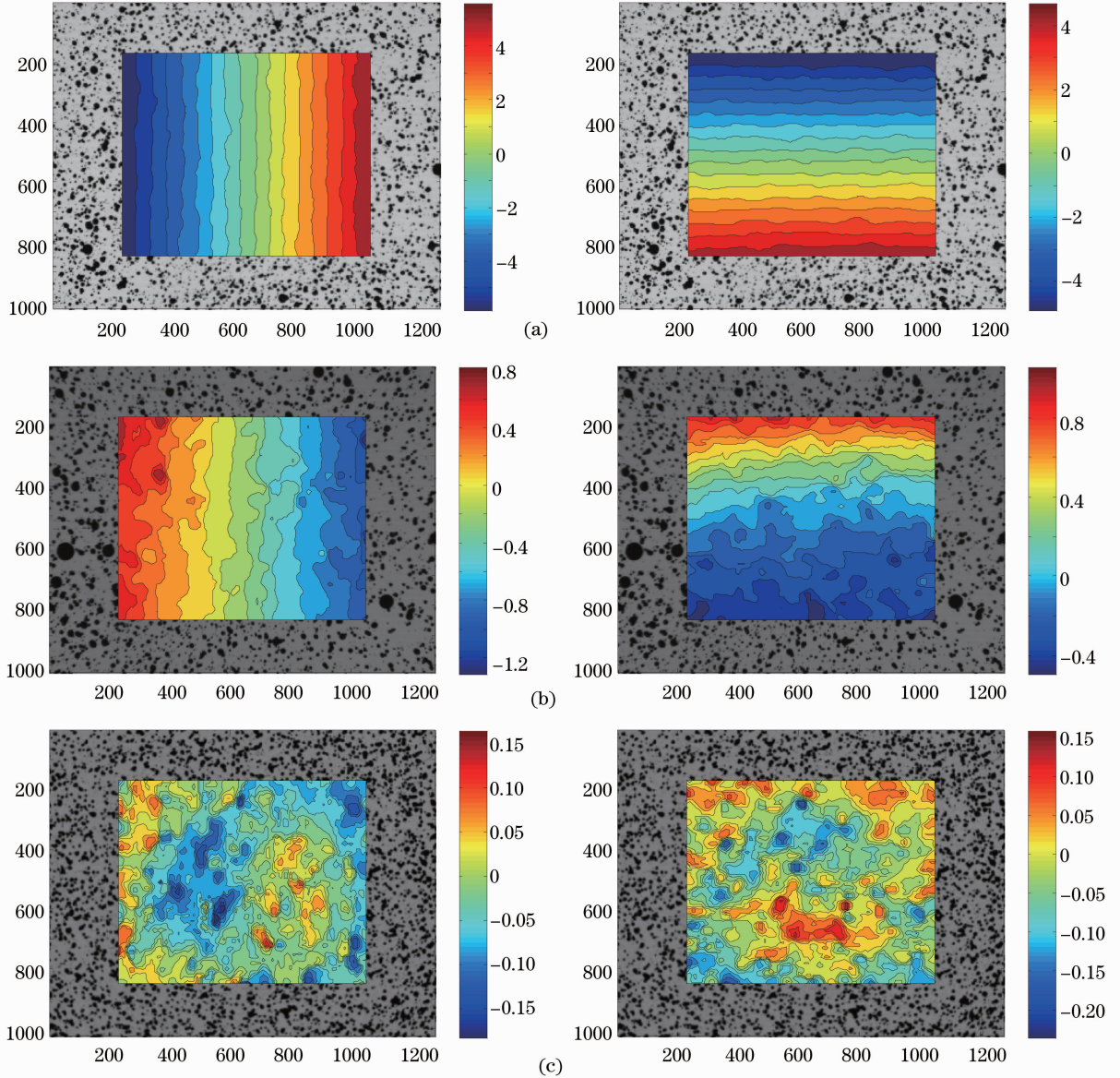


图 8 施加 5 mm 刚体离面位移后由不同镜头获得的平板薄膜表面的面内位移场(单位:像素)。(a)普通镜头; (b)物方远心镜头;(c)双远心镜头

Fig. 8 Measured in-plane displacement fields for the glass plate with a 5 mm out-of-plane rigid body translation using different imaging lenses (unit: pixel). (a) Computer standard lens; (b) object-side telecentric lens; (c) bilateral telecentric lens

图 9 是使用不同镜头的二维数字图像相关测量系统获得的不同离面刚体位移时的两个方向(X,Y 方向)面内平均虚应变。对该图中的离散数据进行线性拟合, 拟合直线的斜率可定量地表征各镜头对

离面刚体位移的敏感程度。可以看出, 普通镜头对离面位移敏感, 单位毫米离面位移约引起  $2579 \mu\epsilon$  的拉伸或压缩虚应变。大恒光电的物方远心镜头, 单位毫米离面位移引起  $360 \sim 380 \mu\epsilon$  的拉伸或压缩

虚应变。而离面位移对施耐德双远心镜头几乎没有任何影响,单位毫米的离面位移引起最大仅为  $4 \mu\epsilon$

的拉伸或压缩虚应变。

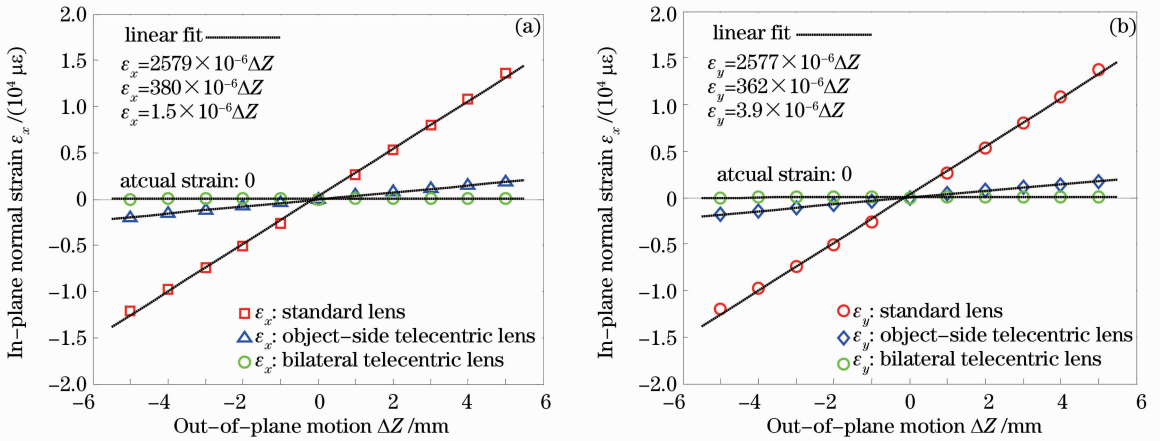


图 9 离面平移实验中不同测量系统获得的面内正应变场。(a)  $\epsilon_x$ ; (b)  $\epsilon_y$

Fig. 9 Measured normal strains using various 2D-DIC systems for out-of-plane translations. (a)  $\epsilon_x$ ; (b)  $\epsilon_y$

### 5.2 自热实验

由不同镜头所记录的序列图像与初始时刻的参考图像用 4.3 节介绍的计算方法进行分析可获得由相机自热引起的 X、Y 方向位移场和平均应变。图 10 绘出了相机自热引起的虚应变与时间的关系曲线,该图显示普通镜头、大恒光电物方远心镜头对相机自热引起的靶面位移都很敏感,在相机通电后

的 1.5~2 h 内,由相机自热会在水平和垂直方向引起拉伸正应变,但对切应变无影响(切应变在零值附近波动)。拉伸正应变随时间线性增加,随后进入热平衡阶段,最大热应变稳定  $200 \sim 250 \mu\epsilon$  之间。相比之下,施耐德双远心镜头则对相机自热也不敏感,相机自热会在水平和垂直方向引起最大仅为  $25 \mu\epsilon$  的压缩正应变。

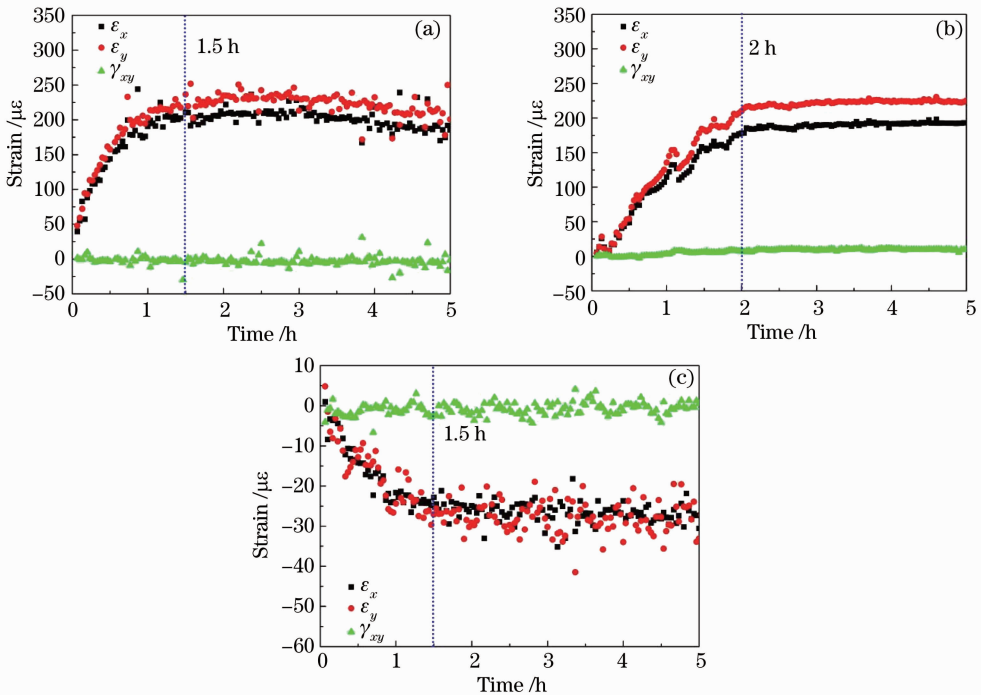


图 10 使用不同镜头的二维数字图像相关测量系统获得的相机自热引起的虚应变随时间的变化情况。

(a) 普通镜头; (b) 物方远心镜头; (c) 双远心镜头

Fig. 10 Measured virtual strains using various 2D-DIC systems for self-heating experiments. (a) Computer standard lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens



### 5.3 镜头畸变

使用三种镜头的二维数字图像相关测量系统获得试样沿水平方向平移 1 mm 后的畸变位移  $u$  场和

$v$  场,如图 11 和图 12 所示。在理想情况下,面内刚体平移试样表面各点的位移分量应该为常数,位移场应该为一平面。然而,由于非线性镜头畸变和图

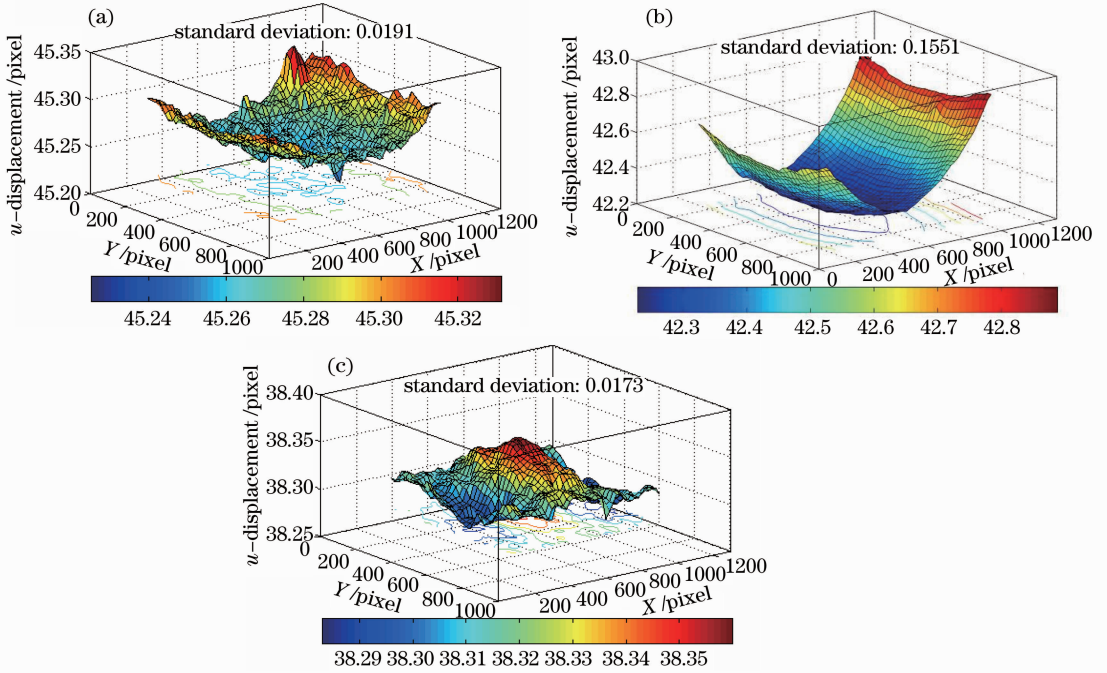


图 11 水平方向平移 1 mm 后由不同测量系统获得的畸变位移  $u$  场。(a)普通镜头;(b)物方远心镜头;(c)双远心镜头  
Fig. 11 Measured  $u$ -displacement field using various 2D-DIC systems with a horizontal translation of 1 mm. (a) Computer lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens

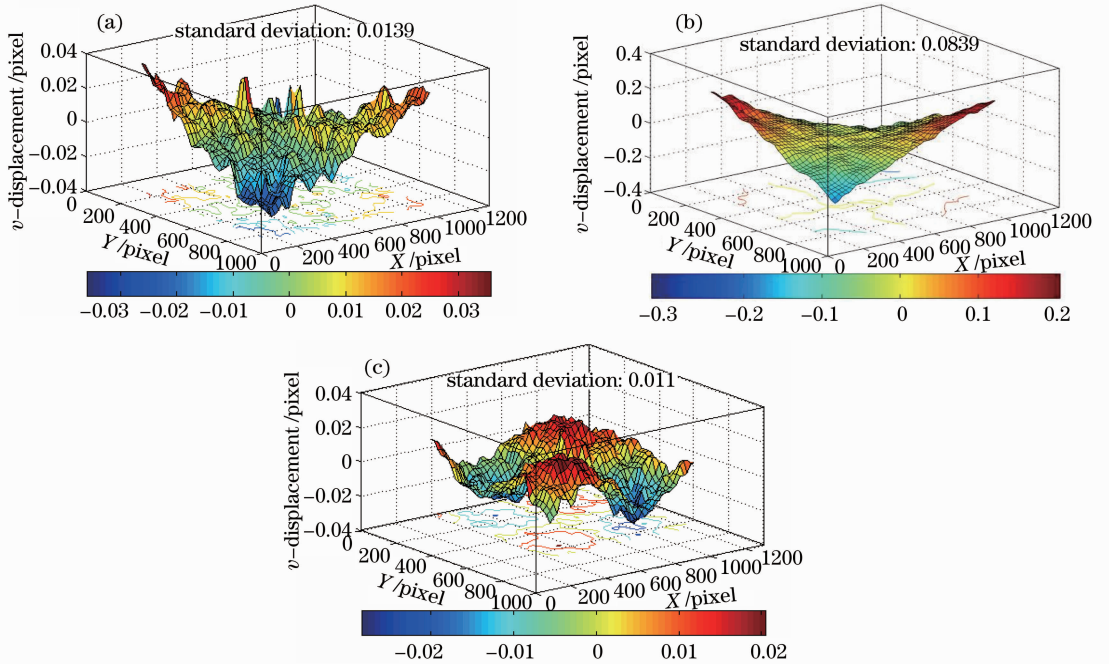


图 12 水平方向平移 1 mm 后由不同测量系统获得的畸变位移  $v$  场。(a)普通镜头;(b)物方远心镜头;(c)双远心镜头  
Fig. 12 Measured  $v$ -displacement field using various 2D-DIC systems with a horizontal translation of 1 mm. (a) Computer lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens

像噪声的影响,所有的位移场均为非均匀分布。其中大恒光电物方远心镜头所获取图像的水平

和竖直方向位移场分布呈现对称的二次抛物面和反对称的马鞍形分布,这种规律性的位移分布可用文献[6]中介绍的径向畸变模型很好地解释。对于 Computar 镜头,也呈现类似的规律性分布,只是径向畸变相对较

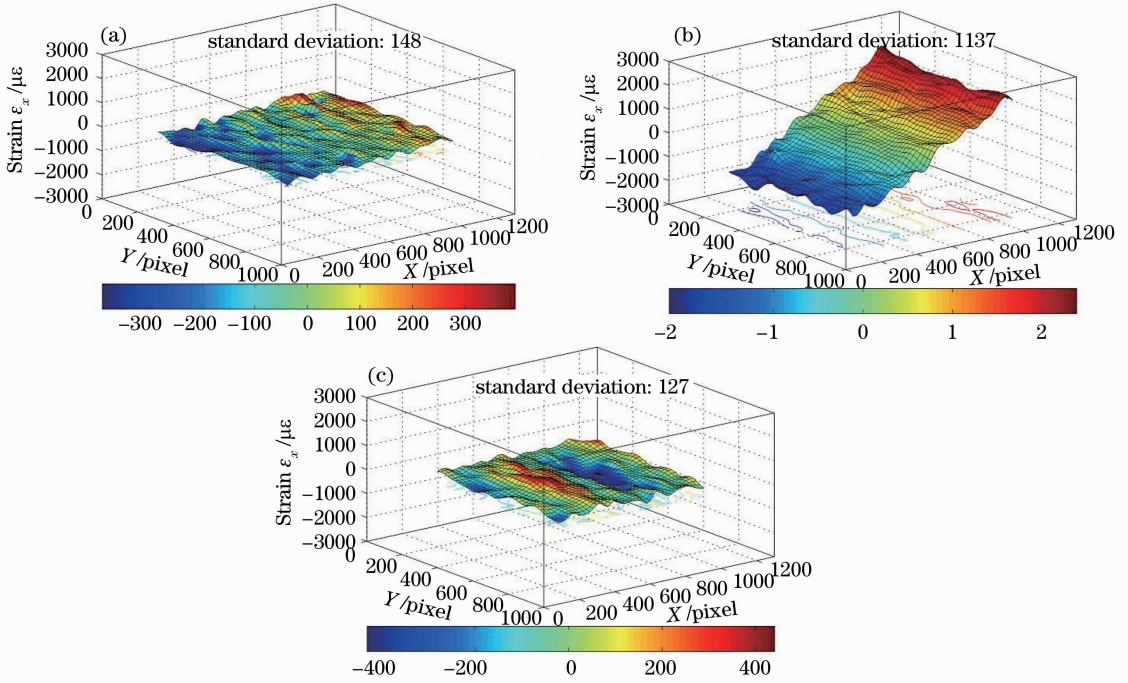


图 13 水平方向平移 1 mm 后由不同测量系统获得的畸变应变  $\epsilon_x$  场。(a)普通镜头;(b)物方远心镜头;(c)双远心镜头  
Fig. 13 Measured strains  $\epsilon_x$  field using various 2D-DIC systems with a horizontal translation of 1 mm. (a) Computar lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens

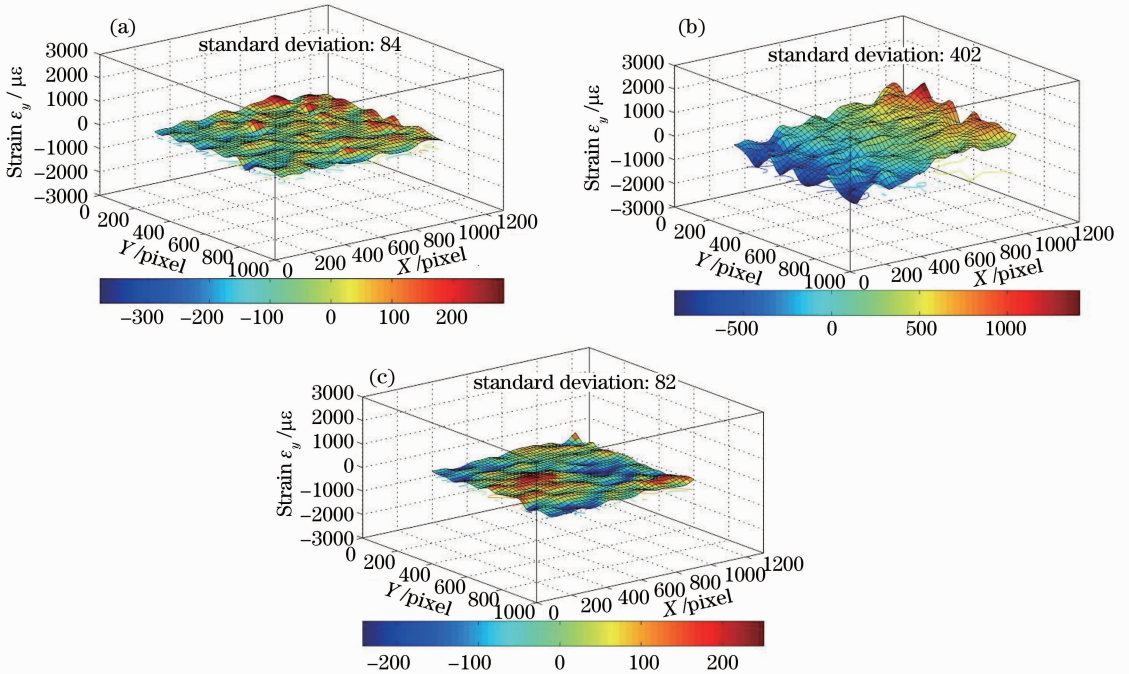


图 14 水平方向平移 1 mm 后由不同测量系统获得的畸变应变  $\epsilon_y$  场。(a)普通镜头;(b)物方远心镜头;(c)双远心镜头  
Fig. 14 Measured strains  $\epsilon_y$  field using various 2D-DIC systems with a horizontal translation of 1 mm. (a) Computar lens; (b) Daheng object-side telecentric lens; (c) Schneider bilateral telecentric lens

小,图像噪声的影响更为明显。使用施耐德双远心镜头的测量系统所测量的位移场规律性不明显,其两个方向位移的标准差均小于0.02 pixel,显示该双远心镜头畸变极小。

用逐点最小二乘法对图 11 和图 12 中的位移场进行差分处理,进一步获得由不同镜头所得图像的应变分布图,如图 13 和图 14 所示。为了定量比较 3 种镜头的质量,将图 13 和图 14 中应变分布图的纵坐标设为相同。从图 13 和图 14 可见,大恒光电物方远心镜头获取图像的 X 方向和 Y 方向应变场均为规律性的线性分布,这同样可以文献[6]中的径向畸变模型予以解释。然而,对于 Computar 镜头和施耐德双远心镜头而言,其获取图像的应变场基本上呈均匀分布,这与实际的零应变状态非常符合。应变的标准差在  $150 \mu\epsilon$  左右。总之,面内刚体平移实验显示,Computar 镜头和施耐德双远心镜头的畸变较小,基本可以忽略不计,而大恒光电物方远心镜头的畸变较大,在刚体平移较大时,必须采用适当的镜头畸变方法<sup>[6]</sup>予以校正。

## 6 结 论

建立了使用施耐德双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统,离面刚体平移实验、相机自热实验以及面内刚体平移实验都证明该系统对实际测量过程中不可避免出现的物面物距和传感器像距改变不敏感,而且镜头畸变小到可以忽略不计的程度。因此高质量的双远心镜头是高精度二维数字图像相关测量中的关键光学元件。尽管如此,相比于目前广泛使用的普通成像镜头,双远心成像镜头也有如下几点不足:1)价格昂贵,本文推荐使用的施耐德双远心镜头的价格是其他两种镜头价格的 10 倍左右;2)尺寸大,重量重;3)测量区域和放大倍数固定不可调。

最后值得一提的是,作者最近提出的纯单色光照明和窄带通成像相结合的主动成像思想<sup>[15,16]</sup>,也可直接用于本文所建立的高精度二维数字图像相关测量系统,使其具有极强的抗干扰能力以对室外测量环境的环境光变化以及高温物体表面的热辐射不敏感,可用于室外恶劣环境和极端高温环境中各种材料和结构表面变形的高精度测量。

## 参 考 文 献

1 B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie *et al.*. Two-dimensional digital

- image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(6): 062001
- 2 Gu Guoqing, Wang Kaifu, Xu Xing. Measurement of in-plane micro-rotations and rotation-center location of a rigid body by using digital image correlation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0108004
- 顾国庆,王开福,许 星. 基于数字图像相关的刚体内微小转动测量及转动中心定位[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0108004
- 3 Tang Zhengzong, Liang Jin, Guo Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetric correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112007
- 唐正宗,梁 晋,郭 成. 基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112007
- 4 M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari *et al.*. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2008, **46**(10): 746~757
- 5 S. P. Ma, J. Z. Pang, Q. W. Ma. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2011, **23**(2): 025403
- 6 B. Pan, L. P. Yu, Dafang Wu *et al.*. Systematic errors in two-dimensional digital image correlation due to lens distortion [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2013, **51**(2): 140~147
- 7 S. Yoneyama, H. Kikuta, A. Kitagawa *et al.*. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(2): 023602
- 8 S. Yoneyama, A. Kitagawa, K. Kitamura *et al.*. In-plane displacement measurement using digital image correlation with lens distortion correction [J]. *JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*, 2006, **49**(3): 458~467
- 9 D. S. Zhang, M. Luo, D. D. Arola. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(3): 033605
- 10 Yang Chuping, Liu Yan, Li Hai. Radial distortion distribution in optical imaging measured by wavelet phase analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0912001
- 杨初平,刘 岩,李 海. 小波相位分析测量成像径向畸变[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0912001
- 11 R. A. Petrozzo, S. W. Singer. Telecentric lenses simplify noncontact metrology [J]. *Test & Measurement World*, 2001, **21**(13): 4~9
- 12 B. Pan, K. Li. A fast digital image correlation method for deformation measurement [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2011, **49**(7): 841~847
- 13 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on local least-square fitting for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1980~1986
- 潘 兵,谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1980~1986
- 14 B. Pan, H. M. Xie, T. Hua *et al.*. Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method [J]. *Polymer Testing*, 2009, **28**(1): 75~83
- 15 Pan Bing, Wu Dafang. High-temperature digital image correlation based on optical band-pass filter imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212001
- 潘 兵,吴大方. 基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212001
- 16 B. Pan, D. F. Wu, Y. Xia. An active imaging digital image correlation method for deformation measurement insensitive to ambient light [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**(1): 204~209

栏目编辑:何卓铭