

## 基于单相机四视角成像的双轴三维视频引伸计

吴旷达, 屈敬业, 邵新星\*, 何小元

东南大学土木工程学院工程力学系, 江苏 南京 210018

**摘要** 为解决双视角三维视频引伸计在两个方向测量精度不一致的问题, 同时避免使用多相机带来的相机同步和成本高问题的出现, 提出了基于单相机四视角成像的三维双轴视频引伸计。在单相机前安装四棱镜, 使用一个相机即可从 4 个视角观察待测区域, 通过多视角强约束方程对变形前后的测点进行三维重构, 并计算测点之间的线应变。为避免棱镜折射对成像的影响, 使用窄带单色光进行照明。通过不锈钢拉伸实验验证了所提双轴视频引伸计的测量精度。实验结果表明, 使用基于单相机四视角成像的三维双轴视频引伸计可以高精度地测量 X 方向和 Y 方向的线应变。对两个方向的线应变多幅图测量结果取平均去噪后得到的应变绝对误差均在  $30 \mu\epsilon$  以内。将测量的力学参数与应变片的测量结果对比, 弹性模量的相对误差为 0.56%, 泊松比的相对误差为 1.8%。

**关键词** 机器视觉; 数字图像相关; 四视角成像; 视频引伸计; 双轴应变; 测量精度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1315001

## Biaxial Three-Dimensional Video Extensometer Based on Single-Camera Four-View Imaging

Wu Kuangda, Qu Jingye, Shao Xinxing\*, He Xiaoyuan

Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, Jiangsu, China

**Abstract** In order to solve the problem that the accuracies of dual-view three-dimensional (3D) video extensometer are different in two directions, and to avoid the problems of camera synchronization and high cost caused by using multiple cameras, a biaxial three-dimensional video extensometer based on single-camera four-view imaging is proposed. A rectangular pyramid prism is installed in front of a single camera, and the area to be measured can be observed from four views by a single camera. The 3D reconstruction of the measured points before and after deformation is carried out by using the strong constraint equation of multiple views, and the linear strain between the measured points is calculated. In order to avoid the influence of prism refraction on imaging, narrow-band monochromatic light is used for illumination. The measuring accuracy of the proposed biaxial video extensometer is verified by stainless steel tensile experiment. The experimental results show that the 3D biaxial video extensometer can accurately measure the linear strains in X and Y directions with high precision. The absolute error of strain is within  $30 \mu\epsilon$  after the average de-noising of linear strains in two directions. Comparing the measured mechanical parameters with the measured results of strain gauge, the relative error of elastic modulus and Poisson ratio is 0.56% and 1.8%, respectively.

**Key words** machine vision; digital image correlation; four-view imaging; video extensometer; biaxial strain; measurement accuracy

## 1 引言

为实现材料测试过程中的应变测量, 视频引伸计因其非接触和使用方便等优势被逐渐采用。为降低系统成本并解决相机同步的问题, 一般使用单个相机来

实现引伸计应变测量。Zhang 等<sup>[1]</sup>提出了一种基于数字图像相关的双轴视频引伸计并将其用于陶瓷复合格栅板的力学性能测试中。Huang 等<sup>[2]</sup>提出了一种自动数字图像相关方法并将其用于螺栓连接夹紧力的实时监控。Wu 等<sup>[3]</sup>提出了一种用于动态位移和应变测试

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-22; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(11902074, 11827801)

通信作者: \*xinxing.shao@seu.edu.cn

的实时视频引伸计测量方法。Pan 等<sup>[4]</sup>发展了一种先进的视频引伸计用于材料测试中的非接触、实时、高精度应变测量。然而,由于受到离面位移的影响,故基于二维数字图像相关的视频引伸计的应变测量精度是不够的。虽然远心镜头已经被证明对离面位移不敏感<sup>[5]</sup>,但是其高成本和有限的测量视场的缺陷会限制其应用范围。更重要的是,当使用远心镜头时,如果存在很大的离面位移,仍然会导致不可忽视的应变误差产生。

为消除离面位移对二维视频引伸计的影响,Bai 等<sup>[6]</sup>设计了一种使用大像场镜头和双图像传感器的光学引伸计,在使用矫正板的情况下可以实现 2~3 με 分辨率的应变测量。为减小离面位移对二维视频引伸计的影响,Zhu 等<sup>[7-8]</sup>提出了一种双反射成像方法,通过平均试样前后表面的应变,消除离面刚体运动对应变测量的影响。然而,当使用参考试样或者矫正板的方法时,由于需要在试样上贴一个刚性板<sup>[9-11]</sup>,故在测量中并不是一个实用的选择。双反射成像的方法似乎是一个实用的选择,但在试样附近使用两个反射镜会使得测量系统更加复杂。为进一步提高视频引伸计的测量分辨率,不少研究者提出了大幅度提高应变计算像素标距的方法<sup>[12-14]</sup>,但这些方法主要针对二维视频引伸计。

为解决单相机视频引伸计的精度问题,Shao 等<sup>[15]</sup>提出了单相机三维视频引伸计。基于反射式的分光成像装置,使用单个相机和镜头即可实现双视角图像的获取。然而,双视角成像存在水平和垂直两个方向测量精度不一致的问题,进而无法满足高精度双轴应变的测量需求。为解决双视角成像的测量精度不一致问题,Zhu 等<sup>[16]</sup>提出了四相机数字图像相关(DIC)方法,使用 4 台相机从 4 个视角获取图像,同时实现了水平和垂直方向的高精度变形测量。然而,四相机方法有以

下局限性:1)在高速测量中,无法保证多相机之间的同步性;2)测量系统所占空间较大,限制了应用范围;3)硬件成本大大提高。这些局限性使其无法在视频引伸计应变测量中得到推广。

为解决以上问题,本文提出基于单相机四视角成像的高精度三维双轴视频引伸计。在镜头前安装四棱镜,使用单个相机即可从 4 个视角拍摄被测物体图像,并用四视角提供的 8 个方程来提高三维重构精度,进而提高双轴应变测量精度。单相机四视角成像方式解决了相机同步问题和硬件成本问题,在保证测量精度的同时,使得测量系统的紧凑性大大提高。所提出的高精度三维双轴视频引伸计有望在科研和工程领域中得到推广。

## 2 成像与测量原理

### 2.1 四视角成像三维立体视觉

通过在相机前安装棱镜,使得单相机可以从不同视角拍摄测量区域,相当于使用多个相机同时对被测物体进行测量<sup>[17-18]</sup>。本文采用四棱镜实现 4 个视角的单相机成像,图 1 是四棱镜成像的光路示意图。通过棱镜折射成像,物体的 4 个视角图像可以使用单个相机得到。图 2 是四视角立体视觉的基本原理图,点 Q 为空间中待测的点,( $X_w, Y_w, Z_w$ )为点 Q 的空间三维坐标。视角 1、视角 2、视角 3 和视角 4 同时观察点 Q,4 个视角的光心分别为  $O_{c1}, O_{c2}, O_{c3}$  和  $O_{c4}$ 。点 Q 在 4 个视角上成像的点分别为  $Q_1, Q_2, Q_3$  和  $Q_4$ 。使用 4 个视角的成像方程来确定点 Q 的三维空间坐标,即图 1 中  $O_{c1}Q_1, O_{c2}Q_2, O_{c3}Q_3$  和  $O_{c4}Q_4$  四条直线的交点。与传统的双视角成像相比,四视角成像可以多提供两条射线约束,即多提供 4 个约束方程,最终可以通过 8 个约束方程来求解三个空间坐标未知数。对于去畸变后的图像坐标,成像的投影方程为

$$\begin{cases} X^{(i)} = f_X^{(i)} \frac{r_{11}^{(i)} X_w + r_{12}^{(i)} Y_w + r_{13}^{(i)} Z_w + t_X^{(i)}}{r_{31}^{(i)} X_w + r_{32}^{(i)} Y_w + r_{33}^{(i)} Z_w + t_Z^{(i)}} + f_s^{(i)} \frac{r_{21}^{(i)} X_w + r_{22}^{(i)} Y_w + r_{23}^{(i)} Z_w + t_Y^{(i)}}{r_{31}^{(i)} X_w + r_{32}^{(i)} Y_w + r_{33}^{(i)} Z_w + t_Z^{(i)}} + c_X^{(i)} \\ Y^{(i)} = f_Y^{(i)} \frac{r_{21}^{(i)} X_w + r_{22}^{(i)} Y_w + r_{23}^{(i)} Z_w + t_Y^{(i)}}{r_{31}^{(i)} X_w + r_{32}^{(i)} Y_w + r_{33}^{(i)} Z_w + t_Z^{(i)}} + c_Y^{(i)} \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

式中:( $X^{(i)}, Y^{(i)}$ )为  $Q_i$  的像素坐标; $c_X, c_Y$ 为单相机的内参参数; $f_X, f_Y, f_s$ 为镜头的内参参数; $R^{(i)} = [r_{11}^{(i)} \ r_{12}^{(i)} \ \dots \ r_{31}^{(i)}]$ 和  $T^{(i)} = [t_X^{(i)} \ t_Y^{(i)} \ t_Z^{(i)}]$ 分别为第  $i$  个视角的光心坐标系相对世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。与双视角成像相比,四视角成像增加了两组投影方程,降低了三维重构的不确定性<sup>[16]</sup>。

根据式(1),就可以直接使用最小二乘法来求解点 Q 的空间三维坐标,可以表示为

$$\begin{bmatrix} X^{(i)} r_{31}^{(i)} - c_X^{(i)} r_{31}^{(i)} - f_s^{(i)} r_{21}^{(i)} - f_X^{(i)} r_{11}^{(i)} & X^{(i)} r_{32}^{(i)} - c_X^{(i)} r_{32}^{(i)} - f_s^{(i)} r_{22}^{(i)} - f_X^{(i)} r_{12}^{(i)} & X^{(i)} r_{33}^{(i)} - c_X^{(i)} r_{33}^{(i)} - f_s^{(i)} r_{23}^{(i)} - f_X^{(i)} r_{13}^{(i)} \\ Y^{(i)} r_{31}^{(i)} - c_Y^{(i)} r_{31}^{(i)} - f_Y^{(i)} r_{21}^{(i)} & Y^{(i)} r_{32}^{(i)} - c_Y^{(i)} r_{32}^{(i)} - f_Y^{(i)} r_{22}^{(i)} & Y^{(i)} r_{33}^{(i)} - c_Y^{(i)} r_{33}^{(i)} - f_Y^{(i)} r_{23}^{(i)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_X^{(i)} t_X^{(i)} + f_s^{(i)} t_Y^{(i)} + c_X^{(i)} t_Z^{(i)} - X^{(i)} t_Z^{(i)} \\ f_Y^{(i)} t_Y^{(i)} + c_Y^{(i)} t_Z^{(i)} - Y^{(i)} t_Z^{(i)} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

在相机标定过程中,可以用 4 个视角的图像一起来标定相机内参,再通过每个视角的图像标定各自相

对世界坐标系的外参。在匹配过程中,可以以视角 1 所拍摄的图像为参考图像,在另外 3 个视角拍摄的图

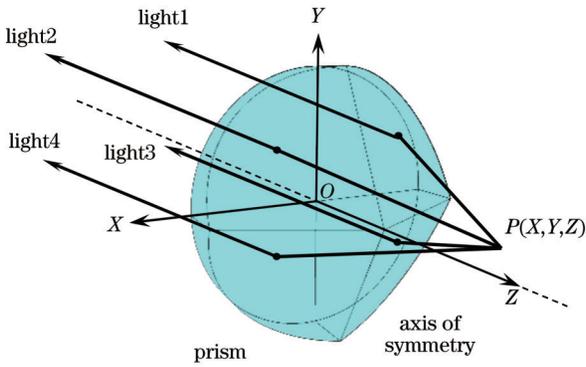


图 1 四棱镜成像光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of four-prism imaging optical path

片中通过数字图像相关方法进行匹配,得到对应点的像素坐标。对比双视角成像与四视角成像模型可以发现,两种方法都是通过最小二乘法进行拟合求解,且都是求解空间三维坐标中的 3 个未知数。然而,式(2)中有 8 个独立方程,考虑到实际匹配误差,8 个独立方程进

行最小二乘求解的精确度是高于 4 个独立方程的<sup>[16]</sup>。

### 2.2 双轴三维视频引伸计

假设双轴三维视频引伸计的测点为  $P_1, P_2, P_3$  和  $P_4$ , 如图 3 所示。通过计算测量标距长度的相对伸长率可以确定应变的大小,应变计算的公式为

$$\begin{cases} \epsilon_Y = \frac{\Delta L_Y}{L_Y} = \frac{\overline{P'_1 P'_2} - \overline{P_1 P_2}}{\overline{P_1 P_2}} \\ \epsilon_X = \frac{\Delta L_X}{L_X} = \frac{\overline{P'_3 P'_4} - \overline{P_3 P_4}}{\overline{P_3 P_4}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $P_1(X_1, Y_1, Z_1), P_2(X_2, Y_2, Z_2), P_3(X_3, Y_3, Z_3)$  和  $P_4(X_4, Y_4, Z_4)$  为测点变形前的空间三维坐标;  $P'_1(X'_1, Y'_1, Z'_1), P'_2(X'_2, Y'_2, Z'_2), P'_3(X'_3, Y'_3, Z'_3)$  和  $P'_4(X'_4, Y'_4, Z'_4)$  为测点变形后的空间三维坐标;  $\overline{P_1 P_2}$  和  $\overline{P'_1 P'_2}$  为 Y 方向变形前后的标距长度;  $\overline{P_3 P_4}$  和  $\overline{P'_3 P'_4}$  为 X 方向变形前后的标距长度。在所提出的双轴三维视频引伸计中,测点的空间三维坐标可以根据式(2)的 8 个方程进行三维重构。

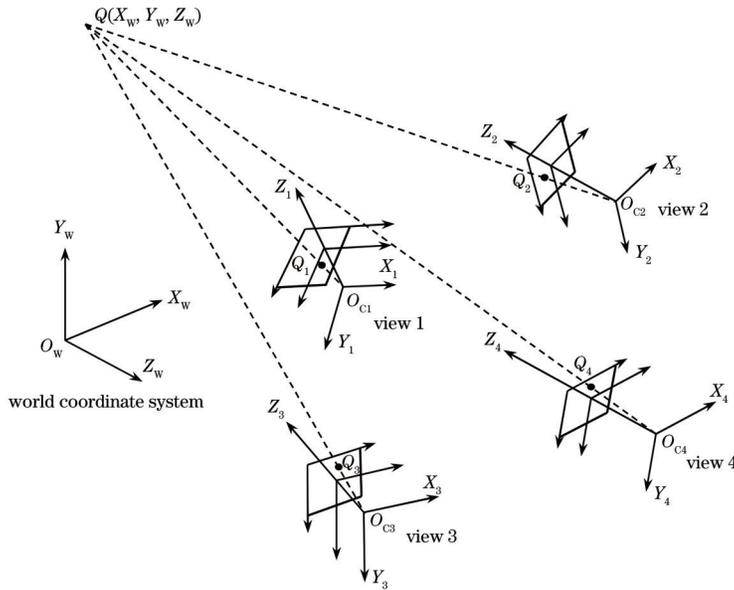


图 2 四视角立体视觉基本原理示意图

Fig. 2 Basic schematic diagram of four-view stereo vision

## 3 金属材料拉伸实验

### 3.1 实验方案

相机的型号为 IDS-UI-3370CP-M-GL, 相机分辨率为  $4 \times 10^6$  pixel, 采集帧频最高为 80 Hz。实验中对不锈钢试样进行准静态拉伸, 并且同时使用双轴三维视频引伸计和应变片来测量应变。实验结束后对相机所拍摄的图像进行处理, 将得到的实验数据与应变片测量数据进行对比, 进而得到双轴三维视频引伸计的测量精度。

如图 4 所示, 不锈钢拉伸试样的有效长度为 100 mm, 宽度 20 mm, 厚度 1.5 mm。根据圣维南原理, 试样的中央部分近似处于单向拉伸状态, 在试样的

中央粘贴双轴应变花, 进而测量水平和垂直方向的应变。为了将应变片和双轴视频引伸计的测量结果进行对比, 在粘贴应变花的同一侧使用水转印的方法<sup>[19-20]</sup> 粘贴直径为 0.4 mm 的数字散斑。

实验现场图如图 5 所示, 为使得相机可以完整拍摄到试件表面, 并且充满整个视场, 调整棱镜距离试件表面 300 mm, 相机与棱镜之间的距离为 70 mm。为避免棱镜折射的影响, 采用窄带蓝光光源进行照明。采用逐级加载的方式, 通过应变片读数控制每级加载的应变为  $100 \mu\epsilon$ , 每一级加载后记录应变仪数据并且连续采集 10 幅散斑图片, 共分为 10 级加载, 一直加载到  $1000 \mu\epsilon$ , 一共重复 3 组实验。计算的模板大小为 21 pixel, 使用一阶形函数的反向组合高斯牛顿算法进

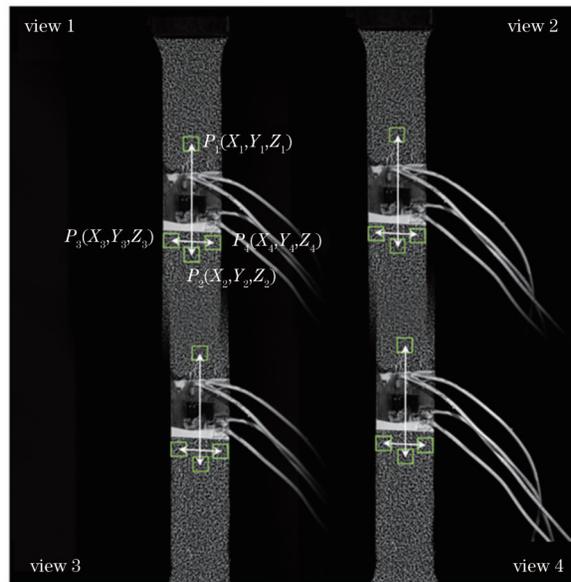


图 3 双轴三维视频引伸计原理图

Fig. 3 Schematic diagram of biaxial three-dimensional video extensometer

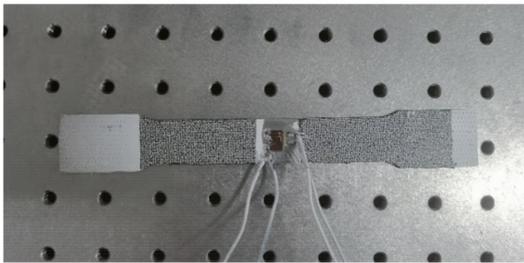


图 4 不锈钢拉伸试样

Fig. 4 Stainless steel tensile specimen

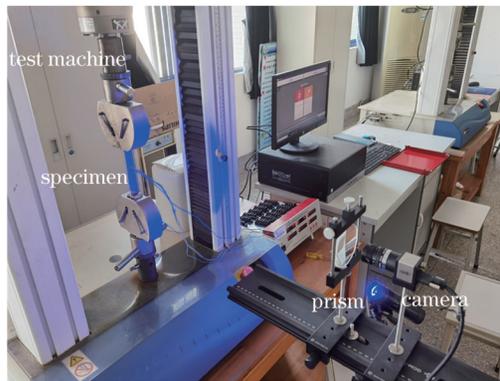


图 5 金属材料拉伸实验装置图

Fig. 5 Device drawing of metal material tensile experiment

行计算。

### 3.2 精度分析

视频引伸计的计算标距选取如图 6 所示,其中应变测量的纵向标距为 30 mm(约 310 pixel),横向标距为 15 mm(约 155 pixel)。将每一级加载后的结果与应变片的结果作差,作为双轴视频引伸计的测量误差。在图 5 所示的测量系统光路中难免会存在气流等因素引起的测量误差。除使用单幅图的测量误差以外,为

降低光路中的气流和环境噪声,同时将 10 幅图的计算结果进行取平均处理并分析取平均后的测量误差。

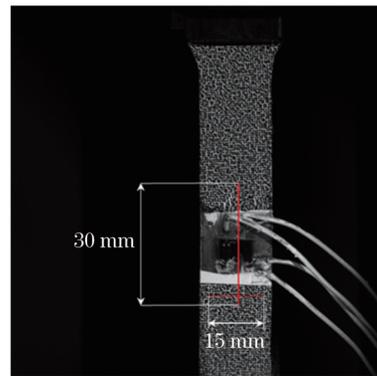


图 6 双轴三维视频引伸计标距

Fig. 6 Gauge length of biaxial three-dimensional video extensometer

如图 7 所示,只使用单幅图进行计算,X 方向误差最大为 134  $\mu\epsilon$ ,Y 方向误差最大为 113  $\mu\epsilon$ 。在多幅图结果取平均去噪之后,X 方向误差最大为 13  $\mu\epsilon$ ,Y 方向误差最大为 17  $\mu\epsilon$ 。结果表明,通过多幅图结果取平均去噪的方法可以显著降低所测数据的误差,有效提高测量精度。在双轴三维视频引伸计中,即使选用较小的像素标距,多幅图结果取平均去噪后的结果也可以实现高精度应变测量。

表 1 为 3 组实验中最大的绝对误差值。可以发现,在多幅图结果取平均后,X 和 Y 方向测量的最大绝对误差均没有超过 30  $\mu\epsilon$ ,表明多幅图结果取平均可以消除环境噪声对测量结果的影响,使得测量结果更加稳定。

### 3.3 测量结果

在材料力学测试中,应变测量结果可以用于确定

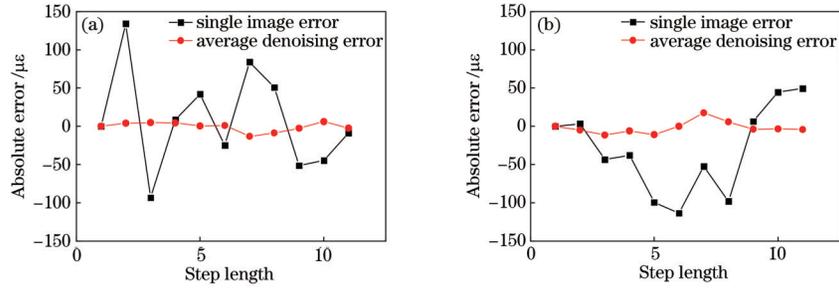


图 7 双轴三维视频引伸计应变测量绝对误差。(a) X 方向; (b) Y 方向;

Fig. 7 Absolute error of strain measurement by biaxial three-dimensional video extensometer. (a) X direction; (b) Y direction

表 1 3 组实验中多幅图结果取平均后的最大绝对误差

Table 1 Maximum absolute error in three groups of experiments after average denoising

Group No.	X direction / με	Y direction / με
1	13.0	17.0
2	22.5	18.1
3	27.3	23.5

材料力学参数,本文使用多幅图结果取平均后的结果作为双轴三维视频引伸计最终的测量值。Y 方向的应变测量结果可以直接用于计算不锈钢试样的弹性模量,双轴视频引伸计与应变片在 Y 方向的应变测量结果如表 2 所示。

表 2 Y 方向应变

Table 2 Strain in Y direction

Load / kN	Absolute error / με	Relative error / %
0.26	—	—
0.84	-4.86	4.58
1.35	-11.42	5.68
1.89	-5.98	1.99
2.43	-10.82	2.69
2.96	-0.06	0.01
3.48	17.61	-2.91
4.03	5.75	-0.81
4.55	-3.76	0.47
4.94	-3.45	0.38
5.32	-4.32	0.43

若金属试样的横截面尺寸是已知的,则可以由荷载值计算出每个阶段应力的大小,结合应变片和视频引伸计测量出来的应变,可以通过最小二乘法得到试件的弹性模量。如图 8 所示,根据拟合所得到的直线的数据,可以得到不锈钢材料的弹性模量。使用应变片测量的弹性模量为 170.16 GPa,使用视频引伸计测量的弹性模量为 171.12 GPa。视频引伸计测量得到的弹性模量与应变片测量得到的弹性模量之间的相对误差为 0.56%。

X 方向和 Y 方向的应变测量结果可以用于计算不

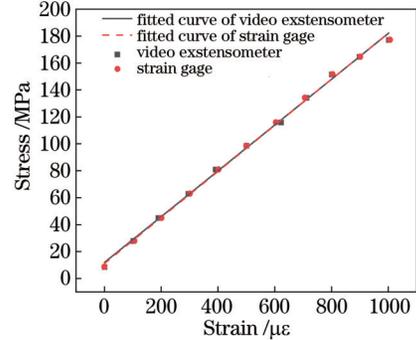


图 8 Y 方向应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve in Y direction

锈钢试样的泊松比,双轴视频引伸计与应变片 X 方向的应变测量结果如表 3 所示。如图 9 所示,分别将视频引伸计和应变片所测得的 X 方向应变和 Y 方向应变进行绘图,然后通过最小二乘法进行直线拟合,拟合出来的直线的斜率就是材料的泊松比。根据最小二乘法拟合出来的结果,使用应变片测量得到的试样的泊松比为 0.273,使用视频引伸计测量得到的试样的泊松比为 0.278,相对误差为 1.8%。

表 3 X 方向应变

Table 3 Strain in X direction

Load / kN	Absolute error / με	Relative error / %
0.26	—	—
0.84	4.02	13.86
1.35	4.81	8.91
1.89	4.44	5.48
2.43	0.55	0.51
2.96	1.10	0.81
3.48	-13.05	-7.96
4.03	-8.64	-4.43
4.55	-2.62	-1.18
4.94	6.21	2.52
5.32	-2.45	-0.90

## 4 讨 论

图 10 给出了双视角(四视角中的视角 1 和视角 2)

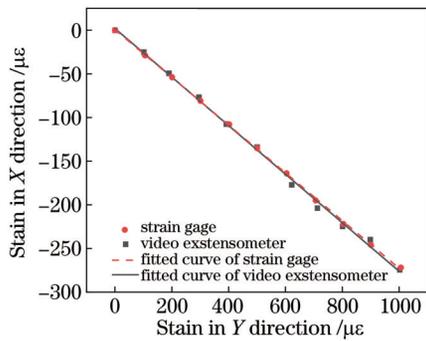


图 9 X-Y 方向应变曲线

Fig. 9 Strain curve in X-Y direction

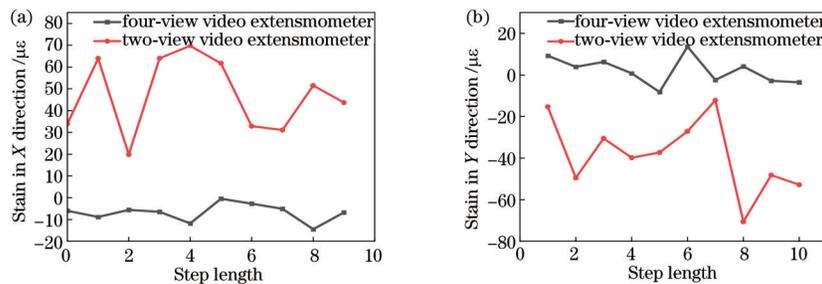


图 10 双视角和四视角视频引伸计绝对误差对比。(a) X 方向应变; (b) Y 方向应变

Fig. 10 Comparison of absolute error between two-view and four-view video extensometers. (a) Strain in X direction; (b) strain in Y direction

## 5 结 论

提出基于单相机四视角成像的三维双轴视频引伸计,通过在镜头前安装四棱镜,使用一台相机即可获得 4 个视角下的被测物体图像。通过 8 个方程来解算测点的三维空间坐标,具有更高的三维重构精度,且可以保证 X 和 Y 方向测量精度的一致性。为降低环境噪声的影响,使用多幅图测量结构取平均的方式大大提高了测量精度,使得应变测量在小标距下的最大绝对误差也不超过  $30 \mu\epsilon$ 。将测量的力学参数与应变片的测量结果对比发现,弹性模量的相对误差为  $0.56\%$ ,泊松比的相对误差为  $1.8\%$ ,实验证明了所提双轴视频引伸计在具有可行性的同时,具有较高的测量精度。

实际安装棱镜时相机芯片的大小、镜头焦距和棱镜角度需要满足一定的条件才可以较好地使试件被相机完整的观察到并且不超出视场。同时,棱镜偏转一个微小的角度也会对结果造成很大的影响。由于棱镜色散比较严重,故需要对其使用窄带单色光进行照明。在棱镜光路设计好之后,可以对系统进行整体封装处理,以保证系统的紧凑性和易用性。在未来的工作中,将结合实时计算<sup>[21-22]</sup>,实现高精度双轴应变实时测量。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang D, Arola D, Charalambides P G, et al. On the mechanical behavior of carbon-carbon optic grids determined using a bi-axial optical extensometer[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(14): 4495-4505.
- [2] Huang Y H, Liu L, Yeung T W, et al. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(4): 408-414.
- [3] Wu R, Kong C, Li K, et al. Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(5): 833-843.
- [4] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19082-19093.
- [5] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10): 746-757.
- [6] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 28-37.
- [7] Zhu F P, Bai P X, Shi H J, et al. Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 065007.
- [8] 朱飞鹏, 陆润之, 白鹏翔, 等. 双反射镜成像用于二维数字图像相关应变精度提升[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212002.
- [9] Zhu F P, Lu R Z, Bai P X, et al. Enhancement of strain measurement accuracy of two-dimensional digital image correlation based on dual-reflector imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1212002.
- [9] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging

- lenses: implementation of a generalized compensation method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(2): 025001.
- [10] Xu X, Zhang Q, Su Y, et al. High-accuracy, high-efficiency compensation method in two-dimensional digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(6): 831-846.
- [11] Lü Z Q, Xu X H, Yan T H, et al. High-accuracy optical extensometer based on coordinate transform in two-dimensional digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 61-70.
- [12] Dong B, Li C Z, Pan B. Ultrasensitive video extensometer using single-camera dual field-of-view telecentric imaging system[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4499-4502.
- [13] Zhu F P, Tao J, Lu R Z, et al. Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques[J]. *Measurement*, 2021, 174: 109024.
- [14] Zhu F P, Gu J, Lu R Z, et al. High-accuracy optical extensometer realized by two parallel cameras and two-dimensional digital image correlation[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(34): 10813-10825.
- [15] Shao X X, Eisa M M, Chen Z N, et al. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30124-30138.
- [16] Zhu C P, Shao X X, Liu C, et al. Accuracy analysis of an orthogonally arranged four-camera 3D digital image correlation system[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(24): 6535-6544.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Chen Z N, Quan C G, Zhu F P, et al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(9): 095201.
- [20] 陈振宁, 邵新星, 吴家林, 等. 水转印数字散斑场用于人体颈动脉全场测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312004.
- Chen Z N, Shao X X, Wu J L, et al. Full-field deformation measurement of human carotid artery based on water transfer printing speckle patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312004.
- [21] 邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003.
- Shao X X, Dai Y T, He X Y, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012003.
- [22] Shao X X, He X Y. Real-time 3D digital image correlation for large deformation and rotation measurements based on a deformation transfer scheme[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(6): 951-967.