

基于平面镜成像的单相机数字图像相关三维全景测量

葛朋祥^{1,2}, 王欢庆^{1,2}, 朱奕磊^{1,2}, 王永红^{1,2*}

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²合肥工业大学测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009

摘要 针对普通单相机数字图像相关(DIC)系统仅能测量目标面内变形信息的问题,本文提出了一种采用单相机 DIC 系统实现三维全景测量的方法,即:根据多平面镜成像原理,被测目标的前后表面成像在一个共同的视场内,两个光路分别成像在两个平面镜中,将单相机扩展为 4 台虚拟相机,实现三维全景测量。为了更好地完成虚实像转换,实验之前对平面镜表面进行三维重建,分别采用动态、静态实验对该方法的可行性及精度进行验证。结果表明:在动态拉伸测试中,4 个子区域有着相近的变化趋势,工程应变普遍分布在 0.0125 左右,且位移精度较高;在静态实验中,对决策币的前后表面进行三维重建,重建结果与决策币形貌相吻合。

关键词 测量; 数字图像相关; 单相机; 平面镜成像; 全景测量

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.0904004

1 引言

数字图像相关(DIC)是一种高精度光测力学技术,其以优良的性能在土木工程、生物组织、航空航天、水下船舶等领域^[1-4]被广泛应用。在各种外部设备的辅助下,DIC 技术可以应用在很多特殊的环境中。根据相机的数量,DIC 系统可以分为单相机 DIC 系统、双相机立体 DIC 系统以及多相机立体 DIC 系统。在工程应用中,单相机系统结构形式简单,环境适应性更强,但常规单相机系统难以获得三维(3D)信息。若要同时获取面内、面外信息,DIC 系统至少需要两台相机。

发展至今,DIC 的位移、应变测量精度相对来说已经很高。很多学者开始发掘 DIC 技术的 3D 重建能力,其中最直接的方案是采用多相机系统。2013 年,Wang 等^[5]将 4 台相机分为两组立体 DIC 系统,对埃里克森试验的应变进行了详细验证。2017 年,Malowany 等^[6]采用分布式四相机 DIC 系统扩大了测量范围,同时实现了相机间非重叠区域的测量。麻省理工学院的 Solav 等^[7]于 2018 年提出了第一

款开源的环形相机阵列 DIC 系统软件,该系统不仅具有常规 DIC 所具有的应变测量能力,还可以实现动态目标的全景 3D 立体重建。双相机 DIC 系统在外部设备的辅助下也有很多种方案实现全景相关测量,如:Wang 研究小组^[8-9]在两个平面镜的辅助下实现了常规试件前后表面的动态应变计算、全景 3D 立体重建;Pan 等^[10]详细列举了单相机 DIC 系统实现 3D 相关测量的多种方案,但这些方案仅是采用单相机 DIC 系统获得被测目标部分表面的 3D 信息。有些学者采用衍射光栅、双棱镜、平面镜辅助单相机 DIC 系统实现 3D 测量^[11-13]。与采用衍射光栅、双棱镜的 DIC 系统相比,采用平面镜的 DIC 系统可以测量更大的目标,早在 1993 年就已有平面镜反射成像的案例^[14],但受当时测量水平的制约,测量精度不高而且功能也相对单一。在 Pankow 等^[15]的方案中,一台高速相机在平面镜的辅助下成功地测量了面外大变形位移量。Zhu 等^[16]采用单相机 2D-DIC 系统计算变形,他们在被测目标的后面放置了两个平面镜,这不仅提高了光学引伸计的测量精度,还消除了轻微的面外运动。2021 年,Zhu

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-10-03; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101803)、合肥市自然科学基金(2021017)

通信作者: *yhwang@hfut.edu.cn

等^[17]采用多个平面镜辅助单相机的方案不仅实现了 3D 测量,还进一步提高了引伸计的精度。

常规双相机系统的测量视场有限,要想实现全景测量,就需要更多的外部设备;而多相机系统装置繁冗、标定困难,并且相机数量的增加会大大增加应用成本,实用性受到严重影响。在实现全景动态测量方面,双相机、多相机系统都存在明显缺陷。本研究的初衷是采用相对简单的装置,实现更全面的功能。因此,根据前人的研究成果,本课题组拟采用改进单相机 DIC 系统的方案,仅凭借一台相机来实现全景动态测量的功能。平面镜价格低廉、成像效果理想,本研究用方法在 6 个平面镜的辅助下将光路分为两路,同时对被测目标的前后表面进行成像,最终在单相机视场中拍摄到了前后表面 4 个子区域的图像。在本研究中,单相机扩展成为 4 台虚拟相机,两路成像都可以单独进行 DIC 立体匹配计算。此外,为了精确地完成虚实像的转换,需在实验前对平面镜的表面进行 3D 重建。单相机的优点在于更能适应复杂的环境,并且在价格、配置、操作等方面具有明显优势,同时,进行 3D 测量时不必考虑多相机标定困难的问题。相比文献[12]等采用棱镜形式的成像方案,平面镜调节更加方便,镜面间夹角的自由度更加灵活,更有利于清晰成像。

2 镜面辅助单相机 DIC

DIC 技术^[18-20]就是将变形过程中的图像与初始状态下的图像进行匹配计算(被测目标表面要附着随机分布的散斑点),然后利用相关系数^[21]的大小来衡量匹配的优劣。在被测目标变形过程中,散斑也会随之发生位移,从变化的散斑特征中可以提取相应的目标变形信息。经过标定的双目 DIC 系统能够从被测目标中提取出变形过程中的 3D 相关信息。DIC 技术不仅可以用于测量目标的位移、应变,也可以对 3D 形貌进行立体重建。

图 1 所示为本文提出的单相机 DIC 全景相关测量系统图示。根据镜面成像规律,镜面 M1、M2 中所成的是目标背面的虚像,镜面 M3、M4 对目标前面进行成像,同时对目标背面进行二次成像。M3、M4 中的像分别全反射进入镜面 M5、M6 中供相机进行拍摄。左光路中目标前后面最终成像在 M5 中,右光路在 M6 中同样可以成目标前后的像。因此,本文所提系统既实现了光路的分离,又对目标的前后表面进行了成像。单个相机同时拍摄

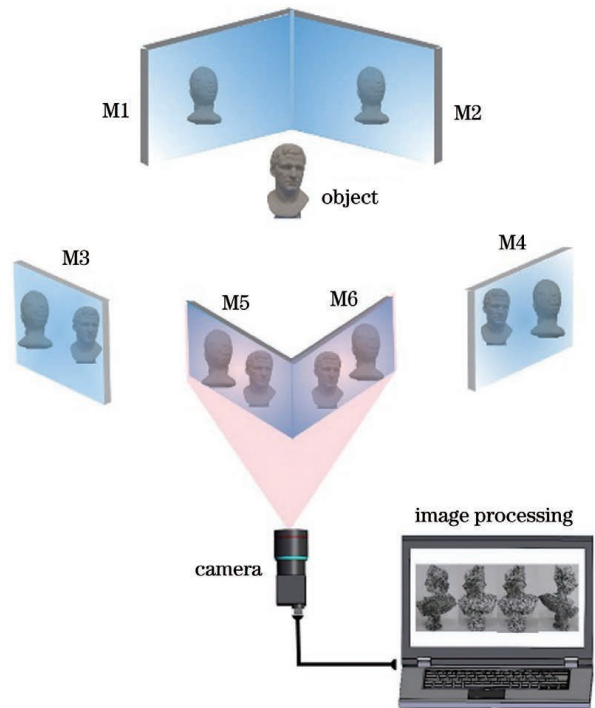


图 1 单相机 DIC 全景测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of single camera DIC panoramic measurement system

M5、M6 中的像即可获取被测目标的立体图像,DIC 对 M5、M6 中的图像进行立体匹配即可得到目标的 3D 全景立体信息。

3 测量原理

3.1 3D 点投影变换模型

平面镜多次反射以后最终可成 4 个像,这种情况也可以理解成 4 台虚拟相机的形式。多台相机拍摄同一区域完全可以实现 3D 测量,如何从两幅图像中提取 3D 点世界坐标是相关测量的关键。本研究采用常用的针孔成像模型^[22],如图 2 所示的 3D 成像模型,选取被测目标上的任一点 P_w 为成像转换过程中的研究点。含有共同视场的两台相机同时拍摄被测目标,并分别成像在两台相机的图像平面上, p_1 、 p_2 点是 P_w 分别在左右图像平面上的 2D 投影点。图 2 中, $O_{c1}X_cY_cZ_c$ 、 $O_{c2}X_cY_cZ_c$ 分别是左右两台相机的传感器坐标系统, o_1xy 、 o_2xy 是左右相机的图像坐标系统, $O_{c1}X_cY_cZ_c$ 系统的 Z_c 轴的延长线与 o_1xy 相交于图像平面上的 o_1 点。类似地,在右相机中, Z_c 轴的延长线与图像平面相交于 o_2 点。

采用棋盘格标定板^[23]可以方便地确定相机的固有参数以及相机相对于标定板的旋转和平移矢

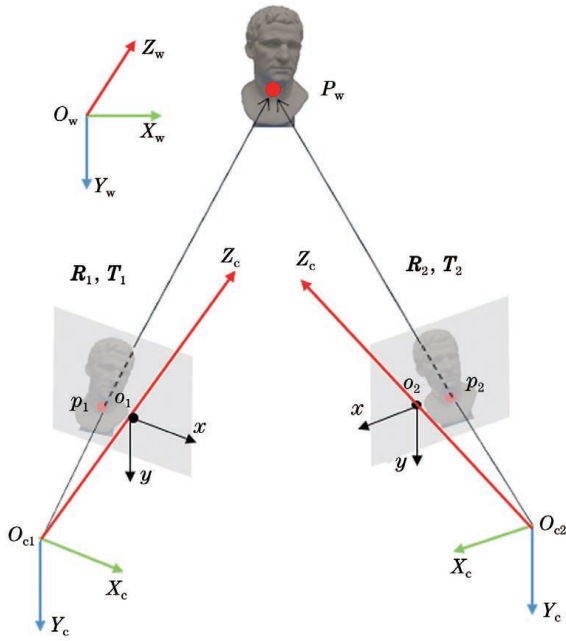


图 2 3D 成像模型

Fig. 2 3D imaging model

量。设 $P_w (X_w, Y_w, Z_w)$ 对应的图像平面点是 $p_i(u, v)$, 它们有如下成像关系:

$$\tilde{p}_i = H\tilde{P}_w, \quad (1)$$

其中,

$$H = K_i [R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}], \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2$, 对应 O_{c1}, O_{c2} 表示的两台相机; $\tilde{P}_w (X_w, Y_w, Z_w, 1), \tilde{p}_i (u, v, 1)$ 分别是 P_w 和 p_i 扩展元素以后的齐次坐标; H 是被测目标上的 3D 点到以像素为单位的 2D 图像点的变换矩阵。相机标定以后即可得到内参矩阵 K_i 、旋转矩阵 R_i 及平移向量 T_i 。

在双目系统中, 两台相机分别存在式(3)所示的关系, 经过 DIC 的匹配计算后, 可以直接从两台相机对应的 2D 图像中得到图像坐标 p_i 的值。采用最小二乘法求解式(3)即可确定空间 3D 点 $P_w (X_w, Y_w, Z_w)$ 的坐标值。

$$\begin{cases} \tilde{p}_1 = H_1 \tilde{P}_w \\ \tilde{p}_2 = H_2 \tilde{P}_w \end{cases}. \quad (3)$$

3.2 镜面成像转换

本文所提方法的全景成像过程如图 3 所示, 镜面 M1~M6 上的绿色矩形代表被测目标后面的像, 红色矩形代表被测目标前面的像。在镜面 M1~M6 的辅助下, 单相机 DIC 系统可等价为虚拟四相机立体 DIC 系统。

为了提高 DIC 系统的测量精度, 有必要根据平

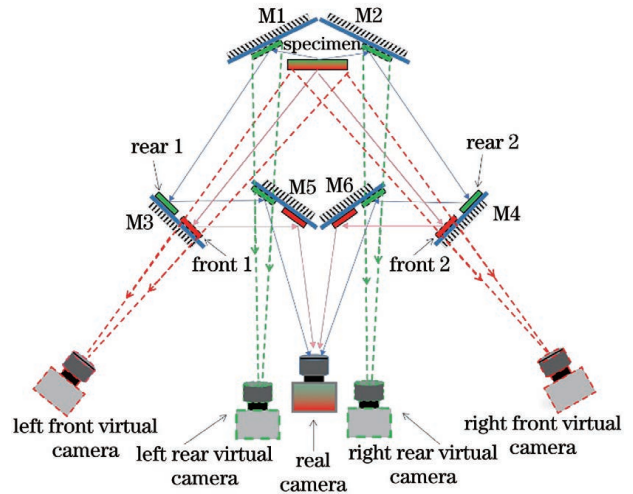


图 3 全景成像过程

Fig. 3 Panoramic imaging process

面镜进行虚实像转换。根据图 4 所示的转换关系, 虚像与实像之间的转换关系由旋转矩阵、平移向量表示为 (R_c^v, T_c^v) , 虚实相机坐标系分别建立在对应的虚像的 3D 空间坐标系统上, 也就是图中的 $O_v X_v Y_v Z_v$ 和 $O_c X_c Y_c Z_c$ 。相对于真实相机系统 $O_c X_c Y_c Z_c$, 在平面镜上建立 $O_{mc} X_{mc} Y_{mc} Z_{mc}$ 坐标系。类似地, 在反向平面镜(即平面镜背面, 也就是带有镀膜的一面)上建立相对于虚拟相机坐标系的 $O_{mv} X_{mv} Y_{mv} Z_{mv}$ 坐标系。坐标系 $O_{mv} X_{mv} Y_{mv} Z_{mv}$ 到 $O_v X_v Y_v Z_v$ 的旋转、平移转换关系为 (R_{mv}, T_{mv}) 。相机标定以后, 就可以得到真实相机坐标 $O_c X_c Y_c Z_c$ 到平面镜坐标 $O_{mc} X_{mc} Y_{mc} Z_{mc}$ 的旋转、平移关系 (R_{mc}, T_{mc}) , 用公式表示为

$$R_{mc} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, T_{mc} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

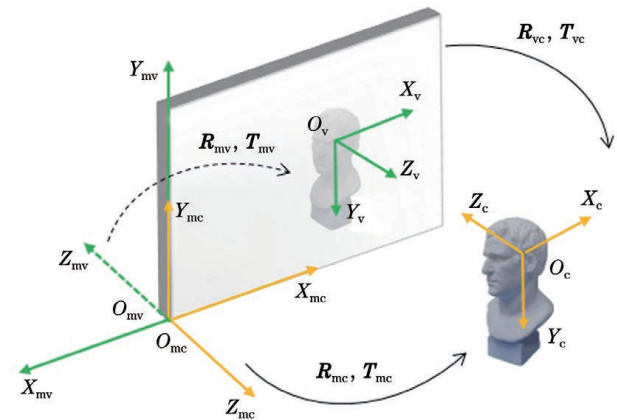


图 4 虚实像的转换关系

Fig. 4 Transformation relationship between virtual and real images

已知坐标系 $O_{mc}X_{mc}Y_{mc}Z_{mc}$ 与 $O_{mv}X_{mv}Y_{mv}Z_{mv}$ 之间是以 Y_{mc} 为旋转轴的 180° 旋转关系, 所以 $O_{mc}X_{mc}Y_{mc}Z_{mc}$ 与 $O_{mv}X_{mv}Y_{mv}Z_{mv}$ 之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_{mv} \\ Y_{mv} \\ Z_{mv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 180^\circ & 0 & -\sin 180^\circ \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin 180^\circ & 0 & \cos 180^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{mc} \\ Y_{mc} \\ Z_{mc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式(5)进一步化简, 得到

$$\begin{bmatrix} X_{mv} \\ Y_{mv} \\ Z_{mv} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_0 \cdot \begin{bmatrix} X_{mc} \\ Y_{mc} \\ Z_{mc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

虚拟相机到反向平面镜的变换与真实相机到平面镜的变换关于平面镜对称, 假设真实相机绕 X_{mc} 、 Y_{mc} 、 Z_{mc} 轴的旋转角分别为 θ_{mc} 、 φ_{mc} 、 ω_{mc} , 则虚拟相机绕轴 X_{mv} 、 Y_{mv} 、 Z_{mv} 轴的旋转角 θ_{mv} 、 φ_{mv} 、 ω_{mv} 为^[24]

$$\begin{cases} \theta_{mc} = \theta_{mv} \\ \varphi_{mc} = -\varphi_{mv} \\ \omega_{mc} = -\omega_{mv} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4), 可得虚拟相机坐标到反向平面镜的变换为

$$\mathbf{R}_{mv} = \begin{bmatrix} r_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ -r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ -r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{T}_{mv} = \begin{bmatrix} -t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(6)中平面镜与反向平面镜的旋转关系 \mathbf{R}_0 , 结合式(8)可以求解出虚拟相机到平面镜的旋转关系 \mathbf{R}_m^v , 平移向量 \mathbf{T}_m^v 没有发生变化, 因此,

$$\begin{cases} \mathbf{R}_c^v = \mathbf{R}_{mv} \cdot \mathbf{R}_0 \\ \mathbf{T}_m^v = \mathbf{T}_{mv} \end{cases} \quad (9)$$

至此, 真实相机、虚拟相机都统一在了平面镜坐标系下。根据式(4)、(9)可以完成从虚拟相机到真实相机的转换, 即:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_c^v = \mathbf{R}_m^v \cdot (\mathbf{R}_{mc})^{-1} \\ \mathbf{T}_c^v = \mathbf{T}_m^v + \mathbf{R}_c^v \cdot (-\mathbf{T}_{mc}) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)可进一步化简为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_c^v = \mathbf{R}_{mv} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot (\mathbf{R}_{mc})^{-1} \\ \mathbf{T}_c^v = \mathbf{T}_m^v - \mathbf{R}_{mv} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot (\mathbf{R}_{mc})^{-1} \cdot \mathbf{T}_{mc} \end{cases} \quad (11)$$

与文献[8-9, 25]中的虚实像转换关系相比, 本文方法省略了更多的中间量, 方法更加简单, 更具应用潜力。

4 实 验

4.1 实验装置

本节采用动、静态实验对所提方法的可行性及精度进行验证: 在动态实验中, 从应变、位移角度验证平面镜辅助单相机 DIC 系统的测量精度和全景能力; 在静态实验中, 对决策币的正反面进行 3D 重建。在平面镜成像中, 平面镜后面为虚像, 为了更好地完成 DIC 相关测量, 需要将虚像转换为实像, 虚实像之间关于镜面对称。本文方案采用多个平面镜进行成像, 因此, 为了较好地实现虚实像转换, 实验前先在文献[9]所提方法的基础上改进散斑图, 然后对平面镜的表面进行拟合。图 5 给出了平面镜拟合表面的误差云图。

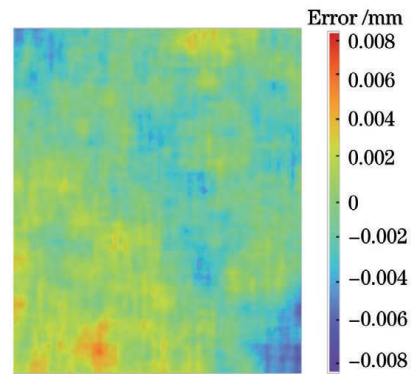


图 5 平面镜拟合表面的误差云图

Fig. 5 Error cloud map of fitted surface of planar mirror

实验装置包括立式拉力试验机、用于采集和处理图像的计算机、像素为 $2452 \text{ pixel} \times 2056 \text{ pixel}$ 的工业相机、25 mm 焦距镜头、光学平面镜(6 块)等, 被测目标为常规骨头形金属试件以及直径为 30 mm 的决策币。拉力试验机的拉伸速度设置为 1 mm/min , 同时相机的采样速率为 1 frame/s 。平面镜辅助单相机 DIC 系统的实验光路如图 6 所示。

4.2 动态拉伸测试

金属试件是常用的拉伸变形材料。在动态拉伸测试中, 相机拍摄到的视场如图 7 所示, rear 1、rear 2 是试件背面的成像, front 1、front 2 是试件前面的成像, rear 1 和 front 1 来自左光路且最终成像在 M5 中, rear 2 和 front 2 来自右光路且最终成像在 M6 中。本文方法实现了光路的分离, 图像质量满足 DIC 立体匹配的需求。

应变是衡量力学特征的重要指标之一。相机记录了试件从初始状态到 90 s 内的变形图像, 根据图 7 所示的 4 个长方形子区域, 分别计算试件在拉

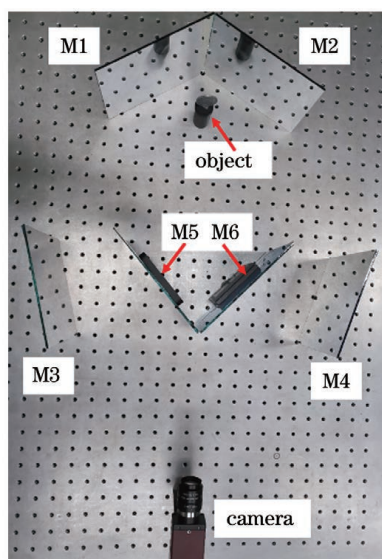


图 6 实验光路

Fig. 6 Experimental optical path

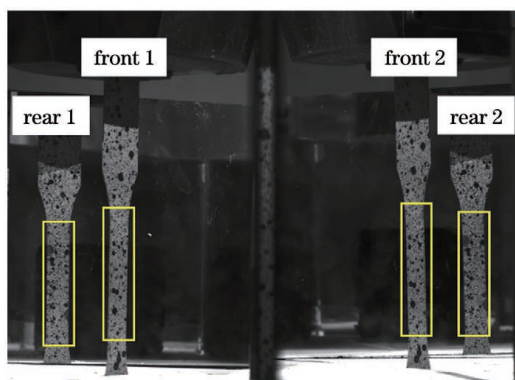


图 7 拉伸测试过程中镜中的成像关系

Fig. 7 Imaging relationship in mirrors during tensile test

伸过程中工程应变(拉伸方向的伸长量与初始长度之比)的变化情况。图 8 所示为从初始状态到 90 s 范围内 4 个子区域的工程应变曲线,从该曲线的走势可以看出 4 个子区域有着相同的变化趋势,并且精度也比较接近。此外,由图 8 还可以看出,在 70~90 s 的时间范围内,4 个子区域的工程应变存在微小的波动。出现这种现象的主要原因有两个:一是拉力机的振动对系统精度造成了影响;二是试件夹头两端难以做到完全对齐,试件形变越大,偏差也就越明显。

在 70~90 s 的时间序列中,选取波动比较明显的某一帧进行进一步的精度分析。选择 78 s 时记录的变形图像与初始状态图像进行 DIC 匹配计算,建立了如图 9 所示的工程应变云图,其中图 9(a)~(d)分别对应图 7 中从左到右的 4 个黄色计算区域。由颜色变化情况可知,图 9 中 4 个子区域云图的总体变化相似,工程应变总体在 0.0125 左右,4 个子

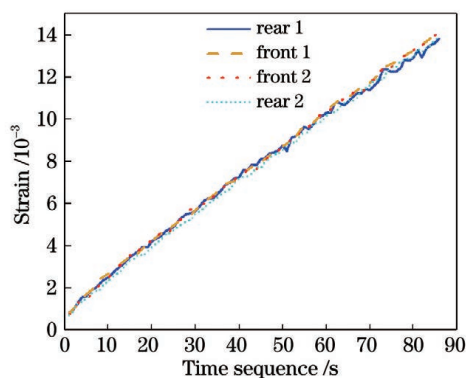


图 8 4 个子区域的工程应变

Fig. 8 Engineering strain of four sub-regions

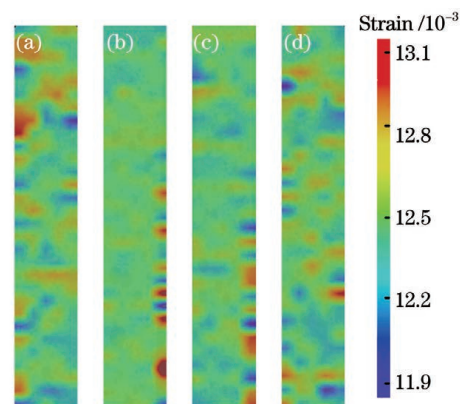


图 9 时序为 78 s 时工程应变云图。(a) rear 1 子区域; (b) front 1 子区域; (c) front 2 子区域; (d) rear 2 子区域

Fig. 9 Engineering strain cloud maps when the time sequence is 78 s. (a) Sub-region rear 1; (b) sub-region front 1; (c) sub-region front 2; (d) sub-region rear 2

区域内的工程应变都分布在 0.0119~0.0131 范围内,而且每个子区域都有接近最大、最小应变的情况。4 个子区域的云图也比较完整,区域内都没有明显的欠匹配点,这也说明了所提方法的成像质量满足 DIC 匹配计算对散斑图的要求。

位移变化也是衡量 DIC 精度的重要指标。设定步长为 0.1 mm,总位移量为 1 mm,纵向拉伸金属试件。拉伸过程中试件前后表面的位移变化如图 10 所示,前后表面的纵向位移变化始终在设定值附近,在拉伸过程中没有发生明显波动。

从位移误差角度对所提方法的计算精度进行进一步分析。从图 11 可以看出,前后表面的纵向位移误差波形比较相似,最大相对误差的绝对值在 4% 左右,且随着位移量的增加,相对误差越来越小。

4.3 3D 重建实验

动态拉伸测试验证了所提方法的应变、位移精

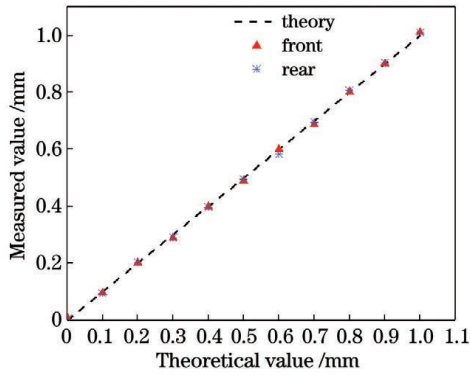


图 10 前后表面的位移变化

Fig. 10 Displacement transformation of front and rear surfaces

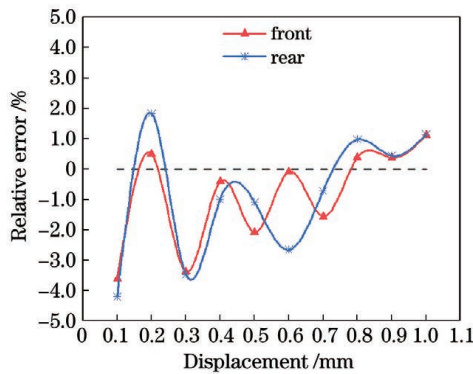


图 11 前后表面位移的相对误差

Fig. 11 Relative error of front and rear surface displacements

度和前后表面测量能力,本节将采用静态实验验证所提方法的 3D 重建能力。对普通决策币的正反面进行 3D 重建,决策币的理论厚度是 2 mm。图 12 是决策币的厚度云图,可以看出,表面纹路清晰可见,3D 重建效果较好。为了与动态拉伸测试中的制斑方式保持一致,在决策币表面喷涂散斑点,散斑点的大小会对厚度测量有轻微影响。图 13 给出了所提方法对决策币的 3D 立体重建效果,测量时为了凸显该系统的 3D 立体重建能力,仅测量了厚度的一部分区域,因此测量厚度在 1.9 mm 左右,与理论厚度存在偏差。这种偏差主要是由决策币的摆放角

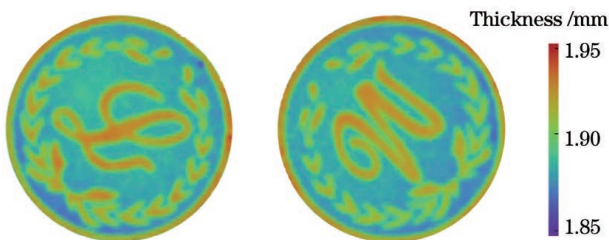


图 12 决策币的厚度云图

Fig. 12 Thickness cloud maps of decision currency

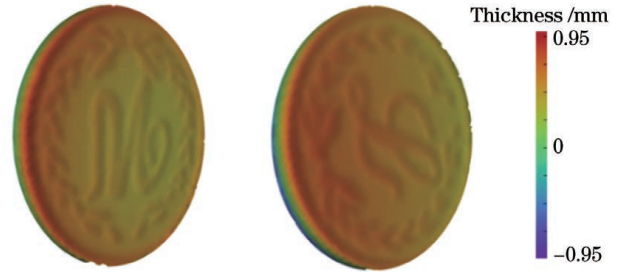


图 13 决策币的 3D 重建

Fig. 13 Three-dimensional reconstruction of decision currency

度引起的,并不是所提方法的精度、全景测量能力造成的,对测量结果没有影响。

为了验证所提方法的 3D 重建精度,本课题组建立了传统的四相机 DIC 系统进行对比。四相机测量系统的实验装置如图 14 所示,将 4 台相机分布在决策币的两面,形成两个立体 DIC 系统,相邻相机两两之间有共同视场。决策币采用图 13 所示的摆放角度。四相机 DIC 系统对决策币的 3D 重建效果如图 15 所示。两种方法都可以清晰地重建出决策币的 3D 形貌,相比于所提方法的重建效果,四相机 DIC 系统的重建轮廓相对来说清晰度更高,而且从颜色上可以看出重建以后的厚度更接近 2 mm;但是,所提方法的 3D 重建效果与四相机的重建效果并没有特别明显的区别,实验装置反而更加简洁,研究方法更具有实用价值。真实四相机 DIC 系统效果更好的主要原因有:一,相机可以直接拍摄被测目标,平面镜辅助的方式势必会引入新的误差;二,4 台相机的夹角、位置可以任意调节,更有利于清晰成像。

静态实验重建出了良好的 3D 全景效果。虚拟

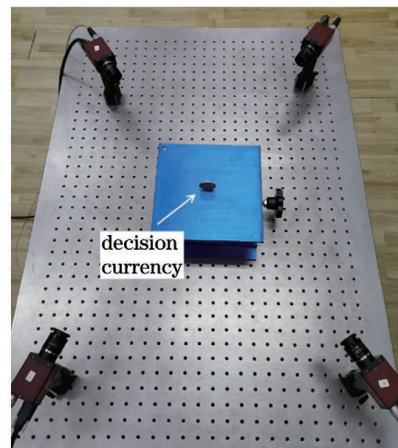


图 14 四相机测量系统的实验装置

Fig. 14 Experimental setup of four-camera measurement system

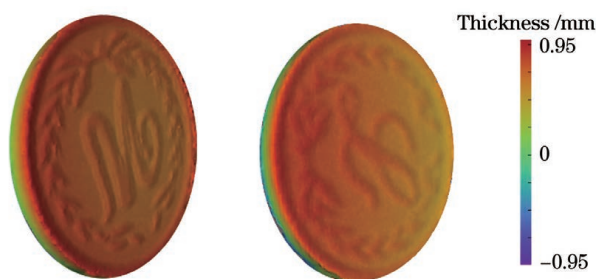


图 15 四相机 DIC 系统对决策币的 3D 重建

Fig. 15 Three-dimensional reconstruction of decision currency by four-camera DIC system

四相机立体 DIC 系统的实验装置比较简单,仅需 1 台普通工业相机和 6 块平面镜用于反射成像,相比传统的多相机 DIC 系统能有效控制成本,是一种不错的 3D 全景测量方案。

5 结 论

本文提出了一种平面镜辅助的单相机 DIC 系统,该系统将单相机的 DIC 系统扩展为 4 台虚拟相机的 DIC 系统。平面镜从不同角度对被测目标的前后表面进行成像,两个光路系统均可对被测目标的前后表面进行全景成像;光路分离为 3D 立体测量提供了可能,弥补了普通单相机 DIC 系统只能测量面内变形的缺陷。在金属试件拉伸测试中,4 个子区域有着相近的应变变化趋势,而且工程应变普遍分布在 0.0125 左右;随着拉伸量的增加,位移精度越来越高。决策币的 3D 重建实验具有良好的 3D 立体重建效果,与传统的四相机 DIC 系统相比并没有明显差别。

该系统结构形式简单,可以满足 3D 全景动态变形测量所需的必备条件,有着良好的应用前景。为了更好地适应不同应用环境的需求,后期将对光路系统进行集成化处理。

参 考 文 献

[1] 王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 200401.
Wang F, Zhao L, Wu X D, et al. Measurement and analysis of concrete deformation field based on CT and digital image correlation method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 200401.

[2] Palanca M, Tozzi G, Cristofolini L. The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review[J]. International Biomechanics, 2016, 3(1): 1-21.

[3] 潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1212001.
Pan J Y, Zhang S Q, Su Z L, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1212001.

[4] Ji Y, Li Z, Liu L P, et al. A deformation detection method for aircraft skin on uniform pressure by using speckle image correlation technology[J]. Measurement, 2020, 154: 107525.

[5] Wang Y, Lava P, Coppieters S, et al. Application of a multi-camera stereo DIC set-up to assess strain fields in an Erichsen Test: methodology and validation[J]. Strain, 2013, 49(2): 190-198.

[6] Malowany K, Malesa M, Kowaluk T, et al. Multi-camera digital image correlation method with distributed fields of view[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98: 198-204.

[7] Solav D, Moerman K M, Jaeger A M, et al. MultiDIC: an open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation[J]. IEEE Access, 2018, 6: 30520-30535.

[8] Ge P X, Wang H Q, Zhang Q, et al. Mirror-assisted multiview DIC for 360° panoramic large deformation measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 146: 106673.

[9] Ge P X, Wang H Q, Hu Y, et al. Binocular DIC system for 3D correlation measurements[J]. Applied Optics, 2021, 60(14): 4101-4108.

[10] Pan B, Yu L P, Zhang Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(1): 2-20.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Besnard G, Lagrange J M, Hild F, et al. Characterization of necking phenomena in high-speed experiments by using a single camera[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2010, 2010: 1-15.

[14] Goshtasby A, Gruver W A. Design of a single-lens stereo camera system[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(6): 923-937.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李桂华, 马万龙, 朱天天, 等. 基于数字图像相关方法的空心圆盘热变形测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1412003.
Li G H, Ma W L, Zhu T T, et al. Thermal deformation measurement of hollow disk based on digital image correlation method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1412003.
- [19] Li J R, Dan X Z, Xu W, et al. 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 95: 1-7.
- [20] 杜鉴昕, 赵加清, 王海涛, 等. 一种针对裂尖变形场测量的正则化全局 DIC 方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1112001.
Du J X, Zhao J Q, Wang H T, et al. Regularized global digital image correlation method for crack tip deformation field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112001.
- [21] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [22] Juarez-Salazar R, Zheng J, Diaz-Ramirez V H. Distorted pinhole camera modeling and calibration [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(36): 11310-11318.
- [23] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [24] Xu Z Y, Wang Y, Yang C. Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror [J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4149-4154.
- [25] Pan B, Chen B. A novel mirror-assisted multi-view digital image correlation for dual-surface shape and deformation measurements of sheet samples [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121: 512-520.

Single-Camera Digital-Image Correlation Three-Dimensional Panoramic Measurement Using Reflector Imaging

Ge Pengxiang^{1,2}, Wang Huanqing^{1,2}, Zhu Yilei^{1,2}, Wang Yonghong^{1,2*}

¹ School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

² Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei University of Technology, Anhui 230009, Hefei, China

Abstract

Objective The conventional single-camera digital-image correlation (DIC) system can only measure the in-plane deformation information of the measured object. 2D-related information cannot meet the need for high-precision measurements owing to a continuous improvement in measurement requirements. A common DIC measurement method is to use a binocular or multicamera DIC system. The binocular DIC system can obtain the measured object's in-plane and out-of-plane deformation information, as well as 3D coordinates for stereo reconstruction. Owing to the limited field-of-view of the binocular system, it can only measure a part of the surface, and the conventional binocular DIC system does not have the capability of panoramic measurement. The multicamera DIC system can realize the panoramic deformation measurement under multiple viewpoints. However, the multicamera system increases the system's size and makes the calibration process difficult. Further, it results in high application costs, which has a significant impact on the use of the multicamera DIC system. Therefore, a 3D panoramic measurement solution that is easy to use, simple to calibrate, and low in application cost is required.

Methods This paper proposed a mirror-assisted single-camera DIC system to realize 3D panoramic measurement, and the principles of plane mirror imaging and conversion of virtual and real images were derived. The single-camera DIC system utilized the imaging principle of multiplane mirrors with the assistance of six plane mirrors, allowing the front and rear surfaces of the measured object to be imaged in a common field-of-view. The left and right optical paths were imaged simultaneously, and each optical path contained two images of the front and back surfaces of the measured object. Consequently, this method divided a single camera into four virtual cameras, achieving the necessary conditions for 3D panoramic-related measurement. To better complete the conversion of virtual and real images, the projected speckle pattern was used to perform 3D reconstruction on the surface of the mirror before experiments. The feasibility and precision of the method were verified by implementing dynamic and static experiments, respectively.

Results and Discussions The optical path device (Fig. 6) is used for dynamic and static related experiments, and the conventional bone-shaped metal specimen is selected for the tensile test. As shown in Fig. 7, the four subregions are imaged in a camera field-of-view. The strain change trend of the four subregions in the same subregion is observed during 0–90 s stretching time (Fig. 8). Simultaneously, strains in the four subregions are relatively close. Further analysis is performed for the moments with larger fluctuations, and the cloud map in Fig. 9 shows that the strain differences in the four subregions are still small, with strains generally distributed at approximately 0.0125. The displacement changes in Fig. 10 and Fig. 11 show that the calculation precision of this method is higher, and as the number of displacements increases, the accuracy of the method increases continuously.

The decision currency for 3D reconstruction is chosen in a static experiment. The thickness cloud and 3D reconstruction effect of the decision currency are depicted in Fig. 12 and Fig. 13, respectively. The contour is clearer following reconstruction, and the calculated thickness value is closer to the theoretical value. The experimental effect of the four-camera DIC system is compared and analyzed with the 3D reconstruction effect of this method. Both methods can reconstruct the 3D shape of the decision currency, as illustrated in Fig. 13 and Fig. 15. The comparison reveals that the reconstruction effect of the four-camera DIC system does not have a particularly prominent advantage, which further indicates the stronger performance of the method.

Conclusions Herein, a planar mirror-assisted single-camera DIC system is proposed, which expands a single-camera DIC system to a four-virtual-camera DIC system. The plane's mirrored images can perform panoramic imaging on the front and back surfaces of the measured object from different angles, and both optical path systems can perform panoramic imaging on the front and back surfaces of the measured object. The optical path separation allows for 3D stereo measurements, which compensates for the common single-camera DIC system's ability to only measure in-plane deformation. In the tensile experiment of the metal specimen, the four subregions have similar strain changes, strain is generally distributed at approximately 0.0125, and the displacement precision increases as the tensile value increases; the 3D reconstruction experiment of the decision currency has good 3D stereo reconstruction effect, and there is no obvious difference compared with the traditional four-camera DIC system. The system has a simple structure, meets the requirements for 3D panoramic dynamic deformation measurement, and has a promising future application. Meanwhile, future works will implement the optical path system to better adapt to the needs of various application environments.

Key words measurement; digital image correlation; single camera; plane mirror imaging; panoramic measurement