

高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正

任明阳 王立忠 付白强 陈仁虹 邬宏 王岩鹏

Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement

REN Ming-yang, WANG Li-zhong, FU Bai-qiang, CHEN Ren-hong, WU Hong, WANG Yan-peng

引用本文:

任明阳, 王立忠, 付白强, 陈仁虹, 邬宏, 王岩鹏. 高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 327-338. doi: 10.37188/CO.2021-0144

REN Ming-yang, WANG Li-zhong, FU Bai-qiang, CHEN Ren-hong, WU Hong, WANG Yan-peng. Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 327-338. doi: 10.37188/CO.2021-0144

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0144>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高温下数字图像相关散斑最优成像探究

Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature

中国光学. 2018, 11(5): 728 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728>

数字图像相关中的散斑区域自动提取研究

Automatic extraction of speckle area in digital image correlation

中国光学. 2019, 12(6): 1329 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1329>

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

应用于空间精密测量的全玻璃光纤耦合器的系统设计

System design of all glass fiber couplers for precise space measurement

中国光学. 2019, 12(3): 432 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0432>

双向大气湍流光信道瞬时衰落相关特性测量

Measurement of instantaneous-fading correlation in bidirectional optical channels through atmospheric turbulence

中国光学. 2019, 12(5): 1100 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1100>

大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展

Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface

中国光学. 2019, 12(2): 214 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0214>

文章编号 2095-1531(2022)02-0327-12

高温数字图像相关法变形测量中玻璃介质误差校正

任明阳¹, 王立忠^{1,2*}, 付白强², 陈仁虹¹, 邬宏¹, 王岩鹏³

(1. 西安交通大学机械工程学院, 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安 710049;

2. 新疆大学机械工程学院, 新疆乌鲁木齐 830046;

3. 西安交通大学电器信息融合与智能控制研究中心, 陕西西安 710049)

摘要: 为了校正玻璃介质在高温变形测量中引起的测量误差, 本文将玻璃介质作为相机标定模型的一部分, 基于摄影测量技术和数字图像相关法, 提出一种复杂环境下的双目相机标定方法, 将其应用在高温变形测量中。首先, 针对复杂环境下图像质量差引起的标定困难问题, 采用带畸变校正的相机成像模型, 通过捆绑调整的相机标定方法完成双目相机标定, 提高了标定成功率和稳定性。其次, 针对复杂环境下双目相机标定精度低的问题, 分析镜头焦距、环境光干扰和玻璃与相机距离等因素对标定结果的影响, 给出最佳标定参数, 使得标定重投影误差由 0.832 个像素减少到 0.132 个像素。最后, 采用有玻璃介质的测量环境, 比较标定时有无玻璃两种情况下的测量误差, 结果表明: 本文方法能大幅减少测量误差。试验结果表明, 该方法能够有效减少高温环境下玻璃介质导致的位移场测量误差, X、Y 和 Z 轴位移场平均测量误差分别减少 70.16%、76.51% 和 40.05%。本文方法能够实现复杂环境下相机高精度标定, 标定稳定性好, 是实现高温变形准确测量的有效途径。

关键词: 数字图像相关法; 三维变形测量; 玻璃介质; 相机标定; 误差校正; 高温

中图分类号: TP391.4; O348.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2021-0144

Error correction of glass mediums in high-temperature digital image correlation deformation measurement

REN Ming-yang¹, WANG Li-zhong^{1,2*}, FU Bai-qiang², CHEN Ren-hong¹, WU Hong¹, WANG Yan-peng³

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Electrical Information Fusion and Intelligent Control Research Center,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: wanglz@mail.xjtu.edu.cn

Abstract: In order to correct the measurement error caused by a glass medium in high-temperature deformation measurement, we take a glass medium as a part of the camera calibration model. Based on photogram-

收稿日期: 2021-07-19; 修订日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51865057); 中国航发四川燃气涡轮研究院外委课题 (No. J201912024)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51865057); AECC Sichuan Gas Turbine Establishment Entrusted Project (No. J201912024)

metry technology and digital image correlation, a binocular camera calibration method in a complex environment is proposed and applied to high-temperature deformation measurements. Firstly, aiming at the calibration difficulty caused by the poor image quality in complex environments, the camera imaging model with distortion correction is adopted to achieve binocular camera calibration by bundle adjustment camera calibration method, which improves the success rate and stability of calibration. Secondly, to solve the problem of low calibration accuracy of binocular cameras in complex environments, the influence of lens focal length, ambient light interference and the distance between glass and camera on the calibration results are analyzed, and the optimal calibration parameters are given, so that the calibration reprojection error is reduced from 0.832 pixels to 0.132 pixels. Finally, the measurement error of the calibration method with and without glass is compared by using the measurement environment with a glass medium, which proves that this method can greatly reduce the measurement error. The test results show that this method can effectively reduce the measurement error of a displacement field caused by glass medium in a high-temperature environment. The maximum decrease of measurement error of the displacement field in the X , Y and Z axes is 70.16%, 76.51% and 40.05%, respectively. The method in this paper can achieve high-precision camera calibration in complex environments, and has good calibration stability. It is an effective way of realizing accurate measurement of high-temperature deformation.

Key words: digital image correlation; 3D deformation measurement; glass medium; camera calibration; error correction; high temperature

1 引言

高温环境下的变形测量对分析材料的力学性能和结构评价具有十分的重要意义,在航空航天、汽车制造和石油化工等领域有着广泛的应用前景。目前变形测量方法主要有散斑干涉法^[1]、数字图像相关法 (Digital Image Correlation, DIC) 和结构光扫描法^[2-3]等, DIC 具有非接触、光学设备简单和全场测量等优点,是应用最为广泛的高温变形场测量方法。

在高温变形测量过程中,为了保证测量的准确性需要在真实的环境下测量,高温箱能提供稳定、准确的高温环境,是当前高温变形测量的主要研究领域^[4-5]。Grant^[6]等采用滤光片和蓝光光源的方式,完成镍基高温合金在 1100°C 的温度下杨氏模量和膨胀系数的精确测量。Hammer^[7]等通过安装线性偏振片和风扇的方式,减少高温变形测量误差,实现钛合金样品在 800°C 的温度下表面高精度应变测量。Guo^[8]等采用电流加热碳纤维复合材料的方式,在高温真空试验箱内完

成了 2600°C 温度下变形场测量。国内外学者对高温环境下变形测量误差来源进行了大量研究, Su^[9]等针对高温热流扰动问题,采用灰度平均图像的方法,得到了碳化硅材料精确的热膨胀系数。段淇元^[10]等针对高温 DIC 测量中热辐射和热气流引起的图像质量差,测量精度低的问题,采用灰度平均图像法、滤光片滤波法和空气循环系统相结合的方式,提高了成像质量。误差分析主要集中在高温热辐射^[11-12]、高温箱内热气流和高温散斑质量^[13-14]等方面,然而都是从提高图像质量的角度减少测量误差,没有考虑到复杂环境下玻璃介质引起的光折射和反射等对相机成像模型的影响。

观察窗是非接触式变形测量实现的关键,高温观察窗不仅需要保证相机采集到清晰的图像,而且需要有良好的保温隔热效果,这就导致观察窗玻璃的尺寸狭小,高温变形测量时以单目相机为主,精度有限。Lyons^[15]等研究镍基高温合金在 650°C 下自然膨胀位移,发现玻璃材质本身就会影响测量精度,采用高质量光学玻璃能够减少玻璃介质引起的误差,其研究表明观察窗材质是

影响高温 DIC 测量准确性的重要因素。Su^[16] 等建立了玻璃折射误差修正模型, 分析了 420°C 高温下修正前后位移场的变化情况, 证明玻璃折射误差主要影响位移场测量精度。上述方法虽然考虑到玻璃引起的测量误差, 将玻璃影响作为图像中的噪声处理, 但是高温变形测量结果不稳定, 存在“弱相关”问题。与单目相机相比双目测量精度高, 结果稳定性好, 但是由于玻璃介质的存在, 采用传统的张正友标定法进行标定时存在标志点检测困难, 标定成功率低, 重投影误差^[17] 极大等问题, 而且现有的相机标定精度影响因素^[18-20] 中都没有考虑玻璃影响。

为了消除玻璃介质引起的高温 DIC 变形测量误差, 本文将玻璃介质引入相机成像模型, 分析复杂环境下影响双目相机标定精度的主要因素, 实现了双目相机的高精度标定, 并在常温下比较标定前后系统的测量精度。高温变形场测量试验表明, 本方法能够有效减少玻璃介质引起的变形测量误差, 实现高温变形场的精确测量。

2 基本原理

2.1 相机成像模型

相机通过透镜将物体点投影到成像平面上, 理想的投影成像模型是几何光学中的小孔成像模型。然而在设备制造调试过程中存在误差, 像平面中心点坐标即主点坐标并不严格为零, 而存在微小位移值, 另外由于相机镜头的物镜畸变等因素的存在, 使得各像点在像平面上相对其理论位置也存在偏差, 因此, 实际的成像模型如图 1(彩图见期刊电子版)所示, 共线方程为:

$$x - x_0 + \Delta x = -f \frac{X_c}{Z_c} \quad (1)$$

$$y - y_0 + \Delta y = -f \frac{Y_c}{Z_c} \quad (2)$$

式中 (x, y) 为图像点坐标, (x_0, y_0) 是主点坐标, f 为焦距, $(\Delta x, \Delta y)$ 为畸变量, (X_c, Y_c, Z_c) 是物方点坐标在坐标变换后得到的相机坐标系中的坐标。

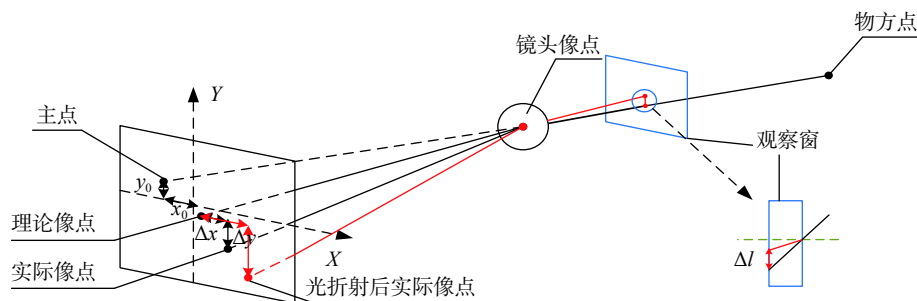


图 1 实际相机成像模型

Fig. 1 The actual camera imaging model

三维世界坐标下任取一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$, 引入齐次方程, 通过旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 进行坐标变换, \mathbf{O}_3^T 为零阵, 此时相机坐标系下 P 的坐标可以表示为 (X_c, Y_c, Z_c) , 转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{O}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

实际成像中存在径向畸变、面内畸变和切向畸变等多种畸变影响, 综合考虑以上 3 种畸变的影响, 建立相机的畸变模型为:

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_t + \Delta x_p \quad (4)$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_t + \Delta y_p \quad (5)$$

x 和 y 方向的径向畸变为:

$$\Delta x_r = K_1 x r^2 + K_2 x r^4 + K_3 x r^6 \quad (6)$$

$$\Delta y_r = K_1 y r^2 + K_2 y r^4 + K_3 y r^6 \quad (7)$$

x 和 y 方向的切向畸变为:

$$\Delta x_t = B_1 (r^2 + 2x^2) + 2B_2 xy \quad (8)$$

$$\Delta y_t = 2B_1 xy + B_2 (r^2 + 2y^2) \quad (9)$$

x 和 y 方向的面内畸变为:

$$\Delta x_p = E_1 x + E_2 y \quad (10)$$

$$\Delta y_p = 0 \quad (11)$$

式中 K_1, K_2, K_3 为径向畸变系数, B_1, B_2 是切向畸变系数, E_1, E_2 是面内畸变系数, r 为图像点距离图像中心的距离。

在图 1 中, 分析了玻璃对成像模型的影响, 物方点坐标发射出的光线经过玻璃折射发生了偏移 Δl , 经过小孔成像计算后实际像点会再次产生微小的移动, 此时物方点在像平面上的投影为光折射后的实际像点, 变形测量过程中, 没有通过标定修正相机的成像模型会引起较大测量误差。

实际的标定过程中的光路如图 2 所示, 为了更好的说明这一过程, 将双层玻璃对光路的影响等效成单层玻璃。图 2 中 $A-C-B_2$ 光路表示图 1 中实际像点的光路, 引入畸变和主点偏差后, 修正成图 2 中 $A-C-B_1$ 的理想光路, 然而由于玻璃折射影响, 焦点处入射角由 α 增加到 α_1 , 光路 $C-B_2$ 偏折到 $C-B_3$, 此时将光折射后实际像点光路等效为 $A-C-B_3$ 。

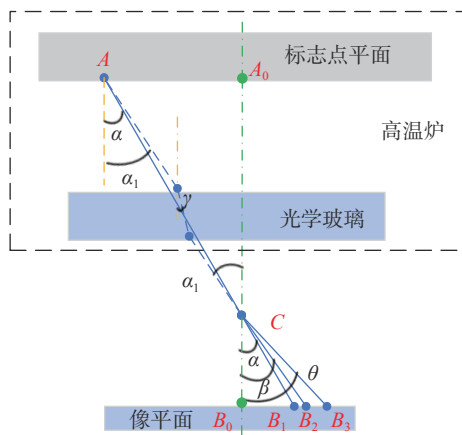


图 2 相机标定的光路图

Fig. 2 Camera calibrated light path diagram

本文通过在玻璃介质下标定, 将实际像点模型进行进一步修正, 用光折射后实际像点成像模型进行测量, 能够有效提高测量精度。

2.2 基于捆绑调整的相机标定

针对传统的张正友标定法在复杂环境下标定困难的问题, 采用一种基于模糊标定图像边缘强化的 Canny 检测方法, 将棋盘格标定板更换成圆形标定板, 以减少由于标定板边缘区域折射误差

大, 标志点识别精度低, 相机无法成功标定的情况, 在此基础上本文采用了基于捆绑调整的相机标定方法, 提高标定的精度。

首先, 建立成像模型的线性化误差方程, 如下:

$$V = AX_1 + BX_2 + CX_3 - L \quad (12)$$

式中 V 为像点坐标残差, X_1, X_2, X_3 是内参数、外参数和物方点坐标的修正数, A, B, C 分别为内参数、外参数和物方点坐标对应的偏导数矩阵, L 是图像点坐标。

其次, 通过前方交会、后方交会完成相机内外参数初值的求解。为了保证标定结果的稳定性, 选择标定板中一对精确的标志点距离预估相机的内外参数, 然后根据内方位参数和物方点的坐标计算外方位参数, 即后方交会:

$$V = BX_2 - L \quad (13)$$

将相机的内外方位参数固定, 求解物方点坐标, 进行前方交会:

$$V = CX_3 - L \quad (14)$$

最后, 通过最小二乘法迭代优化相机的内外方位参数和物方点三维坐标, 完成整体的光束平差实现高精度的相机标定。

相机标定的整体过程如下, 首先是提取图像上的标志点, 识别编码点编号完成标志点检测, 其次根据编码点完成定向重建, 根据两幅图像中共有的编码点完成相对定向, 利用空间前方交会和后方交会计算出非编码点的三维坐标, 最后则是采用光束平差算法完成内外参数高精度求解。

2.3 数字图像相关法

数字图像相关法是将随机分布的散斑图案作为物体变形信息的载体, 通过比较变形前后的数字图像从而获得物体表面的位移和应变信息。数字图像相关法的基本原理如图 3 所示, 在参考图

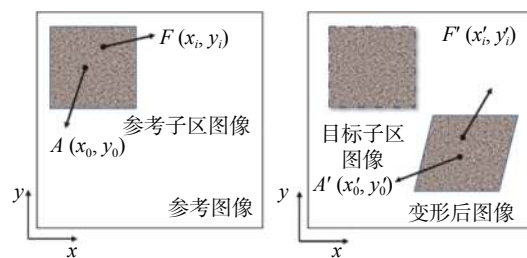


图 3 数字图像相关法

Fig. 3 Digital image correlation method

像 $F(x, y)$ 中, 取以待匹配点 $A(x_0, y_0)$ 为中心 $(2M + 1) \times (2M + 1)$ 像素大小的矩形区域作为参考子区, 通过预先定义好的相关系数函数, 计算出参考子区图像与变形后图像 $F'(x'_i, y'_i)$ 的相关性, 从中选取相关性最大的区域作为目标子区图像, 进一步求得该区域中心 $A'(x'_0, y'_0)$ 的坐标, 最终确定位移场和应变场。

三维数字图像相关方法是一种将二维数字图像相关方法和立体视觉原理相结合的光学测量方法。采集图像前需要先进行双目相机标定, 获取相机的内、外方位参数, 然后使用两个或多个相机拍摄试件变形过程中的图像, 根据立体视觉匹配和时序匹配原理计算出三维点的空间坐标信息, 最后通过对比前后两个状态下三维坐标变化

求解出位移场或应变场。

3 高温观察窗标定试验

本文采用的试验系统如图 4(彩图见期刊电子版)所示, 包含光学测量装置和高温拉伸装置。光学装置主要由两台高精度工业相机、光源、控制箱、计算器、标定板、固定装置及各类连线等部分与本课题组自主研发的变形测量计算软件(XJTUDIC)组成。高温拉伸装置主要有拉伸试验机(深圳万测)和带观察窗(双层光学石英玻璃)的高温试验箱, 高温试验箱的温度范围为(常温 \sim 300°)。

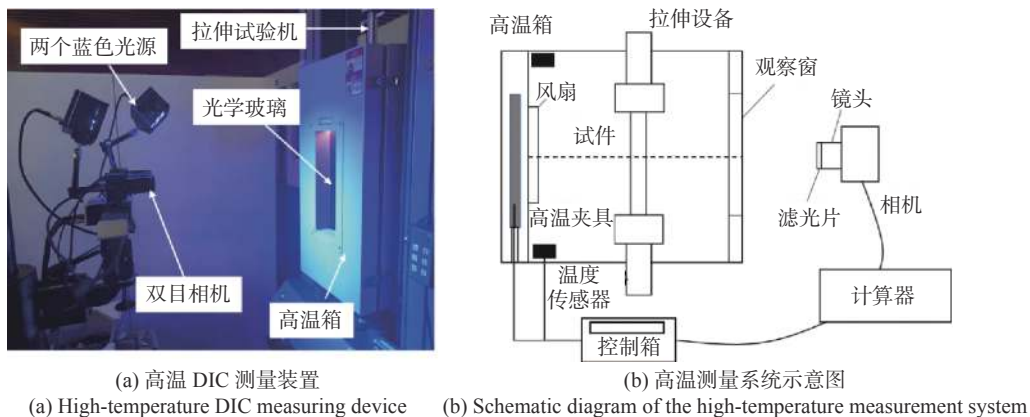


图 4 高温 DIC 测量试验系统

Fig. 4 High-temperature DIC measurement system

3.1 相机标定精度影响因素

三维 DIC 和二维 DIC 相比测量精度更高, 但是在复杂环境下的标定十分困难, 这也是目前高温 DIC 测量中仍以单目相机为主的原因。考虑到实际场景下的标定困难, 在实验室中搭建如图 5 所示的相机标定场景, 选择与观察窗材质相同的耐高温光学石英玻璃代替观察窗, 厚度为 3 mm, 工业相机型号为 BaslerUsb3.0, 分辨率为 2448 pixel \times 2048 pixel, 相机幅面是 400 mm \times 300 mm, 标定板是尺寸为 150 mm \times 150 mm 的铝合金标定板, 2 个蓝光 LED 光源。

双目相机标定精度受外部因素和系统本身影响, 为了验证系统的精度, 在没有光学石英玻璃情况下进行标定, 焦距选择 50 mm, 调整好相机标定参数, 多次标定的平均重投影误差仅为 0.031 个

像素, 说明在没有玻璃的情况下系统标定精度足够高, 本文仅讨论有光学石英玻璃时镜头焦距, 玻璃与镜头距离和环境光对标定精度的影响。

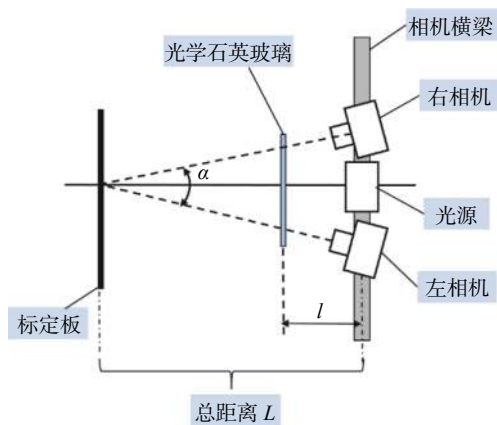


图 5 实验室相机标定场景

Fig. 5 Camera calibration scene in laboratory

3.1.1 焦距对相机标定精度的影响

在图 5 所示的试验场景下, 玻璃与相机之间的距离设置为固定值 100 mm, 采用不同焦距的镜头标定, 不同焦距下的重投影误差如表 1 所示, 由表 1 中数据可知, 随着焦距的增大, 相机标定的重投影误差也逐渐增加, 标定精度在不断下降, 与 8 mm 焦距相比, 50 mm 焦距重投影误差增加了 66.7%, 采用 75 mm 焦距后重投影误差增加了 100%, 而且焦距值越大, 标定距离越长, 标定难度更高, 因此需要尽可能选择短焦距的镜头。

表 1 不同焦距下的重投影误差

Tab. 1 The reprojection error at different focal lengths

焦距/mm	8	12	16	25	50	75
Sigma/pixel	0.024	0.030	0.039	0.024	0.040	0.048

焦距大小直接决定相机与标定物之间的距离和光路折射的长度, 因此, 需要选择合理的焦距值。在图 4 所示的高温环境箱中, 分别选择焦距为 25 mm, 50 mm 和 75 mm 的镜头进行标定试验, 采用焦距为 25 mm 的镜头标定时, 根据相机的参数计算出最佳标距, 受观察窗尺寸的限制, 无法完整采集到可以识别的标志点图像。采用 50 mm 和 75 mm 焦距的镜头时, 能够成功标定, 标定的重投影误差分别为 0.514 和 0.832 个像素, 明显高于实验室环境下的重投影误差, 分析原因如下: (a) 实际标定时是双层玻璃, 光路折射比单层更加复杂; (b) 实际场景中外界环境光干扰明显; (c) 实验室场景下为了确保标定成功, 玻璃与镜头的距离很小并且是定值。

3.1.2 玻璃与相机距离对标定精度的影响

选择焦距为 50 mm 的镜头在图 5 所示的试验场景下标定。根据相机参数计算出最佳测距为 820 mm, 将 L 设置为 820 mm, 将相机到镜头的初始距离 l 设置为 50 mm, 每隔 50 mm 进行一次标定, 重复这一标定过程, 直到玻璃距相机 800 mm 时, 一共进行 16 次标定, 记录下标定的重投影误差, 结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 随着玻璃与相机距离的增加, 标定的重投影误差会逐渐增加后趋于稳定, 而且当玻璃与相机的距离达到 500 mm 时, 标定重投影误差逐渐稳定, 最终稳定在 0.08 个像素左

右, 采用二次函数拟合, 拟合后的关系为 $y = -6.57 \times 10^{-8} x^2 + 1.25 \times 10^{-4} x + 0.024$, 式中 x 为标定距离, y 为重投影误差。玻璃与相机越远, 图 2 中 α_1 与 α 之间的夹角越大, 像平面上 B_1 点的偏移越大, 这不仅会增加标定难度而且也会使重投影误差更大。

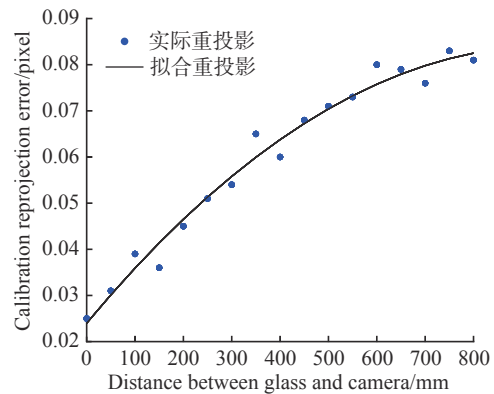


图 6 玻璃与相机距离对标定精度的影响

Fig. 6 Influence of the distance between the glass and the camera on calibration accuracy

在图 4 所示的场景下进行标定, 标定板与光学石英玻璃的距离固定不变(约为 150 mm), 将两相机之间的距离调整到横梁上最小位置, 然后调整双目相机角度, 使得标定板编码点能完全采集到, 此时通过相机上的红外测距装置测得标定板与相机距离为 520 mm, 分别在 520, 580 和 640 mm 的测量距离下标定, 520 mm 标定的重投影误差仅为 0.132 个像素。

3.1.3 环境光干扰对相机标定精度的影响

高温箱中标定板放置如图 7(a) 所示, 图 7(b) 是采集到的标定板图像, 考虑到高温箱中环境较暗, 采用蓝光光源和箱内灯光同时调整的方式, 确保标定板上光照充足, 另外箱体表面的强反光使得编码点检测困难, 采用箱体外表面加遮光布的方式, 减少强光反射引起的过曝光, 最终采集到的标定图像为图 7(c), 标志点可以完全识别。

为了分析环境光干扰对标定精度的影响, 分别采用关闭内部灯光、用遮光布和窗帘来减少环境光虚影等方式进行标定, 两种情况下标定的重投影误差分别为 0.139 个像素和 0.135 个像素, 证明内部光照不均匀和环境光干扰对本文采用的方法影响很小。

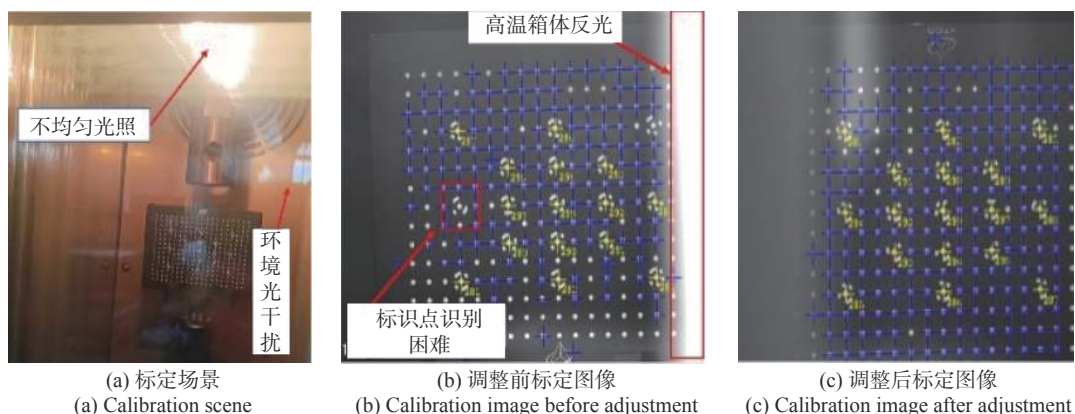


图 7 实际标定环境

Fig. 7 Actual calibration environment

3.2 模型修正后系统精度验证

为了证明标定有玻璃能够有效减少玻璃介质引起的折射误差, 本文在图 4 的试验场景下进行常温平面测量试验, 采用以下三种方案进行精度验证。

方案一: 相机标定时没有观察窗, 采集散斑图案时同样没有观察窗, 作为参考组。方案二: 相机标定时没有观察窗, 采集散斑图案时有观察窗, 作为对照组。方案三: 相机标定时有观察窗, 采集散斑图案时也有观察窗。每种方案采集 15 组散斑图像, 间隔为 1s, 采用均方根误差和标准差分析位移场和应变场。均值误差定义:

$$E_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (U_{ij} - u_{ij})}{NM}, \quad (15)$$

其中 i, j 为当前网格点的位置, N, M 为网格点的总行数和总列数, E_{μ} 为总变形量的均值误差, U_{ij} 为当前网格的变形测量值, u_{ij} 为每个点的真实变形, 由于试件温度始终与环境温度一致, 真实应变值应该为零。

令 \bar{U}_{ij} 表示测量真实值的均值, 则标准差 STD 计算公式如下:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (U_{ij} - \bar{U}_{ij})^2}{NM}}. \quad (16)$$

3.2.1 玻璃对位移场测量精度的影响

由图 8 可知, 方案一总位移均值仅为 0.419 个像素, 标准差为 0.068 个像素, 由于测量时引入

玻璃介质干扰, 方案二总位移均值为 3.207 个像素, 标准差为 0.326 个像素, 采用标定修正后的相机成像模型, 总的位移均值仅为 1.604 个像素, 与方案二相比误差减少了 49.99%, 标准差为 0.268 个像素, 数据依然有很好的稳定性。

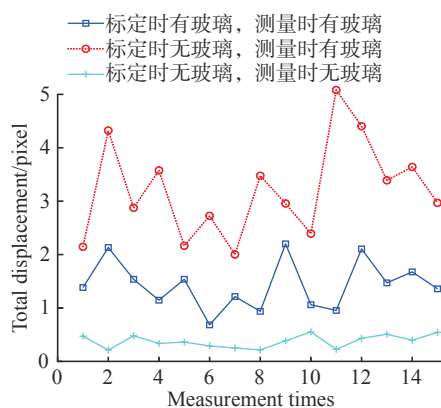


图 8 总位移均值

Fig. 8 Mean values of total displacement

在实际的位移场计算过程中, 玻璃会在图像中产生明显的噪声, 有时甚至导致采集到的图像无法处理, 而将玻璃影响引入成像模型, 不仅能够保证测量结果更加准确, 还具有很好的稳定性。

图 9 (彩图见期刊电子版) 为不同方向的位移均值和标准差, 从中可以看出, 玻璃折射引起的测量误差在不同方向上并不是相同的, 比较方案二和方案三可知, X 轴方向测量误差最大, 其次是 Z 轴方向, 最后是 Y 轴方向; 其中 X 轴方向方案二中测量误差为 1.56 个像素, 方案三为 0.93 个像素, X 轴方向位移误差减少了 40.73%; Z 轴方向方

案二中的测量误差为 0.971 个像素, 方案三仅为 0.263 个像素, 测量误差减少的幅值为 72.96%, Y 轴方向误差减少幅值为 4.99%。

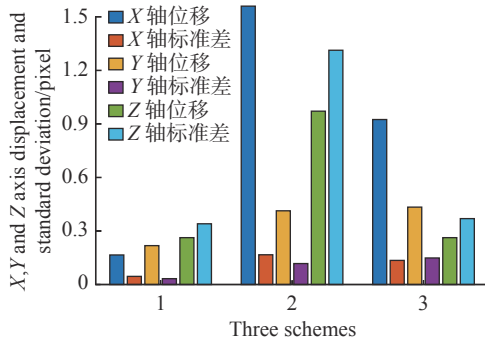


图 9 X, Y 和 Z 轴方向的位移均值和标准差

Fig. 9 Mean value and standard deviation of displacement in X, Y and Z axes

本文进一步比较相机标定后的内外参参数, 发现主点偏差 x_0 由标定前的 -38.19 个像素变为 -830.41 个像素, 变化量为 792.22 个像素, 而主点偏差 y_0 则由 -16.56 个像素变为 -186.13 个像素, 变化量为 169.57 个像素。玻璃介质引起的测量误差主要集中在 X 轴, 而且相机成像模型中 X 轴方向主点偏差明显高于 Y 轴。

3.2.2 玻璃对应变场测量精度的影响

由图 10 可知, 玻璃介质对应变场计算影响很小, 与参考文献 [16] 中 DIC 测量中应变计算不受光学玻璃影响的计算结论一致。

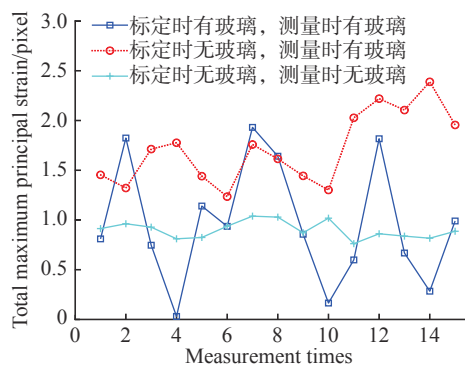


图 10 最大主应变均值

Fig. 10 Mean values of maximum principal strain

方案一种应变均值为 $0.901 \mu\epsilon$, 方案二中的应变均值为 $1.675 \mu\epsilon$, 方案三中的应变均值为 $0.902 \mu\epsilon$, 比较方案一和方案三应变均值基本相等, 这是由于系统中进入了柯西-格林应变张量^[21], 故在计算玻璃折射引起的较大变形时依然

有很高的精度。比较方案二和方案三可知, 应变测量误差减少了 32.25%, 然而方案二的标准差为 $2.265 \mu\epsilon$ 远高于方案三的标准差 $1.274 \mu\epsilon$ 和自身的应变值, 说明数据结果极不稳定, 并不能说明减少了测量误差。

图 11 中进一步分析了 X, Y 方向的应变均值和标准差, 从图中可以看出, 两个方向的标准差都明显高于应变值。方案二和方案三中的 X 方向位移小于方案一中的值, 而且 Y 轴方向应变还出现负值, 同样说明了 33.25% 的测量误差减少量是由于数据本身的不稳定导致。

上述试验表明, 标定有玻璃能够有效减少位移场的测量误差, 而对应变场的测量误差影响很小, 并且在 X, Y 和 Z 轴上的测量误差减少的幅值并不相同。

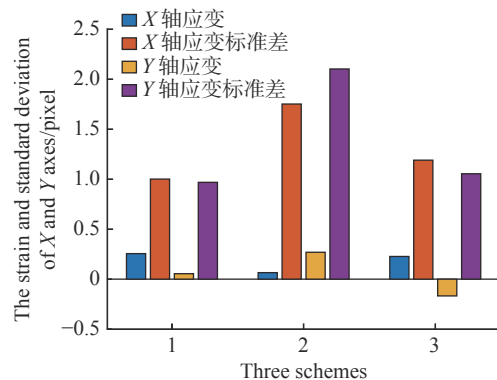


图 11 X, Y 轴方向的应变均值和标准差

Fig. 11 Strain mean value and standard deviation in the X and Y directions

4 高温下位移场测量

本文考虑了高温试验箱的工作条件, 尽可能减少高温热辐射和高温热气流等对测量精度的影响, 选择热变形明显的非金属试件以增强试验效果。高温应变测量实验的试件为 PPS(A504X90 日本东丽玻纤增强 40%), 该材料的耐温度为 260°C , 采用标定时无玻璃、测量时有玻璃和标定时有玻璃、测量时有玻璃两种方式, 初始试验温度为 50°C , 采集散斑图像, 测量温度升高到 120°C 时试件的位移场。

4.1 位移场分析

位移场如图 12(彩图见期刊电子版)所示。试件在受热膨胀过程中, 沿 Y 轴方向伸长, 位移测

量绝对值偏大, X 和 Z 轴方向收缩, 位移测量绝对值偏小, 因此, 需要分别分析不同方向上的位移场。图 12(a)~12(c) 分别表示标定时无玻璃, 测量时有玻璃方案中 X 轴方向, Y 轴方向和 Z 轴方向位移场。图 12(d)~12(f) 分别表示标定时有玻璃, 测量时有玻璃方案中 X 轴方向, Y 轴方向和 Z 轴方向位移场。

从图 12 可以看出, 两种方式测量得到的位移场有相同的变化趋势。比较图 12(a) 和 12(d), 图像中间区域等高线位置间隔密集且均匀, 边缘区

域光路折线发生明显偏移, 虽然图 12(a) 中位移变化趋势与图 12(d) 相同, 但是数值低于图 12(d)。图 12(b) 和图 12(e) 是不同情况下 Y 轴方向的位移场, 在图像的边缘区域, 标定后的图像测量结果更加均匀。与单目相机测量相比, 双目相机能够得到 Z 轴方向精确的位移场, 通过比较图 12(c) 和图 12(f), 发现玻璃折射对 Z 轴方向测量精度产生了影响。这一结果表明, 玻璃引起的折射误差在图像边缘处产生了明显的影响, 通过高精度相机标定, 能够减少各个方向的折射误差。

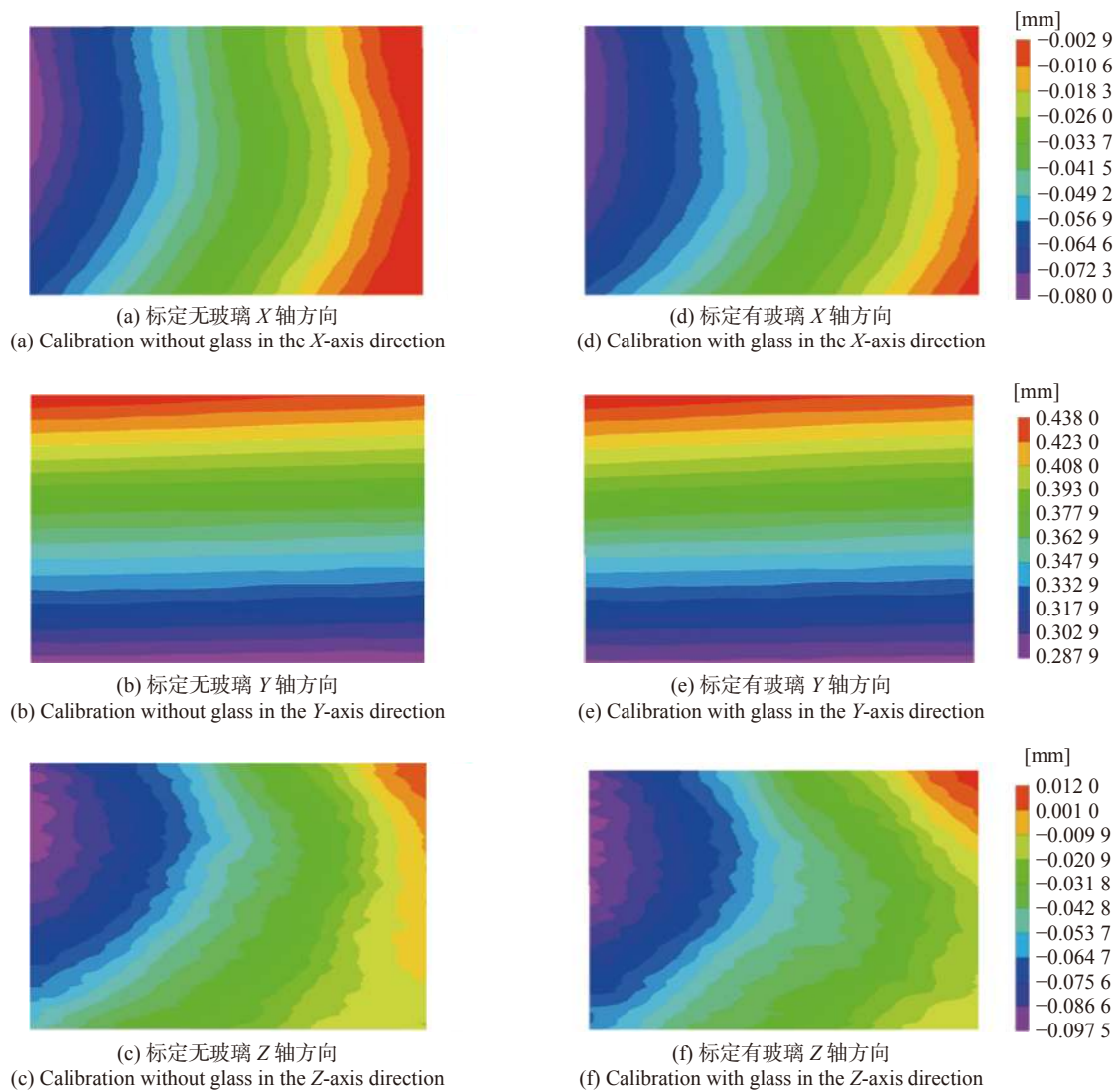


图 12 试件 50°到 120° X, Y, Z 轴方向位移场变化图像

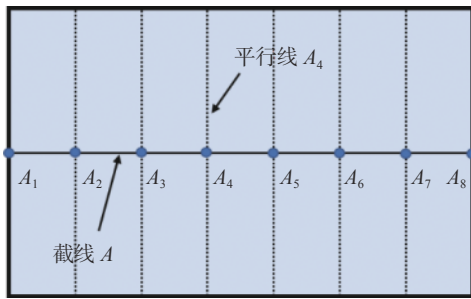
Fig. 12 Displacement variation in the X, Y and Z directions for the calibration with and without glass with temperature from 50 °C to 120 °C

4.2 位移场误差分析

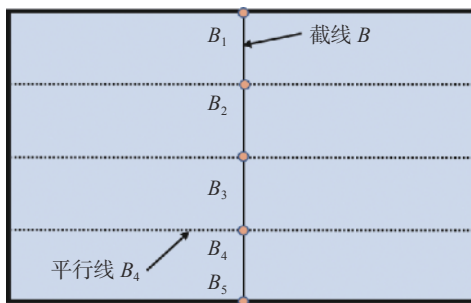
为了进一步分析标定修正后的相机模型能够减少高温下玻璃介质引起的位移场误差, 本文采

用图 13(a) 和图 13(b) 所示的测量坐标系进行分析, 其中 X 和 Z 轴采用图 13(a) 测量坐标系, Y 轴采用图 13(b) 测量坐标系。不同平行线上的高温

位移场均值和测量误差如图 14(彩图见期刊电子版)所示。



(a) X 和 Z 轴参考坐标系
(a) Reference coordinate system for X and Z axis



(b) Y 轴参考坐标系
(b) Reference coordinate system for Y axis

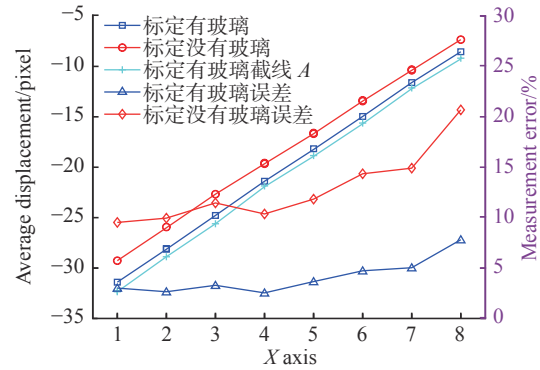
图 13 测量坐标系及关键点

Fig. 13 Measurement coordinate system and key points

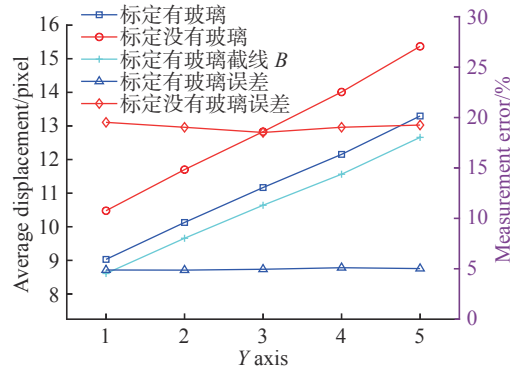
试件上距离测量坐标平面中心点越远, 玻璃折射误差越大^[16], 每条平行线与截线相交的关键点是该平行线上受折射误差影响最小的位置, 位移与真值最为接近, 在进行测量误差分析时, 选择标定时有玻璃方案中截线 A, B 上关键点作为参考值, 验证标定后高温 3DDIC 系统的测量精度。

由图 14(a) 可知, 玻璃折射引起的测量误差使得测量绝对值偏小, 平行线 A_1 到 A_8 由玻璃折射引起的测量误差有逐渐增加的趋势。标定无玻璃的最大误差为 A_8 点的 20.69%, 而标定有玻璃时仅为 7.74%; A_4 点的测量误差降幅最大, 由标定无玻璃的 10.36% 降低到标定有玻璃的 2.36%, 降幅为 76.26%。上述结果表明在不同区域测量误差变化明显, 比较两种方法在 X 方向总的误差均值, 标定无玻璃的测量误差为 11.76%, 标定有玻璃的测量误差为 3.51%, 测量误差降幅为 70.16%。

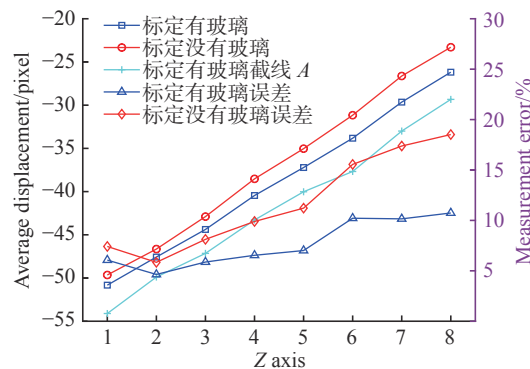
不同方向平行线位置均值如图 14 所示。比较图 14(a) 和图 14(c) 可以发现, Z 轴方向与 X 轴方向变化趋势保持一致, 都是左侧测量误差小, 右侧误差明显增加。标定无玻璃的最小误差为



(a) X 轴方向位移
(a) Displacement in the X-axis



(b) Y 轴方向位移
(b) Displacement in the Y-axis



(c) Z 轴方向位移
(c) Displacement in the Z-axis

图 14 不同方向平行线位移均值

Fig. 14 The mean displacement of parallel lines in different directions

A_2 点 5.84%, 标定后为 4.64%; A_8 点没有玻璃标定的测量误差最大为 18.52%, 标定后减少为 10.74%, 此时降幅最大 42.02%。Z 轴方向总的测量误差均值在没有玻璃标定的情况下为 12.14%, 有玻璃的测量误差减少到 7.28%, 测量误差降幅为 40.05%。

而在图 14(b) 两种方案 $B_1 \sim B_5$ 测量误差变化幅度很小, 其中 B_1 处标定无玻璃的测量误差最大为 19.52%, 标定后的误差仅为 4.88%, 此时降幅

最大为 75.02%。上述结果表明 Y 轴在不同区域测量误差变化很小, 比较两种方法在 Y 方向总的误差均值, 标定无玻璃的测量误差为 21.18%, 标定有玻璃的测量误差为 4.97%, 测量误差降幅为 76.51%。

上述结果表明, 相机标定后 X、Y 和 Z 轴方向由于折射引起的测量误差都明显减少。因此能够有效证明在高温 3DDIC 测量过程中, 标定时有玻璃能够减少由于玻璃折射引起的测量误差。另外, 本方法同样可以应用在飞机高速变形测量中外加有机玻璃保护罩和水中三维变形测量。

5 结 论

本文研究了高温变形测量中玻璃介质对 3DDIC 测量精度的影响, 通过完成带玻璃介质的高精度相机标定, 减少了玻璃介质引起的高温

DIC 测量误差。

(1) 基于捆绑调整的双目相机标定方法, 实现了复杂环境下的双目相机标定。具有高的成功率和稳定性。

(2) 针对玻璃介质环境下双目相机标定精度低的问题, 通过分析相机焦距、相机与玻璃的距离和环境光干扰, 给出了最佳的标定参数, 标定重投影误差仅为 0.132 个像素。

(3) 玻璃介质对位移场测量精度的影响很大, 但是对于应变场测量误差影响很小。标定时考虑玻璃介质能够减少 49.99% 的位移测量误差。

从高温位移场的测量结果可知, 标定修正相机成像模型能减少各个方向位移场测量误差, X 轴方向位移场减少的平均误差为 70.16%, Y 轴方向位移场减少的平均误差为 76.51%, Z 轴方向位移场减少的平均误差为 40.05%, 说明本方法能够有效减少高温下玻璃介质引起的测量误差。

参考文献:

- [1] 郜魏柯, 杜小平, 王阳, 等. 激光散斑目标探测技术综述[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1182-1193.
GAO W K, DU X P, WANG Y, *et al.*. Review of laser speckle target detection technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1182-1193. (in Chinese)
- [2] 王永红, 张倩, 胡寅, 等. 显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 447-457.
WANG Y H, ZHANG Q, HU Y, *et al.*. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 447-457. (in Chinese)
- [3] 祝祥, 邵双运, 宋志军. 基于线结构光传感器的轨道板几何形貌检测方法[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 841-850.
ZHU X, SHAO SH Y, SONG ZH J. A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [4] 乔美霞, 潘志伟, 黄生洪, 等. 真空环境下钨材料高温形变的数字相关测量技术研究[J]. *实验力学*, 2020, 35(4): 557-566.
QIAO M X, PAN ZH W, HUANG SH H, *et al.*. Investigation on digital image correlation measurement technique for high temperature deformation of tungsten materials in vacuum environment[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(4): 557-566. (in Chinese)
- [5] MAO W G, WANG Y J, HUANG H Y, *et al.*. In situ characterizations of mechanical behaviors of freestanding $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ coatings by bending tests under different temperatures based on digital image correlation[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(2): 491-502.
- [6] GRANT B M B, STONE H J, WITHERS P J, *et al.*. High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, 44(4): 263-271.
- [7] HAMMER J T, SEIDT J D, GILAT A. Strain measurement at temperatures up to 800°C utilizing digital image correlation[M]//JIN H, SCIAMMARELLA C, YOSHIDA S, *et al.*. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, Volume 3. Cham: Springer, 2014: 167-170.
- [8] GUO X, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement captured with filters at 2600°C using spraying to form speckle patterns[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 063101.
- [9] SU Y Q, YAO X F, WANG SH, *et al.*. Improvement on measurement accuracy of high-temperature DIC by grayscale-average technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 75: 10-16.

- [10] 段洪元, 宫文然, 郭保桥, 等. 高温数字图像相关方法中的制斑和图像处理技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6): 425-431.
DUAN Q Y, GONG W R, GUO B Q, *et al.*. Techniques of speckle fabrication and image processing for high temperature digital image correlation[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2019, 59(6): 425-431. (in Chinese)
- [11] WANG H Q, ZHANG Q, GE P X, *et al.*. Thermal radiation elimination method for high-temperature digital image correlation using polarization camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(6): 065203.
- [12] VALERI G, KOOHBOR B, KIDANE A, *et al.*. Determining the tensile response of materials at high temperature using DIC and the virtual fields method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 53-61.
- [13] 胡悦, 王永红, 鲍思源, 等. 高温下数字图像相关散斑最优成像探究[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 728-735.
HU Y, WANG Y H, BAO S Y, *et al.*. Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature[J]. *China Optics*, 2018, 11(5): 728-735. (in Chinese)
- [14] LIU M, GUO J, HUI C Y, *et al.*. Application of Digital Image Correlation (DIC) to the measurement of strain concentration of a PVA dual-crosslink hydrogel under large deformation[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(7): 1021-1032.
- [15] LYONS J S, LIU J, SUTTON M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(1): 64-70.
- [16] SU Y Q, YAO X F, WANG SH, *et al.*. Refraction error correction for deformation measurement by digital image correlation at elevated temperature[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 034106.
- [17] 施佳豪, 王庆, 冯悠扬. 基于三维标定板的相机标定方法[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6): 48-51.
SHI J H, WANG Q, FENG Y Y. Camera calibration method based on 3D calibration plate[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(6): 48-51. (in Chinese)
- [18] 郑冬, 冯鹏, 龙邹荣, 等. 面向多因素工况下的相机标定精度综述[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 109-116.
ZHENG D, FENG P, LONG Z R, *et al.*. Summary of camera calibration accuracy for multi-factor operating conditions[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(8): 109-116. (in Chinese)
- [19] 支健辉, 董新民, 孔星炜, 等. 相机标定的外界影响因素分析[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 286-291.
ZHI J H, DONG X M, KONG X W, *et al.*. Analysis of external influence factors in camera calibration[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 286-291. (in Chinese)
- [20] VERBIEST F, PROESMANS M, VAN GOOL L. Modeling the effects of windshield refraction for camera calibration[C]. *Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision*. Glasgow: Springer, 2020: 397-412.
- [21] VALLÉE C, FORTUNÉ D, LERINTIU C. On the dual variable of the Cauchy stress tensor in isotropic finite hyperelasticity[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2008, 336(11-12): 851-855.

作者简介:



任明阳(1995—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 2017年于长安大学获得学士学位, 主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: 18829040656@163.com



王立忠(1968—), 男, 山东梁山人, 博士, 教授, 博士生导师, 2004年于西安交通大学获得博士学位, 主要从事三维光学测量技术的研究。E-mail: wanglz@mail.xjtu.edu.cn