

## 激光与光电子学进展

## 空间结构形变的多视点高精度测量方法

胡烁陶<sup>1</sup>, 孙晖<sup>2</sup>, 王敏诚<sup>1</sup>, 王珂<sup>2</sup>, 杨凌辉<sup>1\*</sup><sup>1</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;<sup>2</sup>上海卫星装备研究所, 上海 200240

**摘要** 为了实现对复杂卫星结构多关键区域形变的灵活高精度测量,提出了一种基于多相机三维数字图像相关(3D-DIC)的微小形变整体测量方法。建立双目3D-DIC子系统以获得各关键区域的高精度形变场。结合光束平差优化和同名点3D重构方法完成对子系统的位姿外部标定。根据标定参数拼接子系统测量数据,得到全局形变场。在实验室条件下用卫星蜂窝结构的热形变实验测量得到多安装面的整体形变场和测量误差,结果表明,本方法对系统的整体位移测量误差为 $0.96\ \mu\text{m} \pm 0.45\ \mu\text{m}/\text{m}$ ,满足高精度、测量范围灵活可变的测量需求,且对重叠视场和离散视场均具有良好的适用性,为空间环境下卫星结构的稳定监测提供了可靠的测量方法。

**关键词** 测量与计量;多相机三维数字图像相关;摄影测量;外部标定;形变监测

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1912004

## Multi-Viewpoint and High-Precision Measurement Method for Spatial Structure Deformation

Hu Shuotao<sup>1</sup>, Sun Hui<sup>2</sup>, Wang Mincheng<sup>1</sup>, Wang Ke<sup>2</sup>, Yang Linghui<sup>1\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;<sup>2</sup>Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China

**Abstract** This study proposes a method for the overall measurement of small deformations based on multi-camera three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) to achieve flexible and high-precision measurement of deformations in multiple key regions of complex satellite structures. A binocular 3D-DIC subsystem is established for obtaining high-precision deformation fields in each key area. Combined with the beam adjustment optimization and the 3D reconstruction method of the same name point, the external calibration of the pose of the subsystem is completed. The measured data of the subsystem is spliced according to the calibration parameters, and the global deformation field is obtained. Under laboratory conditions, the overall deformation field and measurement error of multiple installation surfaces are measured in the thermal deformation experiment of the satellite honeycomb structure. The results show that the overall displacement measurement error of the method for the system is  $0.96\ \mu\text{m} \pm 0.45\ \mu\text{m}/\text{m}$ . The method meets the measurement requirements of a high-precision and flexible measurement range. Also, it has good applicability to overlapping and discrete fields of view and provides a reliable measurement method for monitoring the satellite structure's stability in space.

**Key words** measurement and metrology; multi-camera three-dimensional digital image correlation; photogrammetry; external calibration; deformation monitoring

## 1 引言

卫星在轨工作时的尺寸结构稳定性会直接影响有效载荷的工作状态,严重时会影响卫星的工作寿命<sup>[1]</sup>。随着卫星观测精度需求的不断提高,卫星载荷

安装平面等关键结构发生微米级形变时就可能直接影响有效载荷的指向精度和工作状态,因此,必须通过有效的测试手段对结构形变进行评估控制。

近年来,国内外研究人员通过多种测量方法对大尺寸卫星结构件的微小形变进行测量,如激光定位、光

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51975408, 52075382, 51721003)

通信作者: \*yanglh.tju@gmail.com

栅布拉格光纤、视觉测量方法。其中:基于双目视觉测量原理的数字图像相关方法对测量环境的要求较低,适用于多场合高精度非接触测量,且具有测量系统易于实现等优点<sup>[2-3]</sup>,具有很大的发展潜力,是目前研究人员关注的热点;三维数字图像相关(3D-DIC)方法<sup>[4]</sup>基于双目视觉和子区相关匹配的原理实现非接触式光学测量,被广泛应用于工业测试<sup>[5-7]</sup>、生物力学<sup>[8]</sup>等领域,但由于相机成像范围和图像传感器靶面尺寸的限制,3D-DIC系统在测量大尺寸表面的形貌及形变时精度较低,难以满足精密测量需求。在 CCD 相机靶面和分辨率大小不变的情况下,为了保证测量分辨率,多相机方法成为增大测量视场的主要研究方向。Orteu 等<sup>[9]</sup>提出了一种四摄像机 3D-DIC 系统,并指定一个主摄像机,其他摄像机与其分别配对组成传统的 3D-DIC 系统,主摄像机和其他摄像机之间的共同视场可以提供更准确的测量结果,但系统的视场由主摄像机确定,这也限制了多摄像机 DIC 系统的有效测量区域。Chen 等<sup>[10]</sup>提出的多相机系统将任意两台相机组合成一对进行标定,并根据标定数据将局部测量结果映射到全局坐标系下。Solav 等<sup>[11]</sup>提出了一种环形分布的多相机测量系统,用相邻相机组成一对 3D-DIC 系统并根据重叠视场将测量数据缝合到一起。基于共同或重叠视场的多相机测量方法要求重叠区域为各子系统视场的  $1/3 \sim 1/2$ <sup>[12]</sup>,但只存在小重叠视场或独立视场时,这些方法将不再适用,且图像拼接算法多应用于计算机视觉领域,数据缝合过程对测量精度的影响还有待进一步研究。Malowany 等<sup>[13]</sup>提出了一种用于测量分布式非重叠视场的多相机 DIC 系统,先用单独的 3D-DIC 子系统获得局部数据,然后利用激光跟踪器同时确定标记的位置,对单独 DIC 子系统的坐标系和全局坐标系进行变换,再将 DIC 子系统获得的数据通过算法缝合映射到全局坐标系中,该方法可应用于大型和复杂工程的形貌和位移测量,但精度不高,现有的多相机测量方法<sup>[14]</sup>也缺乏对测量精度的整体控制。

航天器大型结构形变测量要求对结构的关键区域进行高精度位移测量,且多个关键区域一般分布在不同区域,在多个关键区域间建立重叠视场会大大增加测量成本,难以保证测量精度。针对该问题,本文提出了一种基于多相机 DIC 的离散视场形变高精度测量方法。首先,利用摄影测量系统对 DIC 子系统进行外部标定。然后,建立测量控制网,在关键结构处布置 3D-DIC 子系统,以获得待测物体关键区域的局部高精度形变场。最后,将数据恢复至全局测量网络坐标系下,完成关键区域的高精度形变监测,并将测量结果用于对数学模型的更新和修正。本方法不需要对子系统两两进行平面标定,大大缩短了系统的标定时间,且对连续和离散视场均具有较好的适用性。此外,介绍了数字图像相关和数据拼接的原理和详细步骤,分析了

位移测量和数据转换过程中的误差。通过搭建小视场高精度 3D-DIC 测量系统,验证了本方法对位移和转角的测量精度,并测量了大尺寸复杂结构试件在不同温度载荷下的形变,得到关键区域的形变场和测量误差。

## 2 原 理

### 2.1 三维数字图像相关测量原理

3D-DIC 基于双相机立体视觉原理,利用空间点在两摄像机像面上的像点坐标确定空间点的三维坐标,根据针孔成像模型,经过理论推导可以得到左、右相机像素坐标和世界坐标之间的关系,对相机标定后得到内部参数和外部参数,进而根据左、右图像中的匹配像点重建出对应空间点的三维坐标。3D-DIC 的测量原理如图 1 所示。具体测量步骤:首先,用左、右相机分别采集物体未形变时的两幅图像,在左相机拍摄图像中选择子区,并根据图像相关算法匹配得到该子区在右相机拍摄图像中对应的图像子区;然后,根据标定后的双相机内外参数重建出子区的三维坐标;最后,用左、右相机分别采集物体形变后的两幅图像,并与未形变的图像进行相关计算,找到对应子区后,再重建出形变后子区的三维坐标,将对应子区形变前后的坐标相减即可得到三维位移数据。

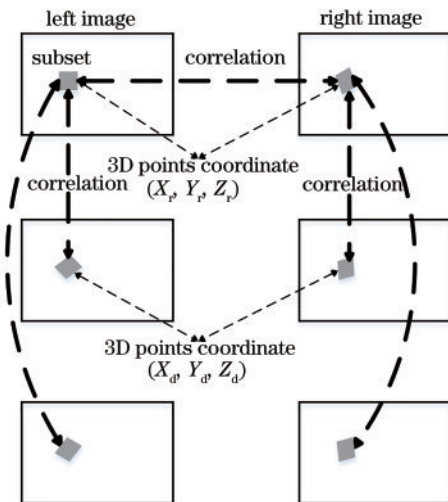


图 1 3D-DIC 的测量原理

Fig. 1 Measurement principle of the 3D-DIC

二维散斑图像匹配方法通过在形变前后物体表面的散斑图像中匹配对应图像子区获得该图像子区中心点的位移信息。首先,建立图像子区形函数和相关函数。然后,选择迭代算法进行相关性计算并取最小化相关函数值,得到子区中心点位移。为了在保证计算精度的同时提高计算效率,当试件表面形变尺度较小时,可将其近似为子区的平移、旋转等均匀形变<sup>[15]</sup>。形变子区  $W_1(x, y; p_1)$  可通过一阶形函数表示为

$$W_1(x, y; p_1) = \begin{bmatrix} u_x + 1 & u_y & u \\ v_x & v_y + 1 & v \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$p_1 = (u, u_x, u_y, v, v_x, v_y)^T, \quad (2)$$

式中： $u, v$ 为图像子区中心点在  $x, y$  方向的位移；

$u_x, u_y, v_x, v_y$ 为图像子区在不同方向上的应变。

为进一步提高子区匹配精度,采用计算精度高、效率高的反向组合型高斯-牛顿(IC-GN)匹配算法进行子区匹配<sup>[16-17]</sup>,基于一阶形函数的零均值归一化最小平方差(ZNSSD)距离相关函数可表示为

$$C_{ZNSSD}(\Delta p_1) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left\{ f \left\{ W_1[W_{1s}(x, y; \Delta p_1); 0] \right\} - \bar{f} - \frac{\Delta(fg)}{\Delta(g^2)} \left\{ g[W_1(x, y; p_1^n)] - \bar{g} \right\} \right\}^2, \quad (3)$$

式中： $W_1[W_{1s}(x, y; \Delta p_1); 0]$ 为参考子区的形函数； $g[W_1(x, y; p_1^n)]$ 为形变子区下一次迭代的形函数； $\bar{f}$ 为参考子区灰度均值； $\bar{g}$ 为形变子区灰度均值； $M$ 为子区大小； $s$ 为增量形函数； $n$ 为迭代次数。IC-GN匹配算法的迭代过程如图2所示。在每次迭代过程中,将增量形变  $W_1(x, y; \Delta p_1)$  叠加到参考子集上,经变换后进行目标子集的更新。根据双目相机立体视觉测量原理,利用相机标定过程解算出的双相机内、外参数和二维散斑图像匹配计算的点对,对三维点云进行重建,得到三维坐标点及三维位移。

### 2.2 多视点整体测量方法

多视点测量系统的结构如图3所示。在待测物体关键区域(AOI 1, AOI 2...)布置3D-DIC子系统(3D-DIC 1, 3D-DIC 2...),分别建立对应子坐标系,以精确监测各子区的形变。在关键区域表面布置控制点,变换摄影测量相机的位姿获得全局控制点图像,并用各3D-DIC子系统获得其视野内的控制点图像。

多视点整体测量方法的原理如图4所示。首先,

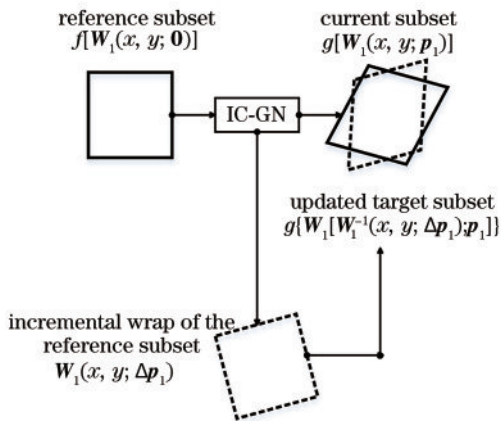


图2 IC-GN匹配算法的迭代过程

Fig. 2 Iteration process of the IC-GN matching algorithm

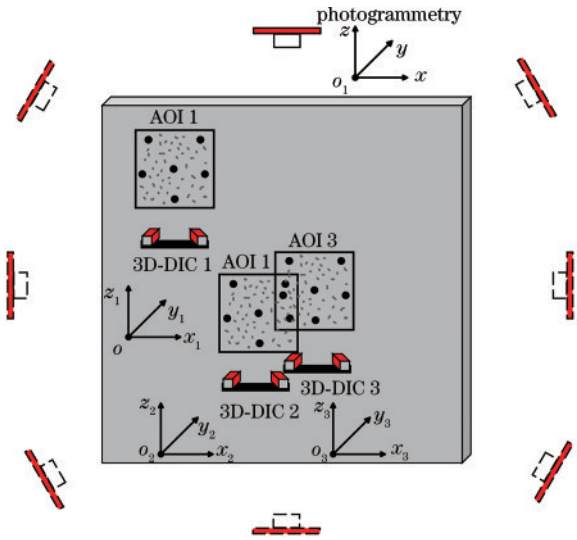


图3 多视点形变测量系统的结构

Fig. 3 Structure of multi-view deformation measurement system

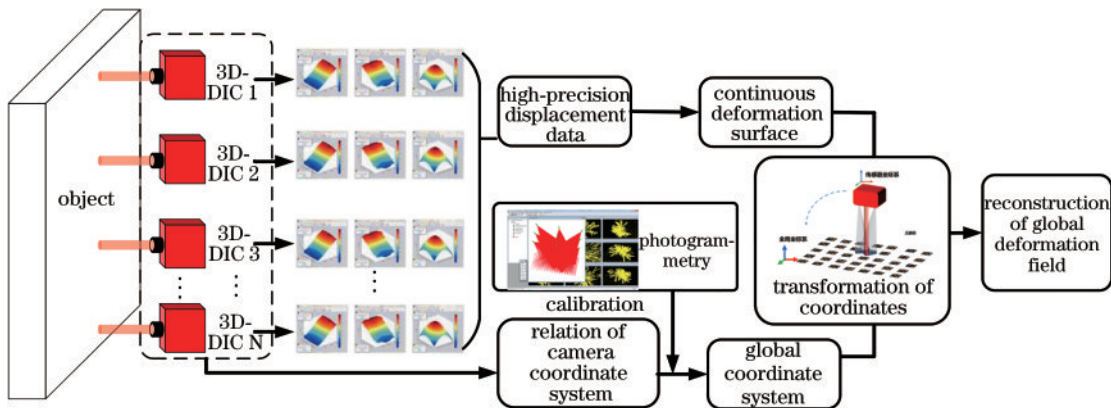


图4 多视点测量系统的原理

Fig. 4 Principle of multi-view deformation measurement system

由布置于关键测量区域的 3D-DIC 子系统测量得到局部高精度形变场,用摄影测量系统采集控制点图像,根据平差优化原理计算得到控制点在全局坐标系的坐标,并用 3D-DIC 子系统采集控制点图像。然后,对图像进行处理,计算得到控制点在局部坐标系的坐标,并根据控制点在局部坐标系和全局坐标系的坐标得到子系统的最佳外部标定参数。最后,通过拼接局部高精度数据得到全局高精度形变场。

3D-DIC 子系统和摄影测量均需要对控制点的中心进行高精度提取,像素级拟合方法的精度较低,会给外部标定方法带来较大误差。因此,提取控制点整像素级轮廓后继续计算出其径向灰度梯度,然后根据灰度重心法计算得到轮廓的亚像素边缘,最后采用最小二乘法得到精度较高的控制点亚像素坐标,如图 5 所示。

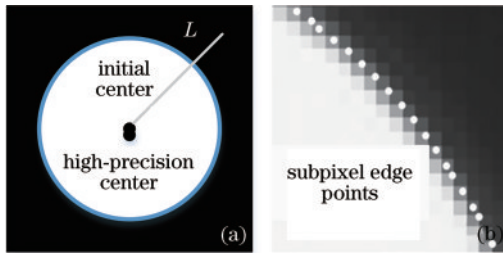


图 5 亚像素椭圆的提取。(a)初始中心和高精度中心;  
(b)亚像素边缘点

Fig. 5 Extraction of subpixel ellipses. (a) Initial center and high-precision center; (b) subpixel edge points

对 3D-DIC 子系统左右相机提取到的控制点坐标进行同名控制点匹配,不同于图像相关匹配算法中需要在外极线上进行绝对相位值搜索,控制点匹配只需找到左右相机像平面上提取的多个控制点中的对应点。对于左相机像平面上的某个控制点  $P$ ,首先求出  $P$  点的外极线方程,然后遍历所有右相机像平面上的控制点,选出距离外极线小于某阈值的所有点:如果距离小于阈值的控制点仅有 1 个,则该点即为匹配点;如果距离小于阈值的控制点有多个,需对点进行傅里叶变换和相位相关匹配,求出图像点对的位移值,进而判断出正确的匹配点对,即调取这些点或这些点附近的绝对相位,与点  $P$  绝对相位最近的点即为匹配点。该过程基于外极线和相位两个方向的约束,理论点有且仅有一个,有效避免了误匹配的发生。完成左右相机像平面上的控制点匹配后,通过匹配点的像素坐标得到三维点坐标。由于坐标提取误差的存在,左右相机的两个匹配点并不完全精确地满足外极线条件,因此,本方法先求解左右像平面两个对应像点确定的直线,然后取这两直线公垂线段的中点作为三维重构点以提升三维重构精度。

摄影测量系统根据小孔成像原理和光束空间交会原理最优化计算得到控制点在全局坐标系下的空间坐标。空间控制点  $p_w$  与其在像平面上的坐标  $p_p$  满足

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_w^c \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $p_p = [u \ v \ 1]^T$ ;  $p_w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$ ;  $u_0, v_0, a_x, a_y$  为摄影测量相机的内参;  $T_w^c$  为摄影测量相机的外参。

对图像上的控制点轮廓进行亚像素拟合可以得到其二维像素坐标,且相机内参可以根据精密标定获得。由于测量误差的存在,点  $p_w$  不会精确的在由  $p_p$  确定的空间直线上,因此,以空间距离最小作为目标函数,以摄影位姿和控制点空间坐标作为优化变量,建立最优化问题,然后根据非线性最小二乘优化方法解得拍摄位姿和控制点的空间坐标。

设控制点在局部坐标系和全局坐标系下的坐标分别为  $P_i^j$  和  $P_w^j$  ( $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$ ), 可表示为

$$H^i = \sum_{j=1}^n (P_i^j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_i^j) (P_w^j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_w^j)^T, \quad (5)$$

根据奇异值分解(SVD)方法计算得到旋转及平移矩阵  $R, T$

$$[U^i, S^i, V^i] = X_{SVD}(H^i), \quad (6)$$

$$R^i = V^i U^{iT}, \quad (7)$$

$$T^i = -\frac{R^i}{n} \sum_{j=1}^n P_i^j + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_w^j, \quad (8)$$

$$P_w^i = R^i P_i^i + T^i. \quad (9)$$

根据计算得到的各子系统到全局坐标系的外部参数将子系统的局部测量数据转换到全局坐标系下,完成数据拼接过程。

## 3 误差分析及验证

### 3.1 测量误差分析

多相机测量方法的误差主要来源于 3D-DIC 子系统的测量误差和子系统外部标定误差(测量数据从局部坐标系到全局坐标系转换时引入的数据拼接误差),误差模型如图 6 所示。

3D-DIC 子系统的测量误差主要取决于子系统内双相机标定误差以及图像相关分析的亚像素匹配算法的计算误差,而子系统外部标定误差取决于摄影测量平差优化误差、控制点像素中心提取误差、同名点三维重构误差。子系统外部标定误差能用控制点在全局坐标系的坐标和局部坐标系转换到全局坐标系的坐标间距离的均方根(RMS)描述,但坐标转换过程中的均方根误差(RMSE)不能直接加入到位移测量误差中,且 RMSE 表示的是单组 3D-DIC 数据转换到全局坐标系时的偏差。引入余弦误差表示坐标转换过程中位移矢量的偏转对位移测量精度的影响,  $\theta$  为 3D-DIC 测量数据转换到全局坐标系后的点云平面和摄影测量直接测量的全局坐标系坐标点云平面之间的夹角,余弦误差

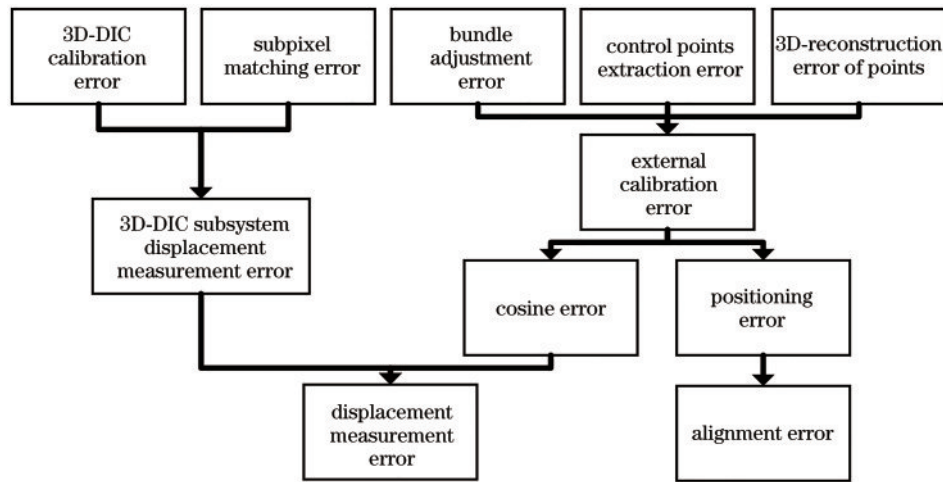


图 6 系统误差模型

Fig. 6 Error model of the system

可表示为

$$X_e = 1 - \cos(\theta). \quad (10)$$

数据拼接时的坐标转换误差还表现为局部数据在全局坐标系中的定位误差,但不会对位移测量产生影响,即系统的整体位移测量误差主要取决于 3D-DIC 子系统的位移测量误差,还受到数据拼接时余弦误差的影响。

### 3.2 3D-DIC 测量误差验证

采用激光干涉仪的长度测量结果作为位移测量的相对真值,光电自准直仪的角度测量结果作为角度测量的真值,为了验证 3D-DIC 系统的测量精度,在实验室环境下分别对 X、Y 轴面内位移, Z 轴离面位移和转角进行测试。实验用分辨率为 2592 pixel × 2048 pixel 的相机和焦距为 25 mm 的镜头组成双相机 3D-DIC 系统,双相机公共视场范围为 100 mm × 100 mm,激光干

涉仪的测量精度优于  $10^{-6}$ ,分辨率为  $0.01 \mu\text{m}$ 。光电自准直仪的测量分辨率为  $0.1''$ ,测量精度优于  $1''$ 。

位移测试系统如图 7(a)所示。将表面喷有散斑的试件和激光干涉仪的反射镜均固定于精密位移台上,激光干涉仪和 3D-DIC 系统同时监测试件的位移。实验过程中采用精密位移台产生位移,通过激光干涉仪监测位移台实际位移,3D-DIC 系统每隔  $1 \mu\text{m}$  采集一次试件散斑图像,调整精密位移台和激光干涉仪位置,分别进行 X、Y 轴面内位移和 Z 轴离面位移的测试实验。角度测试系统如图 7(b)所示。将试件和光电自准直仪的反射镜平行固定于精密转台上,光电自准直仪和 3D-DIC 系统同时监测试件的转动角度。实验过程中采用精密转台产生转角,光电自准直仪监测转台实际转动角度,3D-DIC 系统每隔  $2''$  采集一次试件散斑图像。

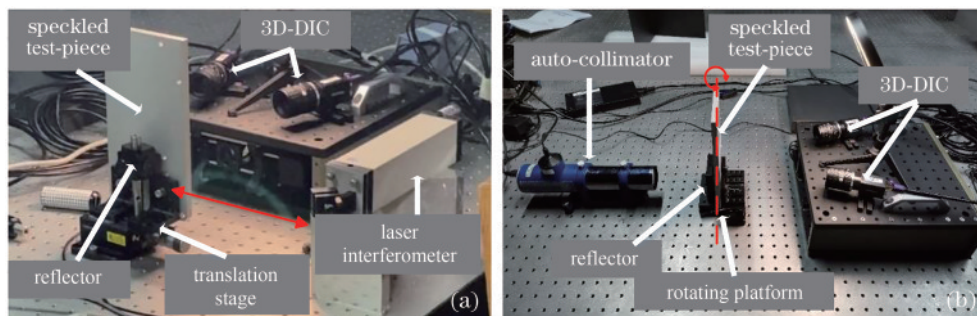


图 7 3D-DIC 的实验系统。(a)位移;(b)角度

Fig. 7 Experimental system of the 3D-DIC. (a) Displacement; (b) angle

对 3D-DIC 系统采集到的试件形变图像进行处理分析,相关分析时图像子区大小设置为 31 pixel × 31 pixel,搜索点间距为 2 pixel,位移和转角的测量结果如图 8 所示。

计算得到面内 x 方向和 y 方向的位移测量误差分别为  $0.64 \mu\text{m}$  和  $0.57 \mu\text{m}$ ,离面位移测量误差为  $0.88 \mu\text{m}$ ,转角测量误差为  $1.26''$ 。结果表明,3D-DIC 系统对面内

位移的测量精度高于其对离面位移的测量精度,整体位移测量精度优于  $1 \mu\text{m}$ 。实验过程中的环境波动以及相机温度对实验结果的影响较大,待相机温度稳定后,测试数据也较为稳定,验证了搭建的 3D-DIC 能完成局部高精度位移测量,但测量精度还受到相机夹角、光照强度、散斑大小和密度以及相机光圈等因素的影响。

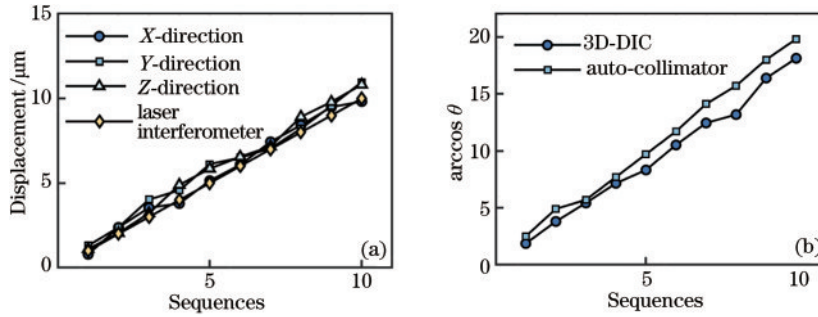


图 8 位移和转角的测量结果。(a)位移;(b)角度

Fig. 8 Measurement results of displacement and rotation. (a) Displacement; (b) angle

## 4 实验结果及分析

### 4.1 卫星蜂窝结构形变测量实验

利用提出的多视点测量方法对蜂窝结构进行形变测量,测量试件在模拟高温环境下的形变情况。试件及测量视场分区如图 9 所示。试件悬挂固定于碳纤维

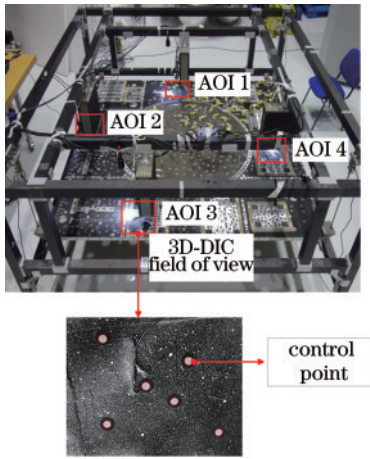


图 9 多视点形变测量实验的实物图

Fig. 9 Physical map of multi-view deformation measurement experiment

桁架上,3D-DIC 固定于待测试件关键观测区域上方。试件尺寸为  $1.96\text{ m} \times 1.96\text{ m} \times 30\text{ mm}$ ,实验采用哑光黑白涂料通过喷雾制成人工数字图像相关散斑,采用反光标记点作为转站控制点,在试件表面贴上全局控制点,每组 3D-DIC 的测量视场内均匀布置 6~8 个控制点为宜,低于 6 个会影响转站精度。采用的摄影测量系统精度为  $5\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ ,在试件上表面垫上隔热材料并固定基准尺作为长度基准。采用多块分布于试件表面的加热片对试件进行加热,采用均匀分布于试件表面的热电偶测头测量试件各点的温度。

### 4.2 实验结果及分析

升温前,用 3D-DIC 子系统采集控制点图像,同时摄影测量系统环绕试件,以不同角度、不同姿态采集控制点图像。去除控制点后开始加热,利用热电偶实时监控试件表面温度,试件各点温度场稳定后,用各组 3D-DIC 分别采集图像,并记录试件各点温度场数据。对 3D-DIC 采集的图像计算得到试件关键安装面在不同温度载荷下的位移场数据,AOI 1 的位移场数据如图 10 所示。

根据控制点在 3D-DIC 子系统和全局坐标系的坐标进行外部标定计算后,得到的标定参数如表 1 所示。

根据外部标定计算结果拼接子区位移场得到各子区在全局坐标系下的位移场,如图 11 所示。可以发现,

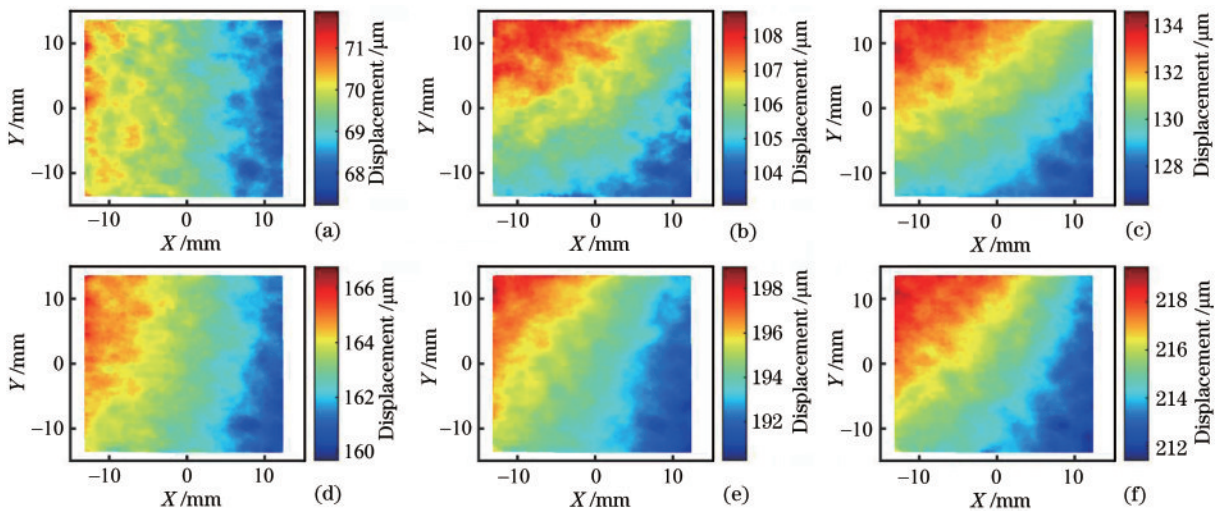


图 10 不同温度载荷下的局部形变场。(a) 27.37 °C; (b) 31.58 °C; (c) 36.14 °C; (d) 41.21 °C; (e) 45.50 °C; (f) 47.79 °C

Fig. 10 Local displacement field at different temperature. (a) 27.37 °C; (b) 31.58 °C; (c) 36.14 °C; (d) 41.21 °C; (e) 45.50 °C; (f) 47.79 °C

表 1 转换参数和转换误差

Table 1 Transformation parameters and transformation errors

Key position	$T_x$ /mm	$T_y$ /mm	$T_z$ /mm	$R_x$ /( $^\circ$ )	$R_y$ /( $^\circ$ )	$R_z$ /( $^\circ$ )	Error /mm
AOI 1	853.45	122.04	95.45	0.7423	0.2386	0.8442	0.05
AOI 2	-64.57	796.52	93.66	2.8951	-0.7540	1.5310	0.06
AOI 3	-847.97	-44.75	102.02	-0.5663	-0.0053	1.0621	0.05
AOI 4	52.04	-835.25	92.17	0.7784	0.5603	0.8100	0.04

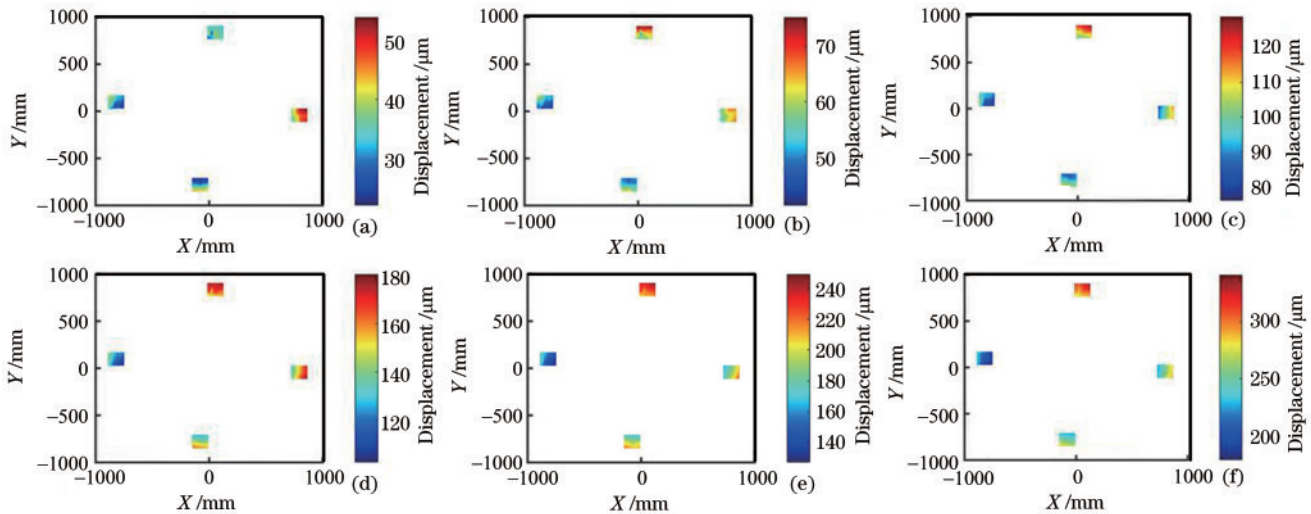


图 11 不同温度载荷下的位移场。(a) 27.37  $^\circ\text{C}$ ; (b) 31.58  $^\circ\text{C}$ ; (c) 36.14  $^\circ\text{C}$ ; (d) 41.21  $^\circ\text{C}$ ; (e) 45.50  $^\circ\text{C}$ ; (f) 47.79  $^\circ\text{C}$

Fig. 11 Displacement field at different temperature. (a) 27.37  $^\circ\text{C}$ ; (b) 31.58  $^\circ\text{C}$ ; (c) 36.14  $^\circ\text{C}$ ; (d) 41.21  $^\circ\text{C}$ ; (e) 45.50  $^\circ\text{C}$ ; (f) 47.79  $^\circ\text{C}$

试件关键安装面的形变量随温度升高不是均匀增大的,与其内部结构、试件重心位置、悬挂方式等有关。

据误差分析模型得到各区域的位移测量误差如表 2 所示。可以发现,各 3D-DIC 的位移测量误差均小于 0.02 pixel,即 1  $\mu\text{m}$ 。由表 1 可知,各子区的转换误差均保持在 0.06 mm 以下,计算得到数据拼接过程对位移测量产生的余弦误差角度分布在 0.05 $^\circ$ ~0.08 $^\circ$ 之间,产生的最大余弦误差为 1.07  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,各组余弦误差主要受摄影测量拍摄角度和位置的影响,取各 3D-DIC 的最大误差作为多相机系统的允许误差,即系统的测量误差为 0.96  $\mu\text{m} \pm 0.45 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

综上所述,蜂窝结构热形变测量实验对蜂窝板关

表 2 子区位移的测量误差估计

Table 2 Measurement error estimation of displacement in sub-regions

Key position	3D-DIC measurement error / $\mu\text{m}$	Angle between planes /( $^\circ$ )	Cosine error / ( $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ )
AOI 1	0.88	0.06	0.62
AOI 2	0.74	0.08	1.07
AOI 3	0.96	0.05	0.45
AOI 4	0.94	0.06	0.48

键安装面区域的热形变进行了整体测量,得到形变场并分析形变测量误差,在整体测量精度基本保持不变的情况下,增强了对测量范围的适应性。

## 5 结 论

提出了一种基于 3D-DIC 子系统进行外部标定的空间结构形变高精度整体测量方法。该方法根据测量需求布置多个子系统测量关键区域的形变场,在几乎不损失测量精度的前提下完成对局部数据的拼接。用 3D-DIC 子系统的位移测量误差和数据拼接产生的余弦误差表征系统的整体位移测量误差,并用卫星蜂窝结构的热形变实验验证了所提出方法的可靠性,得到关键区域的形变场,获得的允许误差为 0.96  $\mu\text{m} \pm 0.45 \mu\text{m}/\text{m}$ 。结果表明,本方法可实现大范围内多关键区域的整体高精度测量,相较于传统拼接方法,该方法能在几乎不损耗局部位移测量精度的情况下完成大范围内多视点的整体位移测量,且对连续和离散视场均具有较好的适用性,提高了测量系统在现场测量时的适用性,为空间环境下卫星结构的形变测量提供了可靠的测量方案。

## 参 考 文 献

[1] Shimazaki K, Kobayashi Y, Takahashi M, et al.

- Development status of ultra-lightweight solar panel using space solar sheet[C]//2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 7-12, 2009, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 2457-2461.
- [2] Sutton M A, Matta F, Rizo D, et al. Recent progress in digital image correlation: background and developments since the 2013 W M Murray lecture[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(1): 1-30.
- [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] Helm J D, McNeill S R, Sutton M A. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(7): 1911-1920.
- [5] Nguyen H, Kieu H, Wang Z Y, et al. Three-dimensional facial digitization using advanced digital image correlation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2188-2196.
- [6] 来文豪, 周孟然, 王锦国, 等. 多光谱波段筛选的煤矸石快速定位[J]. *中国激光*, 2021, 48(16): 1611001.  
Lai W H, Zhou M R, Wang J G, et al. Fast location of coal gangue based on multispectral band selection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 1611001.
- [7] 刘聪, 陈振宁, 何小元. 3D-DIC在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2): 339-344.  
Liu C, Chen Z N, He X Y. Application of 3D-DIC in experimental study on mechanical properties of civil structures[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(2): 339-344.
- [8] Shao X X, Dai X J, Chen Z N, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 696-704.
- [9] Orteu J J, Bugarin F, Harvent J, et al. Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements: methodology and results[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(4): 625-639.
- [10] Chen F X, Chen X, Xie X, et al. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1044-1052.
- [11] 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.
- [12] Chen M Y, Tang Y C, Zou X J, et al. High-accuracy multi-camera reconstruction enhanced by adaptive point cloud correction algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 170-183.
- [13] 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.
- [14] Wu W B, Zhao D, Zhao J. Removable camera based 2D digital image correlation for planar slender area quasi-static deformation measurement[J]. *Optik*, 2021, 226: 165952.
- [15] 王月敏, 张宗华, 高锋, 等. 基于特征匹配的非连续镜面物体三维测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612004.  
Wang Y M, Zhang Z H, Gao F, et al. Three-dimensional measurement of discontinuous specular object based on feature matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612004.
- [16] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 73-80.
- [17] Chabrier R, Sadoulet-Reboul E, Chevallier G, et al. Full-field measurements with digital image correlation for vibro-impact characterisation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107658.