基于相机网络的运载火箭舱段全周变形实时测量

邵新星¹, 周江帆², 员方¹, 徐莹隽³, 何小元^{1*}

1 东南大学土木工程学院, 南京 211189;

2 北京强度环境研究所, 北京 100076;

3 东南大学电子电工实验中心, 南京 211189

*E-mail: mmhxy@seu.edu.cn

收稿日期: 2021-07-06; 接受日期: 2021-10-19; 网络版发表日期: 2022-01-04

国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(编号: 11827801)资助

摘要 针对超大直径运载火箭舱段全周变形实时测量需求, 研制了由24台相机组成的相机网络变形测量系统和基于CPU并行计算策略的实时三维变形测量软件, 成功实现了火箭舱段内表面柱坐标系下360°全周变形测量和局部笛卡尔坐标系下区域变形实时测量. 相机网络测量系统由12套双目系统组成, 单套双目系统的视场大小为3.6 m×3.6 m, 相邻两套双目系统之间设置一定的重叠区域以保证测量结果的连续性. 采用单目摄影测量和双目立体视觉分别重构编码点三维坐标, 通过同名编码点实现局部坐标系和全局坐标系之间的坐标变换, 最终实现了12套双目系统的坐标统一. 单套双目系统可与一台电脑连接, 采用基于种子点扩散的并行算法和变形连续性传递的初值估计方法, 成功实现了70000点/s的实时三维位移测量和表面应变测量. 基于柱坐标下的360°全周变形测量结果, 成功实现了扩散角的高精度计算. 三个方向位移静态噪声标准差小于0.01 mm, 应变静态噪声标准差小于50微应变.

关键词 变形测量, 全周测量, 实时测量, 相机网络, 运载火箭舱段

1 引言

舱段结构是运载火箭的重要组成部分, 地面荷载试验则是分析舱段承载能力的重要环节. 在荷载试验中, 需要测量每一级荷载作用下的舱段结构变形信息, 以分析结构变形状态和力学性能. 传统的应变片测量技术具有较高的应变测量精度, 但是无法满足火箭舱段大范围、全场的应变测量需求. 目前, 摄像测量技术因其大范围、全场、非接触等特殊优势, 被广泛应

用于科研和工程领域的结构变形测量^[1]. 摄像测量技术不仅可以测量结构表面应变场, 还可以测量结构表面三维位移场, 获得丰富的变形数据.

摄像测量技术根据测量时靶标的设置情况可以分为无靶标方法^[2]、点追踪方法^[3]和数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法^[4]三种主要类型. 无靶标方法通过追踪被测物表面纹理特征或结构特征实现结构变形测量. 点追踪方法一般需要在被测结构物上的不同位置预先粘贴光学靶标点, 从而实现光学靶标点

引用格式: 邵新星, 周江帆, 员方, 等. 基于相机网络的运载火箭舱段全周变形实时测量. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1849–1858

Shao X X, Zhou J F, Yuan F, et al. Real-time panoramic-deformation measurement of cabin structure of launch vehicle based on camera network (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1849–1858, doi: 10.1360/SST-2021-0273

的三维位移测量. 与上述两种方法不同, DIC方法利用在被测物表面覆盖灰度随机分布的散斑场作为光学标志, 可以实现全场位移和应变的测量. 为了实现被测物表面三维位移和应变的测量, 一般需要使用由两台相机组成的三维DIC方法^[5]. 基于立体视觉原理和散斑图像亚像素配准^[6], 三维DIC方法可以实现图像中散斑区域的三维形貌测量. 通过变形前后相同点坐标相减得到三维位移, 最后对位移场进行差分运算或局部最小二乘拟合得到表面应变场.

对于运载火箭舱段全周变形实时测量, 摄像测量技术有以下三个问题和挑战需要解决. 第一个问题是大尺度散斑场制作问题. 为了实现舱段结构表面高精度变形测量, 需要在近 100 m^2 结构面上制作高质量散斑场. 第二个问题是大尺度全周测量问题. 需要实现舱段表面 360° 全周变形测量, 单套三维系统是无法满足需求的. 同时, 为了保证测量精度, 单套三维系统的视场也不宜过大. 第三个问题是舱段变形实时测量问题, 需要在加载过程中实时测量加载点附件舱段变形.

针对超大直径运载火箭舱段全周变形实时测量需求, 本文创新提出相机网络变形测量方法. 为了解决大尺度散斑场制作问题, 本文提出使用数字散斑转印方法, 将 7.2 mm 直径数字散斑转印^[7]到火箭舱段表面. 为了解决舱段表面 360° 全周变形高精度测量问题, 研制了由24台相机组成的相机网络变形测量系统, 将24台相机的测量结果坐标系统一并在柱坐标系下显示 360° 全周变形. 为了解决舱段局部变形实时测量问题, 研制了基于CPU并行计算策略的实时三维变形测量软件^[8]. 单套双目测量系统与一台电脑连接, 实时测量并显示笛卡尔坐标系下的区域变形.

第二章将介绍相机网络的相机布置方案、相机标定方法、坐标系统一方法和大尺度数字散斑制作方法. 第三章将介绍三维实时变形测量算法, 包括高效率初值估计算法、高精度亚像素匹配算法、立体匹配和三维重构算法和并行计算策略. 第四章将给出具体的实验结果. 第五章为本文的结论和讨论.

2 相机网络变形测量方法

2.1 相机布置方案

为了保证相机布置的整体性和稳定性, 如图1所示, 将相机布置在舱段内侧. 设计了可在现场组装的

图1 相机网络变形测量系统布置方案三维示意图

Figure 1 Three-dimensional (3D) schematic diagram of the camera network deformation measurement system layout scheme.

六棱柱形状相机安装平台, 通过可伸出式的支杆将相机布置在合适的成像距离上. 每根支杆上安装两台相机, 相邻支杆上的一对相机组成1套双目三维DIC测量单元, 共有24台相机组成的12套双目三维DIC测量单元. 在相邻支杆中间的下方区域布置了12套窄带蓝光照明装置用于散斑图像的照明, 并在相机与镜头之间安装了窄带蓝光滤波片以减小环境光对测量结果的影响^[9].

图2为现场安装的实物图, 相机分辨率为 2048×2048 像素, 像元尺寸为 $5.5\text{ }\mu\text{m}$. 在相机上安装了 8 mm 镜头, 在物距为 2.6 m 时的视场大小约为

图2 相机网络变形测量系统布置方案现场图

Figure 2 Site view of camera network deformation measurement system layout scheme.

3.6 m×3.6 m. 如图2所示, 24台相机通过硬触发线连接在同步触发器上, 通过电信号同步触发相机采集图像. 触发器采用ADLINK的USB-1901采集卡, 通过触发器输出方波信号进行同步采集. 现场共布置了6台工作站, 其中2台工作站各自连接一套双目三维DIC系统, 以实现两个加载区域的实时变形测量. 另外4台工作站每台连接5台相机, 以同步存储相机图像用于后续的变形分析. 相机安装前, 在物距2.6 m下先对每台相机的相距和光圈进行调节, 以保证图像的清晰度和散斑图的对比度. 在光圈最大的情况下调节相距, 然后把光圈调节到5.6. 完成相机调节后对相机的内参进行标定, 并将完成内参标定的相机安装在支杆上. 同时调整相机角度, 以实现双目系统对称布置. 两台相机间的夹角在20°左右, 可以满足离面位移测量的精度要求^[10].

2.2 相机标定方案

相机网络变形测量系统中的12套双目三维DIC测量单元都需要各自完成系统标定. 在相机安装到支杆前使用平面标定法标定每台相机的内参和畸变^[11]. 为了实现单套测量单元中相机相对外参的高精度标定, 采用基于散斑匹配和共面方程的大视场标定方法^[12]. 相机装到支杆后, 采集散斑图像并使用散斑匹配获取左右图像的匹配点坐标^[12].

如图3所示, 点 O_1 , 点 O_2 和点 P 是共面的. 在右相机坐标系, 根据共面方程有

$$\overrightarrow{O_1O_2} \cdot (\overrightarrow{O_1P_1} \times \overrightarrow{O_2P_2}) = 0, \quad (1)$$

$$\overrightarrow{O_1O_2} = -\mathbf{T}, \quad (2)$$

$$\overrightarrow{O_1P_1} = [x_1 \ y_1 \ f_1]^T = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T, \quad (3)$$

图3 三维空间点映射共面约束

Figure 3 Coplanar constraints for 3D space point mapping.

$$\overrightarrow{O_2P_2} = \mathbf{R}[x_2 \ y_2 \ f_2]^T = [X_2 \ Y_2 \ Z_2]^T, \quad (4)$$

式中, (x_1, y_1, f_1) 和 (x_2, y_2, f_2) 为点 P_1 和 P_2 在左右相机光心坐标系下的三维坐标, 其可以由去畸变后的像素坐标、主点坐标、等效焦距和像元尺寸计算得到.

联立式(1)~(4)可得点 P 的共面方程:

$$t_x(Y_2Z_2 - Y_2Z_1) + t_y(X_2Z_1 - X_1Z_2) + t_z(X_1Y_2 - X_2Y_1) = F(n_x, n_y, n_z, t_x, t_y, t_z) = 0. \quad (5)$$

对于 n 对匹配点, 最终的参数优化方程为

$$(n_x, n_y, n_z, t_x, t_y, t_z)_{\text{opt}} = \argmin \sum_{i=1}^n (F_i)^2. \quad (6)$$

若相机水平布置, 可以将平移向量对 t_x 进行归一化. 若为垂直布置, 则可以将平移向量对 t_y 进行归一化. 因此, 在式(6)中共有5个参数需要求解, 也就是说至少需要左右图像中的5对匹配点来进行计算. 对于三维DIC中的数万对散斑匹配点, 使用非线性最小二乘法优化求解出相机间的旋转向量和平移向量, 外参优化的初值可以由本质矩阵分解得到. 最后, 使用一个固定的标尺对平移向量的尺度信息进行校正.

相机标定参数将用于匹配点的三维重构, 本文使包含6项径向畸变系数和2项切向畸变系数的8参数模型. 在三维重构中考虑畸变项进而优化, 从而得到高精度三维重构坐标. 重构优化方程如式(7)所示:

$$E(M) = \sum_{i=1}^2 \|m_i - \bar{m}_i(\text{Int}, \text{Ext}, \text{Dis}, M)\|^2, \quad (7)$$

式中, 1和2分别代表左右相机视角, 其中 m_i 为匹配点图像坐标, Int, Ext和Dis分别为相机内参、外参和镜头畸变, $\bar{m}_i$ 为投影坐标, M 为待优化的三维空间坐标.

2.3 全局坐标系统一

12套双目三维DIC系统的测量结果是在各自左相机坐标系下的, 将12套系统的测量结果转换到一个全局坐标系下才可以得到柱坐标系下的360°全周变形. 局部坐标系到全局坐标系的变换需要计算两个坐标系之间的旋转和平移矩阵 $(\mathbf{R}_{L_i-w}, \mathbf{T}_{L_i-w})$, 其中 i 为双目三维DIC的系统编号, 编码号从1到12.

如图4所示, 为了实现全局坐标系统一, 加载前使用摄影测量方法重构被测物体上的编码点三维空间坐标^[13]. 同样地, 使用每套双目三维DIC系统重构各自看

图4 (网络版彩图)摄影测量重构编码点三维空间坐标

Figure 4 (Color online) The reconstructed 3D coordinates of coded points based on close-range photogrammetry.

到的编码点三维空间坐标. 通过编码值相同的对应关系可计算不同坐标系的刚性转置信息, 实现相机坐标系到全局坐标系的测量数据统一. 其中, 在每套双目三维DIC系统中重构的空间坐标为 p_{it} , 其对应摄影测量中重构的空间坐标为 q_{it} , 其中 t 为该点在视场中编码的序号. 该过程实质为一个最小二乘求优问题, 用公式可描述为

$$\begin{aligned} & (\mathbf{R}_{L_i-W}, \mathbf{T}_{L_i-W}) \\ & = \operatorname{argmin} \sum_{t=1}^T (\mathbf{R}_{L_i-W} p_{it} + \mathbf{T}_{L_i-W} - q_{it})^2. \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 大尺度数字散斑制作

为了实现百平方米高质量散斑制作, 采用数字散斑转印方法. 根据 $3.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ 的测量视场, 使用电脑生成直径为 7.2 mm (4个像素直径)的优化数字散斑^[14]并制作成转印贴纸^[7]. 在试验现场, 先使用白色的哑粉漆对被测表面进行均匀喷涂, 然后将制作好的数字散斑一块一块粘贴上去. 如图5所示, 在火箭舱段内表面搭建脚手架以实现数字散斑的转印. 这样的散斑制作方法, 可以保证散斑的精度和一致性, 从而保证测量结果的精度和一致性.

3 三维实时变形测量方法

实际测量过程中, 为了提高测量的时效性, 需要实现位移和应变的实时测量. 为了在不牺牲精度的前提下提高数字图像相关变形测量的效率, 提出了高效率初值估计算法、高效率亚像素匹配算法、立体匹配和

图5 (网络版彩图)数字散斑转印现场图

Figure 5 (Color online) Site view of digital speckle transfer printing.

三维重构算法和并行计算策略, 最终实现了局部笛卡尔坐标系下 70000 点/s 的三维位移和表面应变实时测量.

3.1 高效率亚像素匹配算法

亚像素匹配算法是数字图像相关高精度变形测量的基础, 本文使用反向组合高斯牛顿算法来计算亚像素位移. 如图6所示, 在反向组合高斯牛顿算法中, 增量的求解首先施加于参考图上, 然后将增量矩阵求逆后施加在目标模板的变形上, 迭代过程中的Hessian矩阵保持不变.

图6 (网络版彩图)反向组合高斯牛顿算法

Figure 6 (Color online) Inverse compositional Gauss-Newton algorithm.

除了Hessian矩阵以外, 对于其他不变参数同样可以创建查找表进行预计算. 对于零均值归一化最小平方距离相关函数, 其变形迭代公式如下:

$$\Delta p = -H^{-1} \times \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T \left[f(W(x, y; 0)) - f_m - \frac{f_s}{g_s} g(W(x, y; p)) + \frac{f_s}{g_s} g_m \right] \right\}, \quad (9)$$

$$H = \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right) \right\},$$

式中, 不变量还包括雅克比矩阵和 f_s 等. 在迭代计算中, 主要的耗时步骤即为亚像素灰度插值和 g_m , g_s 等参数的计算. 为了保证亚像素插值的精度, 可以使用B样条插值. 为了保证亚像素插值的效率, 则一般使用插值查找表. 对于一幅散斑图像, 若相机分辨率为 2048×2048 像素, 最多可以有近400万个点可以计算. 为了达到实时计算的目标, 往往只选择其中一部分点进行计算, 如设置计算步长大大减小计算点数量. 对于相对较少的计算点, 则无需对整幅图的插值查找表进行计算, 而是选择使用动态查找表的插值方法. 其中一个查找表用于保存插值系数, 另一个查找表用于动态记录变形图上点的插值系数状态. 在计算过程中实时计算插值系数, 对于已经计算了插值系数的点则无需重复计算^[14].

3.2 高效率初值估计算法

反向组合高斯牛顿算法作为一种迭代算法, 其需

要较为精确的初值. 为了获取高精度初值, 一般可以使用逐点的整像素搜索算法或特征点匹配算法. 这两种算法的计算效率都相对较低, 除非使用高性能GPU进行并行计算提高效率, 但是高性能GPU的使用会增加硬件成本. 为了使用较低成本的CPU实现实时变形测量, 采用多种子点的时空变形连续性初值传递策略, 如图7所示. 在计算区域内均匀分布一些种子点, 并根据变形连续性来估计其变形初值, 通过反向组合高斯牛顿算法来计算其变形. 对于成功计算的种子点, 通过空间变形连续性向周围点进行传递. 多个种子点的计算可以使用并行计算, 空间变形连续性传递的多个计算点同样可以使用多线程并行计算^[15].

3.3 高精度立体匹配策略

在三维DIC中, 除了变形前后的时序匹配以外, 一般还需要左右相机的立体匹配, 以实现高精度三维重构. 本文采用左相机参考图像与左右变形图进行匹配的策略, 这样计算的优势在于没有增量相关, 可以避免匹配误差. 将左相机参考图像与右相机参考图像中的种子点进行匹配时, 采用了极线约束减少匹配范围, 进一步采用空域变形传递来匹配剩余非种子点. 而在后续与变形左右图的匹配中, 均采用时域变形传递策略进行种子点的初值估计, 采用空域变形传递来匹配非种子点. 同时, 优化数字散斑场的使用使得较小模板即可实现高精度匹配, 在相机夹角 20° 左右、计算模板21像素时, 因透视变换造成的一阶形函数欠匹配误差^[16]并不明显.

图7 基于变形传递策略的初值估计算法

Figure 7 Initial guess estimation algorithm based on deformation transfer scheme.

3.4 并行计算与实时测量

为了降低硬件成本, 采用CPU多线程并行计算方法. 在计算前, 需要创建一个序列 Q 来保存待计算点, 包括种子点和非种子点. 种子点使用时域变形连续性来估计初值, 而非种子点使用空域变形连续性来估计初值. 另外, 在计算过程中需要提前创建子线程. 在计算过程中, 先将全部的种子点嵌入到序列 Q 中, 对于一个已经计算成功的点, 如果其周边点没有被计算过, 则其周边点和其对应初值传递点的索引被嵌入到序列 Q 中. 初值传递点的索引可以被用来提供一个改进的初值估计. 参考图像与左右相机图像匹配完成后即可使用标定参数进行三维重构, 进而计算三维位移. 在三维位移计算后, 可以使用并行计算直接对应变场进行计算.

如图8所示, 在实验过程中, 实验结果可以在显示器上实时显示. 加载的过程中即可以观察火箭舱段的变形情况, 实时分析其变形状态和力学性能. 在图9的实验中, 右边两个显示器分别显示两个感兴趣区域的全场变形, 相机帧频为2 Hz, 共计算了30000多个点. 对于本次实验中的12套双目三维DIC测量单元, 如果使用12台电脑即可完成全部区域的实时计算.

4 结果与讨论

4.1 静态噪声分析

由于每个子系统都为独立的三维立体视觉系统,

图8 实时变形测量现场图

Figure 8 Site view of real-time deformation measurement.

重叠区仅用来保证测量结果的连续性, 因此其中一套子系统的精度可代表系统测量精度. 实验前先让相机自热2 h左右^[17], 然后通过子系统以2 Hz的频率采集100组无荷载条件下的静态噪声, 在子系统测区中随机选择40 mm×40 mm区域的计算平均值评估各计算参数的噪声水平. 计算的模板大小为21×21像素, 步长为5像素, 应变计算窗口的大小为11×11点. 其中位移的静态噪声如图10所示, 位移的静态噪声标准差小于0.01 mm. 应变的静态噪声如图11所示, 应变的静态噪声标准差小于50微应变.

由于使用了优化数字散斑转印制作方法, 散斑图像的质量得到了保证, 在足够的图像灰度梯度下, 位移和应变的静态噪声都可以满足测量要求. 反向组合

图9 位移测量静态噪声

Figure 9 Static error of displacement measurement.

图 10 应变测量静态噪声

Figure 10 Static error of strain measurement.

图 11 第17级加载下的柱坐标360°全周变形

Figure 11 Full circumferential deformation of column coordinates at 360° under stage 17 loading.

高斯牛顿算法则进一步保证了测量精度和效率。同时,从图9和10中可以看到,在采集过程中静态噪声并没有

随着时间增大,说明测量环境较为稳定,对测量结果的影响较小,系统可以较为稳定的工作。系统的静态噪声

分析证明了系统测量结果的一致性和稳定性, 可以满足大直径运载火箭舱段变形测量的要求.

为了证明测量系统的准确度, 进一步开展了平移台精度验证实验, 当运动的幅值为8 mm(实际舱段加载最大的位移幅值)时, 面内准确度为0.0184 mm (0.23%), 离面准确度为0.0384 mm(0.48%), 可以满足测量需求.

4.2 全周变形测量结果

12套三维DIC的测量结果是相互独立的, 使用2.3节中的全局坐标系统一方法可将测量结果转换到全局坐标系中, 再通过柱坐标变换即可得到柱坐标系下的360°全周变形. 如图11所示, 为第17级加载状态下的柱坐标360°全周变形, 包括轴向位移场和应变场, 沿半径方向的屈曲变形和转角应变. 360°全周变形可以全方位地展现火箭舱段在荷载作用下的变形, 根据变形结果可以直接分析其变形状态和力学性能.

当载荷加至最大一级(150%使用载荷)时, 第一象限加载点附近的测量区域在全局坐标系下的变形云图如图12所示. 在该区内以 $EZ \leq -1800$ 微应变作为扩散区, 求解最大载荷条件下扩散角为29.9°(图13a), 与数值仿真的结果(30.0°)非常接近.

5 结论

本文研制了具有自主知识产权的相机网络全周三维变形测量系统, 成功实现了火箭舱段内表面局部笛卡尔坐标系下区域变形70000点/s的实时测量和柱坐标系下360°全周变形测量. 数字散斑场的使用保证了测量结果的精度和一致性, 反向组合高斯牛顿算法和

图12 加载位置的扩散角

Figure 12 Diffusion angle of the loading position.

并行计算提高了计算效率和精度. 大视场标定方法和坐标系统一方法, 使得大直径舱段变形测量成为可能. 基于测量结果, 成功实现了扩散角的高精度计算, 三个方向位移时域静态噪声标准差小于0.01 mm, 应变时域静态噪声标准差小于50微应变.

结合实际测量需求, 未来将对该系统进一步优化设计并简化系统标定步骤, 使其在实际工程应用中具有更好的适用性. 同时, 为了满足360°变形实时显示需求, 还需要开发多套双目系统数据坐标统一后的整体显示功能. 该功能需要将每套三维DIC测量结果通过坐标变换到全局坐标系下并传输到主工作站整体显示, 这部分技术内容也正在开展. 随着图像传感技术和计算机技术的发展, 摄像变形测量技术在科研和工程领域一定会发挥越来越重要的作用.

参考文献

- 1 Yu Q F, Shang Y. Image Based Precise Measurement and Motion Measurement (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究. 北京: 科学出版社, 2009]
- 2 Qu Z, Fang X, Su H, et al. Measurements for displacement and deformation at high temperature by using edge detection of digital image. *Appl Opt*, 2015, 54: 8731-8737
- 3 Dong S, Ma J, Su Z, et al. Robust circular marker localization under non-uniform illuminations based on homomorphic filtering. *Measurement*, 2021, 170: 108700
- 4 Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: Historical developments, recent advances and future goals. *Meas Sci Technol*, 2018, 29: 082001
- 5 Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer

- vision. [Exp Mech](#), 1993, 33: 123–132
- 6 Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation. [Optics Lasers Eng](#), 2015, 71: 9–19
- 7 Chen Z, Quan C, Zhu F, et al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation. [Meas Sci Technol](#), 2015, 26: 095201
- 8 Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring. [Appl Opt](#), 2016, 55: 696–704
- 9 Pan B, Wu D, Yu L. Optimization of a three-dimensional digital image correlation system for deformation measurements in extreme environments. [Appl Opt](#), 2012, 51: 4409–4419
- 10 Zhu C, Yu S, Liu C, et al. Error estimation of 3D reconstruction in 3D digital image correlation. [Meas Sci Technol](#), 2019, 30: 025204
- 11 Vo M, Wang Z, Luu L, et al. Advanced geometric camera calibration for machine vision. [Opt Eng](#), 2011, 50: 110503
- 12 Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components. [Meas Sci Technol](#), 2016, 27: 125010
- 13 Dong S, Shao X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry. [Appl Opt](#), 2016, 55: 6363–6370
- 14 Chen Z, Shao X, Xu X, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency. [Appl Opt](#), 2018, 57: 884–893
- 15 Shao X X, He X Y. Real-time 3D digital image correlation for large deformation and rotation measurements based on a deformation transfer scheme. [Exp Mech](#), 2021, 61: 951–967
- 16 Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement. [Optics Lasers Eng](#), 2015, 65: 73–80
- 17 Ma S, Pang J, Ma Q. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera. [Meas Sci Technol](#), 2012, 23: 025403

Real-time panoramic-deformation measurement of cabin structure of launch vehicle based on camera network

SHAO XinXing¹, ZHOU JiangFan², YUAN Fang¹, XU YingJun³ & HE XiaoYuan¹

¹ School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

² Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

³ Electrical and Electronic Experiment Center, Southeast University, Nanjing 211189, China

To satisfy the requirement of real-time panoramic-deformation measurement of a cabin structure in a large-diameter launch vehicle, a camera-network deformation-measurement system composed of 24 cameras and real-time three-dimensional (3D) deformation-measurement software based on CPU parallel computing was developed. The 360° full-circle deformation measurement of the inner surface of a cylindrical coordinate system and real-time measurement of the local deformation of a local Cartesian coordinate system were successfully realized. The camera-network measurement system consisted of 12 sets of binocular systems. The field of view of a single set of binocular systems was 3.6 m×3.6 m, and a certain overlap area was set between two adjacent binocular systems to ensure continuity of measurements. Photogrammetry and binocular stereo vision were used to reconstruct the 3D coordinates of the coded points, and coordinate transformation between the local and global coordinate systems was realized using the coded points. Finally, coordinate unification of the 12 sets of binocular systems was performed. A single set of binocular systems could be connected to a computer. By implementing the seed-point-based parallel algorithm and initial guess-estimation-algorithm-based deformation-transfer scheme, real-time 3D displacement and surface-strain measurements at 70000 points per second were successfully realized. On the basis of the 360° full-circle deformation-measurement results in the cylindrical coordinate system, high-precision calculation of the diffusion angle was successfully realized. The standard deviation of the static noise in the three directions was less than 0.01 mm, and the standard deviation of the static noise in the strain was less than 50 microstrains.

deformation measurement, panoramic measurement, real-time measurement, camera network, cabin structure of launch vehicle

doi: [10.1360/SST-2021-0273](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0273)