相机阵列测量二维应变场的高精度分析方法

邵新星, 陈振宁, 代祥俊, 刘聪, 何小元*

东南大学工程力学系, 南京 210096

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

收稿日期: 2014-10-15; 接受日期: 2015-01-21

国家自然科学基金(批准号: 11272089, 11327201)资助项目

摘要 近年来, 用于变形测量的数字图像相关技术以其全场、非接触、大量程等优点, 在很多领域的非接触大变形测量方面发挥了重要作用. 但由于其应变分辨能力受到摄像机分辨率的限制, 与电测应变技术相比, 数字图像相关的应变测量精度仍然很低. 要使数字图像相关测量技术在应变分辨能力上有数量级的突破, 依赖硬件技术的进步, 将是一个漫长的期待. 为此, 本文提出采用相机阵列并结合图像拼接技术实现高分辨率图像采集, 以提高数字图像相关测量技术的应变分辨能力, 从而达到高精度二维应变场的测量. 为了实现高精度的图像拼接, 本文还提出了一种基于相机标定的图像拼接方法, 利用相机阵列的内外参数进行图像拼接不仅可以最大限度利用相机分辨率, 还可以实现重叠区域的三维重构, 有效地减小离面位移对二维应变场测量的影响.

关键词

相机阵列
数字图像相关
图像拼接
二维应变场

1 引言

传统的电测应变技术测量精度可达 1 个微应变, 但其只能测量单点应变, 难以实现全场应变的测量. 随着光测实验力学^[1]的发展, 非接触、全场应变的测量技术, 如数字全息、散斑干涉、数字图像相关(digital image correlation, DIC)等, 已经发展得较为成熟且被广泛应用于各个科学领域. 与数字全息、散斑干涉等方法相比, 数字图像相关具有设备更加简单、对测量环境的要求更低、测量范围更广的优点^[2]. 目前, 数字图像相关已经被广泛应用于航空航天、材料、电子、机械、土木、生物等科学领域中^[3~6].

数字图像相关是 20 世纪 80 年代由 Sutton 等人^[7]和 Yamaguchi^[8]提出的一种基于现代数字图像处理和分析技术的新型光测技术. 该方法通过比较被测试

件变形前后图像的灰度变化, 可以直接计算出全场的位移. 数字图像相关的位移识别精度可以达到亚像素级别^[2~9], 由于受到相机噪声、光强波动等因素的影响, 文献中报道的位移识别精度在 ± 0.02 像素^[2,9,10]. 在这样的识别精度下, 若使用数值差分的方法来计算应变, 对于 $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ 像素的相机, 即使以整幅图像的最大线度作为标距, 应变测量误差可达 20 个微应变. 为了得到应变分布, 一般情况下, 标距的设定值都要小于最大线度的 1/10. 在这样的条件下, 即使不对试件施加任何荷载, 系统噪声可达 200 个微应变. 同时, 即使采用拟合的方法来求解应变, 其系统噪声也可达 100 个微应变^[10]. 对于均匀变形, 增加拟合窗口的大小, 其计算结果将更逼近真值, 但是这种方法对于非均匀变形并不适用. 与电测应变技术相比, 数字图像相关的应变测量精度仍然是不够的.

引用格式: 邵新星, 陈振宁, 代祥俊, 等. 相机阵列测量二维应变场的高精度分析方法. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 483–490
Shao X X, Chen Z N, Dai X J, et al. High-accuracy two-dimensional full field strain measurement method using camera array (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 483–490, doi: 10.1360/N092014-00365

若想要得到更高精度的应变场,可采取的方法有: 1) 提高亚像素位移识别精度. 从近十年来关于亚像素位移算法的研究可知, 想要从算法的角度上继续提高亚像素位移识别精度是非常困难的^[2,9,11-14]; 2) 提高相机信噪比, 选用更高信噪比的相机可以获得更高的位移识别精度^[14,15]; 3) 提高相机分辨率, 在测量视场一定的条件下, 提高相机的分辨率可以增加应变计算的标距. 但是, 更高信噪比和更高分辨率的相机都需要硬件上的进步.

要使得数字图像相关测量技术在应变分辨能力上有数量级的突破, 依赖于硬件技术的进步, 将是一个漫长的期待. 为此, 本文提出采用相机阵列并结合图像拼接技术^[16]实现高分辨率图像的采集, 以提高数字图像相关测量技术的应变分辨能力, 从而达到高精度二维应变场的测量. 同时, 本文提出了一种基于相机标定的图像拼接方法, 该方法不依赖于图像之间重叠区域的特征匹配, 可以最大限度的利用相机分辨率. 另外, 图像之间的重叠区域可以用于三维重构, 由此减小离面位移对二维应变场测量的影响.

2 相机阵列测量二维应变场

2.1 数字图像相关原理

数字图像相关方法是将被测物表面随机分布的灰度作为物体表面的变形信息的载体. 相机(如 CCD 或 CMOS 相机)常被用于记录被测物表面变形前后的灰度图像. 利用相机拍下变形前的“参考图像”和变形后的一系列“变形图像”, 通过计算变形前、后子区的对应关系便可以获得全场的变形信息. 在变形前的图像中, 取以待求点 (x_0, y_0) 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的图像子区, 在变形后的目标图像中搜索与其最相似的子区. 为了描述变形前、后子区的相似程度, 需预先定义相关函数, 本文采用的是零均值归一化的最小平方距离 (zero-normalized sum of squared differences, 简称 ZNSSD) 相关函数^[2,9], 其公式如下:

$$C_{\text{ZNSSD}} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2, \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j), \quad (2)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j), \quad (3)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}, \quad (4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}. \quad (5)$$

式中 $f(x, y)$ 是指参考图像中点 (x, y) 处的灰度值, $g(x', y')$ 是指变形图像中点 (x', y') 处的灰度值, M 是指子区的半宽.

变形前、后子区的相对变形, 往往通过形函数来描述, 本文使用的是一阶形函数^[2,9]

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y, \\ y' &= y_0 + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 u, v 是图像子区中心在 x, y 方向的位移, $\Delta x, \Delta y$ 为点 (x, y) 到图像子区中心点的距离, u_x, u_y, v_x, v_y 为图像子区的位移梯度. 当变形前、后子区最为相似时, 相关系数 C_{ZNSSD} 应取最小值, 通过牛顿-拉普森迭代法或其他优化方法即可求得变形参数^[2,9-15].

通过牛顿-拉普森迭代方法计算出来的位移梯度并不精确, 为了进一步求得应变场, 最直接的方法就是采用数值差分. 数值差分方法求得的应变误差较大, 因此潘兵和谢惠民^[10]提出逐点的局部最小二乘方法, 该方法具有一定的降噪能力. 但是, 即使使用了具有一定降噪能力的局部最小二乘方法, 与电测应变技术相比, 数字图像相关的应变测量精度仍然很低, 无法满足小变形的测量需求^[2,9].

2.2 相机阵列高分辨率图像采集

测量视场不变时, 图像分辨率的提高可以增加应变计算标距, 从而提高应变的计算精度. 本文提出使用相机阵列并结合图像拼接技术来实现高分辨率图像的采集. 图 1 为一个 5×5 相机阵列示意图, 每个相机的分辨率为 2048×2048 像素. 若图像之间的重叠区域不超过 48 像素, 那么对于 5×5 的相机阵列, 将可以获得分辨率约为 $10 \text{ k} \times 10 \text{ k}$ 像素的图像. 若图像之间的重叠区域为图像的一半, 那么能获得图像的分辨率约为 $6 \text{ k} \times 6 \text{ k}$ 像素. 为了最大限度地利用相机分辨率, 压缩图像之间的重叠区域是非常有必要的.

使用这样一个 5×5 相机阵列, 如果能够获得分辨率为 $10 \text{ k} \times 10 \text{ k}$ 像素的图像. 当测量视场一定时, 与 $2 \text{ k} \times 2 \text{ k}$ 像素图像相比, $10 \text{ k} \times 10 \text{ k}$ 像素图像的应变计算

图 1 5×5 相机阵列示意图

标距将可以提高 5 倍, 理论上应变测量的精度也将提高 5 倍左右. 若使用一个 10×10 相机阵列, 通过图像拼接获得分辨率为 20 k×20 k 像素的图像, 那么与 2 k×2 k 像素图像相比, 应变测量精度将会有数量级上的提升.

当然, 应变精度提高的前提是图像拼接对于数字图像相关运算不会引入新的误差, 也即是拼接精度需要达到亚像素级别. 这对于图像拼接技术而言, 将是一个非常大的挑战.

2.3 图像拼接

图像拼接就是要将相机拍摄的局部图像通过配准与融合获得一幅完整的图像. 图像拼接技术主要包括三个步骤: 图像预处理、图像配准、图像融合. 图像预处理主要包括: 图像去噪、图像畸变矫正等. 图像畸变矫正可以有效地降低图像畸变和失真对拼接精度造成的影响. 图像拼接的质量主要取决于图像配准的精度^[16].

图像配准的目的是能够找到一个空间变换, 使得图像序列之间相互重叠部分的坐标点能够对准. 目前, 图像配准中最常用的是基于特征的算法^[17], 是利用图像中的明显特征来计算图像之间的变换, 如 SIFT 算子^[17]和 SURF 算子^[18]等. 为了达到较高的拼接精度, 基于特征的算法一般会要求图像之间有 1/3 左右的重叠区域.

为了将图像拼接在一起, 需要预先定义图像之间的变换关系. 如图 2 所示, 世界坐标系中的一点 P 分别投影到相机 0 与相机 1 的成像靶面上为点 x_0, x_1 . 在二维数字图像相关中, 被测物表面是平面^[2,9], 因此可以将世界坐标系建立在被测平面上, 即使得 $Z=0$. 那么相机 0 的投影方程为

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

图 2 图像变换模型

其中 f_x, f_y, f_s, c_x, c_y 为相机 0 的内参, r 与 t 为相机 0 相对于世界坐标系的外参, α_0 为比例因子. (7)式可写成

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对于相机 1 同样可得

$$\alpha_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由(8)和(10)式可得

$$\alpha \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 H_1^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中 $\alpha = \alpha_0 / \alpha_1$, (11)式表示了 2 个相机图像坐标系之间的变换关系, 其中变换矩阵 $H_0 H_1^{-1}$ 为 1 个 3×3 的矩阵.

图像配准之后, 通过最小二乘的方法即可求得变换矩阵 $H_0 H_1^{-1}$. 求得变换矩阵之后, 选择一个相机为参考图像坐标系, 将其他相机拍得的图像转到参考图像坐标系下, 最终获得一幅完整的图像. 对于图像拼接过程中的重叠区域, 需要使用图像融合的方法. 本文使用的是线性融合的方法, 采用了渐入渐出的加权方式, 这种加权方式可以使得相邻两幅图像在灰度及颜色上都平滑拼接. 如图 3 所示, 重叠区域中灰度的权重与其距离重叠区域的边缘成线性关

图3 图像融合示意图

系. 通过加权系数对左右图像的灰度值进行加权, 得到重叠区域的灰度值.

3 基于相机标定的图像拼接方法

3.1 基于标定的图像拼接

在图像配准的过程中, 基于特征的算法需要依赖于图像之间的重叠区域, 重叠区域的大小将直接影响拼接的精度. 为了获得较高的拼接精度, 重叠区域的大小一般占图像的 $1/3$, 有的时候甚至超过图像的一半以上^[17,18]. 重叠区域越大, 相机分辨率的利用率也就越低. 为了提高相机分辨率的利用率, 本文提出一种基于相机标定的图像拼接方法. 如图 4 所示, 本文使用编码点标定板完成所有相机内部参数以及它们相对于标定板外部参数的标定, 单相机标定使用的是张正友的方法^[19]. 本文采用的是圆环型编码标志点^[20], 这种编码标志点由一个位于中心的圆和一个有缺损的同心圆环组成, 中心圆作为定位点, 圆环则是编码用来记录该标志点的身份信息. 每一个编码点都是独一无二的, 每一个编码点都代表其在标定板坐标系中的一个位置. 因此, 无论相机看到的是标定板的哪一部分, 所有相机相对的标定板坐标系都是统一的. 标定过程中, 采集 20 幅不同位姿标定板的图像来标定相机内参及其相对于标定板的外参. 得到相机内参和 20 组相对于标定板的外参之后, 使用最小二乘方法可计算出不同相机之间的相对外参. 通过编码标定板的使用, 无需利用重叠区域就可以标定出相机内参及相机之间的相对外参, 标定过程中可使用图像满画幅进行相机内参的标定, 从而

图4 编码点标定板

精确标定出相机的畸变参数.

如图 5 所示, 图像之间会存在重叠区域来保证拼得图像的连续性, 这部分重叠区域同时还可以用来进行三维重构. 所有相机的内参以及相机之间的相对外参已经通过编码标定板完成标定, 利用三维数字图像相关技术^[2,9]即可以实现重叠区域的三维重构, 从而获得被测物体的三维位置信息. 根据(7)式可知, 需要将世界坐标系建立于被测平面上(即 $Z=0$). 对于重构得到的被测物表面三维空间坐标, 通过最佳平面拟合可得到被测物的平面方程, 将三维空间坐标转换到建立于被测平面的世界坐标系下^[7], 最后通过最小二乘方法求出(7)式中相机相对于世界坐标系的外参.

有了相机的内参及相机相对于世界坐标系的外参之后, 根据(7)与(11)式可求得变换矩阵. 使用与章节 2.3 中同样的方法, 即可完成图像的拼接. 该拼接方法依赖于相机标定, 而不依赖于重叠区域特征的配准. 因此, 该方法可以有效降低图像重叠区域的大小, 提高相机分辨率利用率.

3.2 基于标定的离面位移测量

利用相机标定信息可以重构出重叠区域的三维信息, 如图 5 所示. 重构出的三维信息, 除了可以用于基于标定的图像拼接, 还可以用于刚体平移和刚体转动引起的离面位移的测量. 通过对图 5 中的虚线

图5 重叠区域三维重构

部分的三维重建, 可以拟合出被测物表面的平面方程. 通过拟合的平面方程, 确定被测物发生的离面位移、离面转动等信息, 从而减小离面位移对二维应变场测量的影响. 离面位移对二维应变场测量有较大的影响^[21], 这一方法可以很好地保证二维应变场的测量精度.

4 实验验证

实验装置如图 6 所示, 将带有散斑的试件安装于二维平移台上, 再将二维平移台安装于一维电控平移台上. 一维电控平移台用于产生面内位移, 二维平移台则可以用于产生离面位移. 相机的型号为 UI-3370CP-M-GL, 分辨率为 2048×2048 像素, 组成图 7 所示的相机阵列. 通过散斑场刚体平移实验, 来验证相机阵列测量二维应变场的可行性, 得到了位移场与应变场的测量结果.

4.1 面内位移及应变测量

在实验过程中, 使用电控平移台沿着图 6 中的 X 方向产生平移. 每次平移 0.03 mm , 共平移了 10 次. 通过相机阵列记录下平移前与平移后的图像, 使用图像拼接技术将 4 个相机拍得的散斑图像合成为 1 幅图像, 如图 8 所示. 对拼接后的图像使用二维数字图像相关计算出位移场及变形场^[2].

图 6 (网络版彩图)实验示意图

图 7 (网络版彩图)2x2 相机阵列

图 8 散斑图拼接

计算时模板选择了 51 像素, 相邻点之间的距离为 20 像素, 应变计算窗口为 15 个点. 图 9 为不同位移阶段测得的位移值. 从图 9 中可以发现, 测得的位移值与施加的位移成线性关系, 且测量值与真实值基本保持一致. 表 1 定量的给出了测量值与相对误差. 从表 1 中可以发现, 面内位移测量相对误差的最大值为 1.76%, 没有超过 2%, 具有较高的精度. 同时, 当

图 9 面内位移计算结果

表 1 面内位移测量结果

平移量(mm)	面内位移测量值(mm)	相对误差(%)
0.03	0.0299	0.33
0.06	0.0602	0.33
0.09	0.0898	0.22
0.12	0.1192	0.67
0.15	0.1474	1.73
0.18	0.1774	1.44
0.21	0.2065	1.66
0.24	0.2361	1.62
0.27	0.2653	1.74
0.30	0.2947	1.76

位移达到 0.15 mm 后, 其相对误差基本稳定在 1%~2%.

图 10 与 11 分别为位移为 0.03 mm 时的位移场与

应变场. 位移场中的拼接误差并不明显, 应变场可以看出较明显的拼接痕迹. U 场与 V 场的测量标准差分别为 0.006 与 0.005 像素, 位移场中因为拼接造成的误差在 0.02 像素左右, 也即图像拼接造成的位移测量误差在亚像素范围内. 应变 ε_{xx} 与 ε_{yy} 的测量标准差分别为 17 与 12 个微应变. 应变场中可以看出较明显的拼接痕迹, 但是误差基本在 50 个微应变以内. 本文使用的图像拼接是基于相机标定的方法, 因此图像拼接的误差主要来自于相机标定的误差. 同时, 被测物表面三维重建的误差也会产生一定的拼接误差.

4.2 离面位移测量

使用图 7 中相同的装置, 将面内平移改为施加离面位移. 每次平移 0.5 mm, 共平移了 10 次. 在使用相机阵列时, 可以利用相机标定的结果及三维数字图像相关技术测量离面位移. 实验中, 取重叠区域离

图 10 (网络版彩图)位移场计算结果
(a) U 场; (b) V 场

图 11 (网络版彩图)应变场计算结果:
(a) ε_{xx} 场; (b) ε_{yy} 场

面位移的平均值作为测量值. 如图 12 所示, 测得的离面位移与施加的离面位移成线性关系, 且数值基本相同. 图 12 证明了相机阵列测量离面位移的可行性. 表 2 定量地给出了离面位移的测量值和相对误差, 离面位移测量相对误差最大值为 1.8%, 不超过 2%, 具有较高的精度. 测得的离面位移可用于修正面内位移测量中由离面位移引起的虚位移^[21].

5 结论与展望

通过本文研究可以看出, 采用基于相机标定参

图 12 离面位移计算结果

表 2 离面位移测量结果

平移量(mm)	离面位移测量值 (mm)	相对误差(%)
0.5	0.4928	1.44
1.0	0.9942	0.58
1.5	1.5005	0.03
2.0	2.0152	0.76
2.5	2.5451	1.80
3.0	3.0458	1.53
3.5	3.5492	1.41
4.0	4.0478	1.20
4.5	4.5429	0.95
5.0	5.0453	0.91

数的图像拼接可以高精度地整合相机阵列所拍摄的图像. 将 $N \times N$ 个相机拍摄的图像合成为具有亚像素合成精度的高分辨率图像, 从而用于高精度变形测量. 同时为了提高相机分辨率的利用率, 本文提出了一种基于相机标定的图像拼接方法. 该方法与传统方法不同的是: 1) 无需依赖于重叠区域内的特征匹配, 可以最大限度的利用相机分辨率; 2) 通过重叠区域的三维重构可以减小离面位移对二维应变场测量的影响. 实验结果证明了该方法的可行性与有效性.

使用相机阵列, 有望在数字图像相关应变测量精度上实现数量级上的突破.

参考文献

- 伍小平. 近 40 年光学进展的回顾. 实验力学, 2010, 25: 491–508
- Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. Meas Sci Technol, 2009, 20: 062001
- Torres Arellano M, Crouzeix L, Douchin B, et al. Strain field measurement of filament-wound composites at $\pm 55^\circ$ using digital image correlation: an approach for unit cells employing flat specimens. Compos Struct, 2010, 92: 2457–2464
- Caduff D, Van Mier J G M. Analysis of compressive fracture of three different concretes by means of 3D-digital image correlation and vacuum impregnation. Cement Concrete Comp, 2010, 32: 281–290
- Tao H, Zavattieri P D, Hector Jr L G, et al. Mode I fracture at spot welds in dual-phase steel: an application of reverse digital image correlation. Exp Mech, 2010, 50: 1199–1212
- 施嘉伟, 朱虹, 吴智深, 等. 数字图像相关法测量 FRP 片材与混凝土界面的黏结滑移关系. 土木工程学报, 2012, 45: 13–22
- Sutton M A, Wolters W J, Peters W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method. Image Vision Comput, 1983, 1: 133–139
- Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge. J Phys E Sci Instrum, 1981, 14: 1270–1273
- Sutton M A, Orteu J J, Schreier H W. Image Correlation for Shape, Motion And Deformation Measurements. New York: Springer, 2009
- 潘兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量. 光学学报, 2008, 27: 1980–1986
- Long X, Fu S, Qi Z, et al. Digital image correlation using stochastic parallel-gradient-descent algorithm. Exp Mech, 2013, 53: 571–578
- Liu X Y, Tan Q C, Xiong L, et al. Performance of iterative gradient-based algorithms with different intensity change models in digital

- image correlation. *Opt Laser Technol*, 2012, 44: 1060–1067
- 13 Wang M, Cen Y, Hu X, et al. A weighting window applied to the digital image correlation method. *Opt Laser Technol*, 2009, 41: 154–158
 - 14 Wang Y Q, Sutton M A, Bruck H A, et al. Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements. *Strain*, 2009, 45: 160–178
 - 15 Pan B, Xie H, Wang Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Opt Express*, 2008, 16: 7037–7048
 - 16 Szeliski R. Image alignment and stitching: A tutorial. In: *Foundations and Trends(R) in Computer Graphics and Vision*. Vol 2, 2006. 1–104
 - 17 Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features. *Int J Comput Vision*, 2007, 74: 59–73
 - 18 Yang F, Deng Z S, Fan Q H. A method for fast automated microscope image stitching. *Micron*, 2013, 48: 17–25
 - 19 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE T Pattern Anal*, 2000, 22: 1330–1334
 - 20 Van Den Heuvel F A, Kroon R, Le Poole R S. Digital close-range photogrammetry using artificial targets. *Int Arch Photogramm Remote Sens*, 1993, 29: 222–229
 - 21 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. *Opt Laser Eng*, 2008, 46: 746–757

High-accuracy two-dimensional full field strain measurement method using camera array

SHAO XinXing, CHEN ZhenNing, DAI XiangJun, LIU Cong & HE XiaoYuan

Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China

In recent years, the digital image correlation technique, due to its full-field, non-contact and large measurement, play an important role in non-contact large deformation measurement in many fields. Because of the strain resolution is limited by the camera resolution, compared with the strain gauges, the strain measurement accuracy of digital image correlation is not enough. To make the digital image correlation measurement technology in the strain resolution has big breakthrough, rely on hardware technology, will be a long waiting. In this paper, a camera array, combined with image stitching technology, was used to realize the high-resolution image acquisition and improve the strain measuring resolution of digital image correlation, so as to provide a high-accuracy strain measurement. Moreover, a novel calibration based image stitching method was proposed. The proposed method can maximize the use of spatial resolution of digital camera, and three-dimensional reconstruction of the overlapped areas can be achieved using the calibration results, this can be used to reduce the impact of out-of-plane motion on strain measurement.

camera array, digital image correlation, image stitching, two-dimensional strain field

doi: 10.1360/N092014-00365