

# 微尺度三维变形测量的显微数字图像相关系统

任茂栋 梁 晋 唐正宗 郭 翔 李磊刚 余 淼

(西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 基于体式显微镜和数字图像相关法, 提出并实现了一种用于对微小尺度材料进行全场三维变形测量的显微数字图像相关系统。针对体式显微镜标定, 提出一种高精度的基于 B 样条曲面重构的成像系统畸变模型, 该模型通过采集自主设计的高精度平面标定板图像, 来构建无畸变图像平面和标定板平面之间关系, 并以此确定空间 B 样条曲面形式。利用一种高效的对称亚像素细分法来实现数字图像的高精度匹配, 并介绍了所提系统进行三维测量和分析的过程。实验结果表明, 标定结果的平均重投影误差为 0.03 pixel, 位移测量精度优于  $0.2 \mu\text{m}$ , 应变测量误差的标准差不超过  $100 \mu\epsilon$ 。同时, 实验结果也证实了该系统可以准确、全面地实现对微小尺寸材料表面的全场三维变形测量。

**关键词** 测量; 体式显微镜标定; B 样条曲面; 对称亚像素细分; 数字图像相关

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0512002

## Microscopic Three-Dimensional Deformation Measurement System Based on Digital Image Correlation

Ren Maodong Liang Jin Tang Zhengzong Guo Xiang Li Leigang Yu Miao

(School of Mechanical Engineering of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** A novel microscopic full field three-dimensional deformation measurement system is proposed and implemented, which is based on stereo microscope and digital image correlation method. In order to realize the calibration of stereo microscope, a new high precision distortion model is offered by reconstructing a B-spline surface. By acquiring images of the high precision planar calibration target designed independently and constructing the relationship between the target plane and the free distortion image planes, a form of space B-spline surface is established. Then, a high-efficiency image correlation method is realized by using a symmetric sub-pixel refinement strategy. The process for three-dimensional measurements using the proposed system is presented. Experimental results show that, the root-mean-square (RMS) error of the calibration results for stereo microscope system is 0.03 pixel, the displacement measurement accuracy is better than  $0.2 \mu\text{m}$ , and the standard deviation of strain measurement error is no more than  $100 \mu\epsilon$ . At the same time, the experimental results indicate that the proposed system is accurately and can solve the problem of microscopic full field three-dimensional deformation measurement comprehensively.

**Key words** measurement; stereo microscope calibration; B-spline surface; symmetric sub-pixel refinement; digital image correlation

**OCIS codes** 120.0120; 120.3940; 120.4820; 120.4640

## 1 引 言

数字图像相关法(DIC)<sup>[1]</sup>自 20 世纪 80 年代被

提出以来,以其非接触、高精度、低成本等优势被广泛应用于大中尺度材料或物体的全场位移和变形测

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2014-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(51275389, 51275378)、江苏省科技创新项目(SBC201210069)

作者简介: 任茂栋(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事光学摄影测量、微尺度变形测量等方面的研究。

E-mail: renwo@126.com

导师简介: 梁 晋(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学测量、机器视觉等方面的研究。

E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

量<sup>[2-7]</sup>。对于微小尺度(毫米量级)领域的全场变形测量的研究和应用相对较少,研究者们大多专注于利用扫描电镜进行微观尺度测量<sup>[8-10]</sup>,因此微小尺度领域的光学显微镜测量<sup>[11-13]</sup>研究成果较少。

考虑到体式显微镜成像光路的特殊性和复杂性,常见的相机标定方法<sup>[14]</sup>不能很好地满足精度需求。近年来,Schreier等<sup>[15]</sup>提出一种用于体式显微镜标定的两步法,该方法可以很好地矫正成像系统畸变,但是方法本身在操作和计算复杂度上要求较高,在一定程度上影响了该方法的推广应用。Zhang等<sup>[16]</sup>提出一种利用正交栅格作为标定板进行畸变矫正的方法,该方法的缺点在于很难保证图像坐标平面和标定板平面平行。Li等<sup>[17]</sup>的研究结果表明:Larsson等<sup>[11]</sup>提出的基于平移的显微镜标定方法要求较高的位移台平移精度,导致标定时硬件成本增加,为此提出了一种基于B样条曲面重构的显微系统成像畸变模型,结合经典的小孔成像模型并采用自主设计的显微标定板,实现对体式显微镜成像系统的快速精确标定。

最小二乘迭代法<sup>[18]</sup>和牛顿-拉斐逊方法<sup>[19]</sup>是两种较常见的亚像素细分方法,这两种方法都属于非线性的搜索方法,可以获得较高的计算精度,但计算过程复杂、算法执行效率不高,并且还存在着一种叫做“像素锁”<sup>[20]</sup>的亚像素匹配误差,该匹配误差的表现形式为整像素位置和中间像素位置处误差最小,整体误差变化趋势类似一个正弦波形。

本文采用了一种基于匹配函数对称性的亚像素细分方法<sup>[21]</sup>,该细分方法的优点在于,能够充分利

用匹配函数对称性实现对图像前后状态的同时匹配,消除了上述两种方法中产生的“像素锁”现象,且避免了牛顿-拉斐逊方法的求导运算,算法的精度和执行效率得到了提高。结合体式显微镜成像技术和数字图像相关法,提出并实现一种用于对微小尺度材料表面进行全场三维(3D)变形测量的数字图像相关系统。通过一系列验证性实验表明:该系统可以满足大部分材料力学实验的测量需求,更好地解决了对毫米级材料进行力学性能测试难的问题,在微小结构件的力学性能分析领域有广泛应用前景。

## 2 系统描述

图1为所开发的显微数字图像相关(XJTUMICRO)系统的硬件组成。主要包括以下部分:1) NSZ-806 双光路体式显微镜;2)两个工业 CCD 相机(1624 pixel×1236 pixel、像元尺寸 4.4 μm×4.4 μm);3)四轴位移台,用于系统标定时调整标定板位置;4)系统控制箱,用于相机采集以及电源供电;5)计算机,用于安装 XJTUMICRO 系统软件;6) LED 照明光源,包括一个环形主光灯和一个平板背光灯(亮度均可调节);7)体式显微镜万向支架以及连接线束等组成。

XJTUMICRO 系统软件是在 VS2010 开发环境下自主开发的应用程序,程序主界面如图2所示,2D表示二维,A为工程树列表;B为三维数据显示区;C为属性窗口;D为工程信息区;E为相机图像显示窗口;F为二维数据显示区。

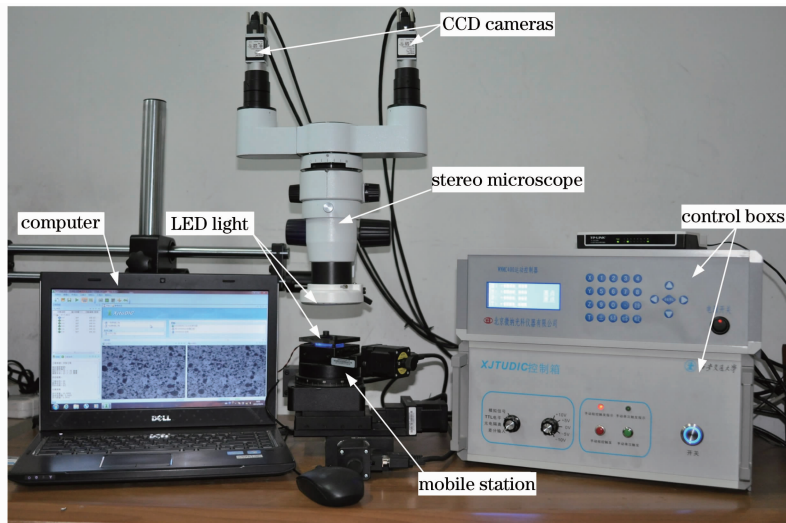


图1 XJTUMICRO 系统硬件组成

Fig. 1 Hardware construction of the XJTUMICRO system

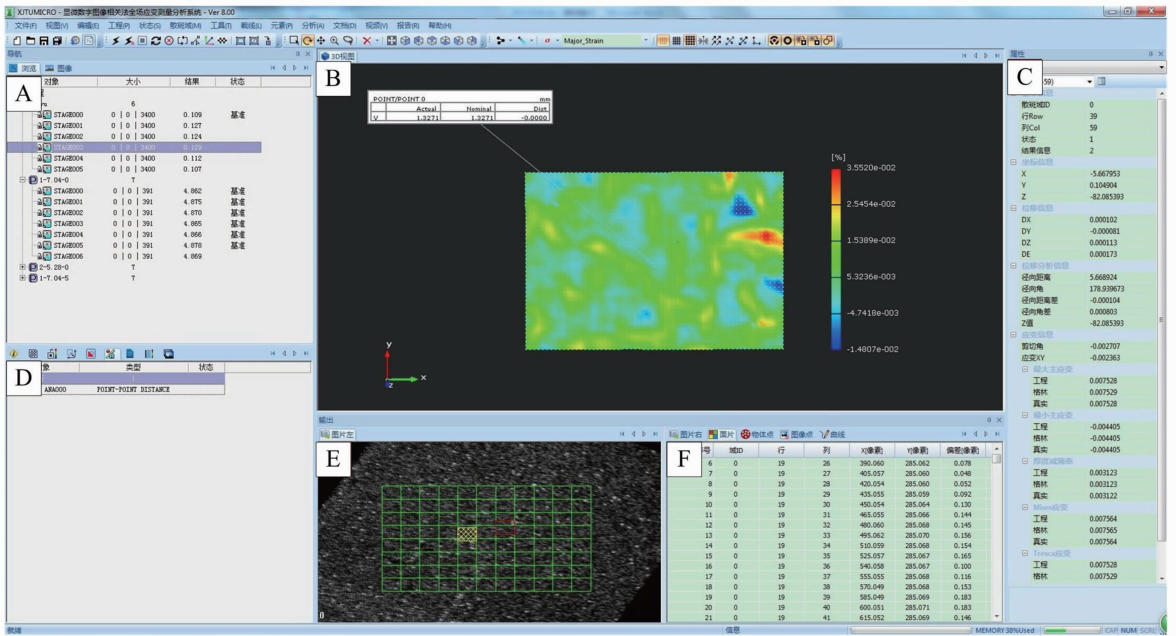


图 2 系统软件界面

Fig. 2 Software interface

### 3 显微成像系统标定

#### 3.1 体式显微镜成像原理

XJTUMICRO 系统成像部分是由一个 NSZ-806 双光路体式显微镜和两个 CCD 相机组成。图 3 是系统成像部分的内部光路图，光线经被测物体表面发出或反射后经物镜收集、放大系统放大、双端口分光器分光后形成两路彼此独立的平行光，最后经镜头筒分别传至两个目镜和 CCD 相机成像。

成像光束在经一系列透镜和反光镜的收集、改向和分离的过程中会产生一个全场的畸变，加之透镜本身加工误差和装配误差的存在，使得透镜像差（例如球差、慧差、像面弯曲和畸变等）的存在就不可避免，尽管高质量的成像物镜可以消除部分像差。这些像差的存在对于一个精确的测量系统而言是不允许的。因此，要想保证 XJTUMICRO 系统的三维测量精度，就要减小甚至消除成像系统的畸变。

#### 3.2 成像模型

如图 4 所示，XJTUMICRO 系统完整的成像模型是由成像光路的投影模型和畸变模型组成，而成像模型的实质就是要建立物体点  $M$  和检测出的图像点  $m'$  之间的数学模型。因此，本节将详细介绍成像系统的投影模型和畸变模型的建立。

##### 3.2.1 投影模型

采用经典的小孔成像模型作为显微成像系统的投影模型。在不考虑畸变模型  $D$  (如图 4) 的情况

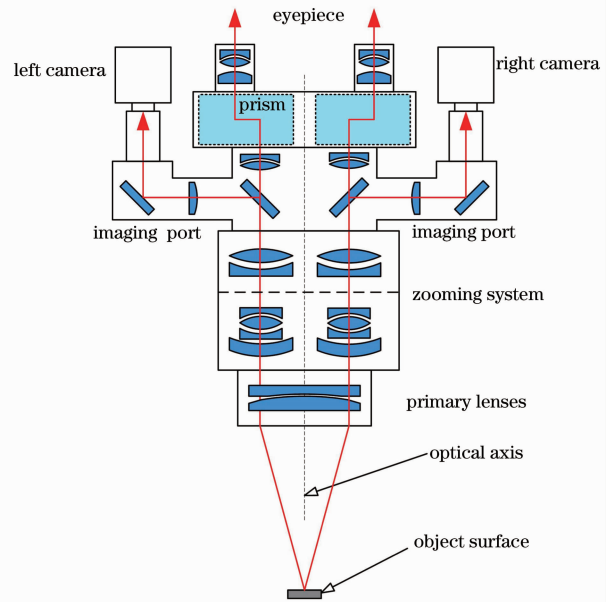


图 3 XJTUMICRO 成像系统内部光路图

Fig. 3 Schematic diagram of the internal optics in the XJTUMICRO imaging system

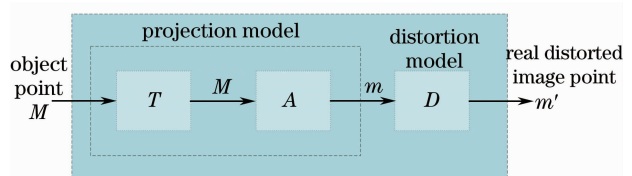


图 4 XJTUMICRO 系统完整成像模型

Fig. 4 Complete imaging model for XJTUMICRO system

下,显微系统单光路的投影模型可表示为(1)式,其中  $\mathbf{m}$  和  $\mathbf{M}$  分别表示物方点在相机坐标系和世界坐标系下的齐次坐标:

$$\partial \cdot \mathbf{m} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{M}, \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & t_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & t_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & t_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

矩阵  $\mathbf{A}$  是相机的内参数矩阵,其中  $(c_x, c_y)$  为相机光心在像平面上的投影坐标,  $f_x, f_y$  为相机焦距,  $f_s$  为

扭曲因子,  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$  和  $\mathbf{t} = [t_1, t_2, t_3]^T$  是

相机外参数,其分别代表世界坐标系和相机坐标系之间的旋转矩阵和平移矩阵,  $\partial$  是一个任意的尺寸因子。

### 3.2.2 畸变模型

考虑到实际测量中畸变对测量结果的影响不可忽略以及系统成像模型的完整性。本文提出一种基于双三次 B 样条曲面重构的显微系统畸变模型,该模型采用一种自主设计的刻有两种特征点的高精度平面标定板来完成对系统畸变的矫正。该畸变函数的构建可通过以下三步完成:

1) 确定无畸变图像平面位置。近年来的研究结果<sup>[15-17]</sup>表明,体式显微镜成像系统的中心区域畸变最小且几乎可以不计,因此可在采集到的标定板图像中心区域找到一组小畸变甚至无畸变的特征点,将这组特征点图像坐标构成的平面定义为无畸变图像平面。根据无畸变图像平面上的特征点坐标和其对应的三维点坐标  $(x, y, 0)$  (世界坐标系原点在标定板中心且  $z$  轴方向垂直于标定板所在平面),采用 Ravn 等<sup>[22]</sup>提出的线性相机标定模型,分别计算出两个成像光路的标定参数 ( $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ ),即确定出了两个成像光路上的无畸变图像平面和世界坐标系平面间的位置关系。

2) 生成无畸变的标定板图像。由步骤 1) 中确定的相机标定参数和已知特征点的三维坐标,根据 (1) 式计算出标定板上所有特征点在无畸变图像平面上的坐标  $(x_i, y_i)$ 。至此,可以建立如 (3) 式所示的无畸变图像特征点  $(x_i, y_i)$  和真实检测出的图像特征点  $(x'_i, y'_i)$  间的畸变偏差关系。

$$\begin{cases} \Delta_x(x'_i, y'_i) = x'_i - x_i \\ \Delta_y(x'_i, y'_i) = y'_i - y_i \end{cases} \quad (3)$$

3) 构建畸变模型函数  $\mathbf{D}$ 。根据上一步中获得的各点的畸变偏差情况,以 (4) 式所示的空间双三次 B 样条函数作为重构函数分别构建显微成像系统的两个光路在  $x$  方向和  $y$  方向上的畸变偏差曲面,其中  $\mathbf{N}_4$  矩阵是由 (3) 式中的  $\Delta_x$  或者  $\Delta_y$  构成。显然,在成像平面上任一点处畸变都可以看成两个相互垂直方向上畸变分量的和。由两个方向上的偏差曲面便可以确定成像系统中任意一个位置处的畸变。最后,在计算中利用 (3) 再把畸变的影响去掉,得到真实的无畸变坐标位置,达到提高计算精度的目的:

$$D(x, y) = \mathbf{b}^T(y) \mathbf{N}_4 \mathbf{b}(x), \quad (4)$$

式中  $\mathbf{b}(x) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} x^3 \\ -3x^3 + 3x^2 + 3x + 1 \\ 3x^3 - 6x^2 + 4 \\ -x^3 + 3x^2 - 3x + 1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{N}_4$  为图像特

征点周围的  $4 \times 4$  偏差矩阵。

至此,图 4 所示的 XJTUMICRO 系统的完整成像模型已经建立。最终,以完整成像模型计算所得的图像坐标  $\tilde{m}$  和检测所得的图像坐标  $m'$  的残差平方和为优化目标函数[如 (5) 式所示],以 Tsai<sup>[23]</sup> 两部步法的求解结果为初始值,采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法进行全局自标定运算,求得两相机的内外参数,完成 XJTUMICRO 系统的标定:

$$E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \{ [m'_{ij} - \tilde{m}(f_x, f_y, f_s, c_x, c_y, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{M}_j, \mathbf{D})]^2 \}, \quad (5)$$

式中  $p$  代表标定图像的数目,  $q$  表示标定图像上的特征点数目,  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{T}_i$  分别表示第  $i$  张标定图像的旋转和平移矩阵,  $\mathbf{M}_j$  表示第  $i$  张标定图像上的第  $j$  个物体点坐标。

### 3.3 标定板设计和系统标定流程

本文设计了一种刻有环形编码特征点和圆形非编码特征点的高精度平面标定板,对显微成像系统进行标定。同时,为了实现不同倍率下系统的灵活标定,将不同幅面 (CM) 的标定板图案光刻到同一片透明玻璃上。根据标定幅面大小和摆放个数的不同,标定板具有不同的设计形式,如图 5 所示是一种水平摆放形式。每个标定幅面拥有 17 个环形的编码特征点和 512 个圆形的非编码特征点,其上特征点间的距离是已知的,标定板可在透射光和正射光下使用。

为实现对 XJTUMICRO 系统的标定,应遵循如下操作步骤:

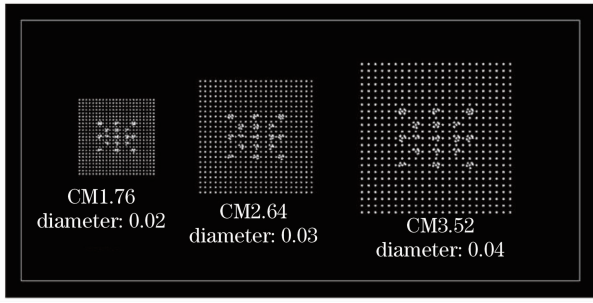


图5 标定板设计图

Fig. 5 Design drawing for calibration target

1) 标定板图像采集。在某一固定放大倍数下,将相应幅面标定板放置于体式显微镜的视场内,在计算机控制下,借助四轴位移台和 CCD 相机自动采集多幅(一般 12~16 对)不同位置下的标定板图像,此处采集多幅标定板图像的目的是增加相机位置约束,便于相机模型参数求解。标定板的位置摆放原则是在保证采集图像清晰度的前提下,尽量增大标定板与水平台面的倾角。

2) 检测标定板图像上特征点。对上一步所采集的标定板图像进行高精度的图像检测处理,计算出图像上特征点的亚像素级坐标值。

3) 标定初值计算。根据 3.2.2 节所述方法构建显微成像系统畸变模型,生成无畸变的标定板图像。利用去畸变后的标定板图像并采用 Tsai<sup>[23]</sup> 两

步法计算出系统标定参数的初值。

4) 光束平差法优化标定结果。根据完整的 XJTUMICRO 系统成像模型对系统参数进行整体的自标定优化运算。参与优化的参数包括标定板上特征点的三维坐标和成像系统的内外参数,并对最终的标定结果进行添加比例尺和温度补偿。

## 4 数字图像相关法

### 4.1 数字图像相关原理

数字图像相关方法是一种基于灰度特征的图像匹配方法。图 6 显示了该方法的基本原理,由于数字图像的离散性特点,在实际的图像匹配过程中,计算点的变形后位移向量  $\mathbf{r}'$  和原始位移向量  $\mathbf{r}$  之间存在如下关系:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} + \mathbf{U}(\mathbf{r}) + \mathbf{u}(\mathbf{r}), \quad (6)$$

式中向量  $\mathbf{U}(\mathbf{r})$  代表整像素位移,向量  $\mathbf{u}(\mathbf{r})$  代表亚像素位移。

为获得计算点的整像素位移  $\mathbf{U}(\mathbf{r})$ ,首先在参考图像  $I_1$  中,取以待匹配点  $p(x, y)$  为中心的  $(2M+1) \times (2M+1)$  大小的参考子图像,根据选定的匹配函数  $C(u, v)$ ,在待匹配图像  $I_2$  中寻找与参考子图像相关性最强的以点  $P'(x', y')$  为中心的变形子图像。采用一种叫做 ZNSSD<sup>[24]</sup> 的匹配函数,该匹配函数的形式如下:

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x_i + u, y_i + v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [g(x_i + u, y_i + v) - \bar{g}]^2}}, \quad (7)$$

式中  $f(x_i, y_i)$  和  $g(x_i + u, y_i + v)$  分别是图像  $I_1$  和  $I_2$  中点  $P$  和点  $P'$  的灰度值,  $u, v$  是两点间的整像素位置偏差,其数值等于两点像素坐标的差值。 $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别为两子图像的平均灰度值。

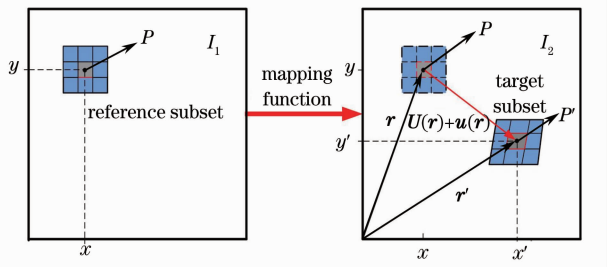


图6 数字图像相关原理图

Fig. 6 Basic principle of digital image correlation

### 4.2 对称的亚像素细分

#### 4.2.1 匹配函数对称性

首先,将待匹配图像  $I_1$  和  $I_2$  进行图像矫正<sup>[25]</sup>,矫正后的图像  $I'_1$  和  $I'_2$  与其对应的相机光心位置  $C_1$  和  $C_2$  之间的关系如图 7 所示。任取图像  $I'_1$  上的一条扫描线  $L$ ,以  $L$  在  $I'_1$  上点的  $x$  坐标为横坐标,在  $I'_2$  上点的  $x$  坐标为纵坐标,以两点间的相关系数值为灰度值,生成如图 8 所示的匹配函数图像。由图 8 可知,匹配函数图像中存在一条白色对称轴的“匹配脊”,该“匹配脊”两侧的对称点即为两幅待匹配图像上的对应点。

#### 4.2.2 对称的亚像素细分

为实现对称的亚像素细分方法<sup>[21]</sup>,假设  $(x_1, x_2)$  是匹配函数图像上一个整像素匹配点对  $[$ 表示

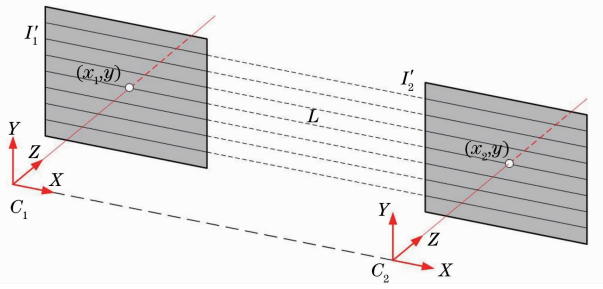


图 7 矫正后的双目系统(外极线平行扫描线)  
Fig. 7 Rectified stereo vision sensor (the epipolar lines are parallel to the image rows)

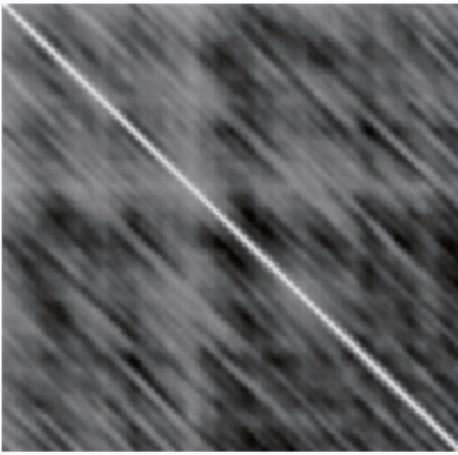


图 8 匹配函数图像(ZNSSD)

Fig. 8 Image of matching cost function (ZNSSD)

两个整像素对应点  $(x_1, y)$  和  $(x_2, y)$ , 两点满足(7)式中的最值要求。在不考虑图像边界的情况下, 点  $(x_1, y)$  和  $(x_2, y)$  周围会分别存在一个  $5 \times 5$  邻域, 由变形连续性可知, 两个  $5 \times 5$  邻域上的对应像素位置仍然是一组匹配点对, 可由(7)式计算出每个匹配点对应的相关系数值。至此, 就可求得点对  $(x_1, x_2)$  周围的一个大小为  $5 \times 5$  的相关系数矩阵  $N_5$  (由 4 个  $N_4$  邻域叠加组成)。并在  $N_5$  上重建一个如图 9 所示的空间样条曲面  $S$ 。然后, 在曲面  $S$  上获取一条垂直该点所在的匹配脊方向的空间截线。最后, 在截线上利用一维搜索方法(例如黄金分割法), 求取该截线上的最大相关系数值, 该相关系数值对应的  $x, y$  坐标就是要求取的亚像素位置最优匹配点对  $(x = x'_1, y = x'_2)$ 。本节仍采用公式(4)所示的空间三次 B 样条曲面方程来重建曲面  $S$ 。

从以上过程可以直观看出, 对称的亚像素细分方法实现了对图像前后状态的同时匹配, 整个匹配过程没有涉及到求导运算和迭代运算, 仅存在一个空间三次 B 样条曲面的构建和一种高效的一维搜索方法, 与传统的细分方法<sup>[18-19]</sup>相比, 该方法的执行效率必然

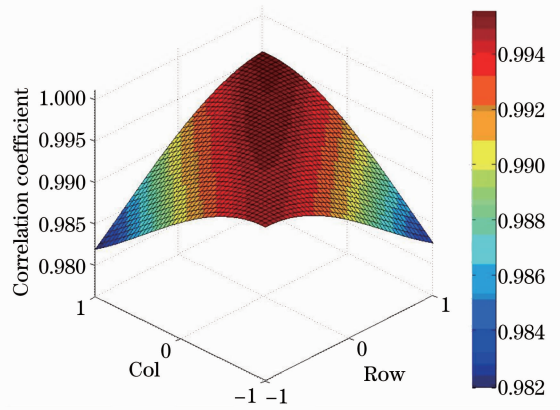


图 9 点  $(x_1, x_2)$  处的空间 B 样条曲面

Fig. 9 Space B-spline surface for point  $(x_1, x_2)$

有所提高, 这将有助于实现 XJTUMICRO 系统在高分辨率的情况下仍能快速匹配, 提高整个系统的测量速度。关于该方法如何去避免“像素锁”现象从而提高计算的精度, 详细内容可参考文献[25]。

### 5 三维测量过程

完成对 XJTUMICRO 系统的标定后, 针对微小平面或者是非平面物体的外形或变形测量过程如图 10 所示, 下面以一个点为例介绍如下:

1) 左右立体匹配; 在初始状态下的左图像中指定一个计算点  $p_0$ , 那么它在右图像上的对应点  $p'_0$ , 可由第 4 节介绍的图像匹配方法并结合外极线<sup>[26]</sup>理论获得。

2) 上下匹配; 点  $p_0$  和  $p'_0$  在变形状态图像上的

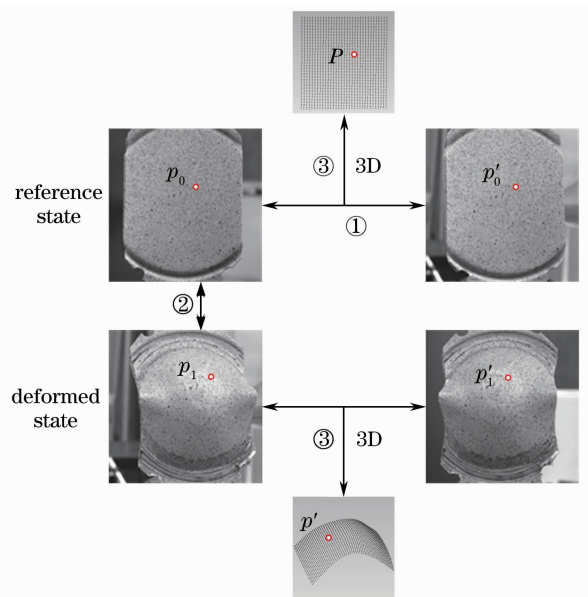


图 10 三维位移场计算流程

Fig. 10 Process for 3D displacement field computation

对应点  $p_1$  和  $p'_1$  同样由 4 节讲述的匹配方法获得。

3) 三维重建以及后续的位移场和应变场计算；找到计算点  $p_0$  在所有状态图像上的对应点后,通过优化的三角测量方法<sup>[27]</sup> 可以获得计算点在变形前后的三维点  $P$  和  $P'$ 。最后,根据三维点坐标计算相应的位移场和应变场<sup>[28]</sup>。

## 6 实验与分析

### 6.1 显微系统标定

根据第 3 节提出的标定方法对 XJTUMICRO 系统进行标定。实验现场如图 11 所示。首先,设定显微镜的放大倍数为  $3\times$ ,并根据视场大小( $2.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ )选定标定幅面 CM 2.64。其次,将平面 LED 冷光源固定在四轴位移台的水平台面上,并将包含 CM 2.64 幅面的标定板放置在 LED 背光灯的表面,然后用压板将标定板固定在背光灯上,最终效果如图 11(b)所示。最后开启电源,按照第 3.3 节所述标定流程进行标定。实验中为了减小成像物镜的像差,采用单色的平面 LED 灯作为标定板的透射光源。

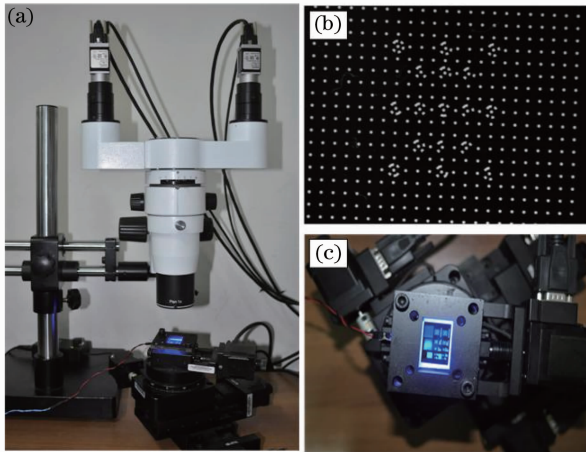


图 11 (a) 标定现场图片; (b) 采集的标定板图片;  
(c) 标定板和位移台组装图

Fig. 11 (a) Experimental site for calibration; (b) acquisition of calibration target image; (c) planar target placed on a mobile station

将采集到的标定板图像[图 11(b)]按 3.2.2 节提出的方法进行畸变矫正,并利用矫正后的标定板图像进行系统参数标定。标定结果如表 1 所示,此外右相机坐标系相对于世界坐标系(设在左相机光心位置)的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$  分别为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9984 & 0.0529 & 0.0188 \\ -0.0528 & 0.9986 & -0.0067 \\ -0.0191 & 0.0057 & 0.9998 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [-52.56 \quad -6.704 \quad 22.16]^T. \quad (8)$$

表 1 左右相机内参数

Table 1 Interior orientation parameters of the two cameras

Calibration parameter	Left camera	Right camera
$f_x/\text{pixel}$	-141739.5602	-142533.7717
$f_y/\text{pixel}$	-142132.4723	-141664.4069
$f_s/\text{pixel}$	1264.4271	-239.7209
$c_x/\text{pixel}$	-20794.0694	1547.4308
$c_y/\text{pixel}$	-8608.5165	-3700.1848

标定完成后,对一物方点  $M(X_w, Y_w, Z_w)$  根据共线方程(1)式可以求出该点在图像平面上的理想坐标  $(x, y)$ ,假如由图像检测得到的图像坐标为  $(x', y')$ ,那么这两个坐标之间距离就是  $M$  点的重投影误差  $e = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$ 。按上述方法将标定板上 529 个物方点在 32(标定时采集了 16 对)张图像上的重投影误差求平均值,得到的平均重投影误差为 0.03 pixel。该误差越小表明成像模型对系统的成像过程描述越准确。利用本文提出的标定算法得到的平均重投影误差远低于张正友算法<sup>[14]</sup> 的 0.33 pixel,由此可见,本文的标定算法可以实现对 XJTUMICRO 系统的高精度标定。

### 6.2 刚体平移

在 3 倍的放大倍率下,按第 3 节提出的方法标定完成后,将一块表面喷有散斑图案的微小平板试

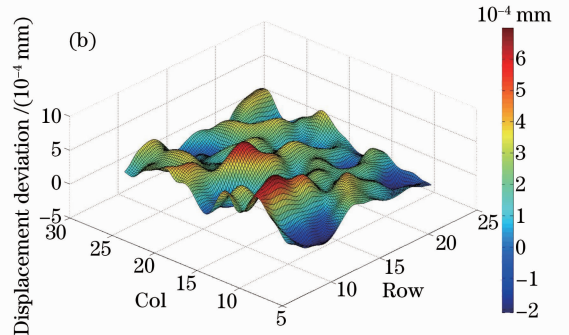
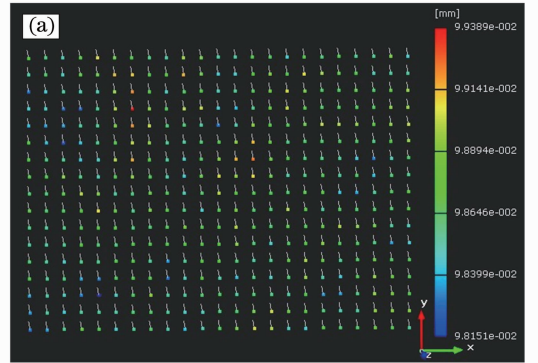


图 12 三维点色谱图。(a) 位移向量; (b) 位移偏差曲面  
Fig. 12 Color map of 3D points. (a) Displacement vectors; (b) displacement deviation surface

件固定在高精度位移台上,平移 120 个脉冲,对应的标准距离 0.0985 mm。通过 XJTUMICRO 系统计算其三维位移,子图像取  $25 \times 25$ ,共 391 个面片,计算得到平板上 391 个点的三维坐标和位移向量。图 12(a)为系统软件 3D 显示区显示的三维点的位移向量色谱图。由计算得到的三维点平移距离与标准距离之差绘制如图 12(b)所示的偏差分布曲面,由曲面可知局部区域距离偏差过大,原因主要包括:1)平板试件表面散斑分布不均;2) DIC 算法本身的匹配精度;3)系统的标定精度。由图 12 和数据分析可知,与标准距离相比,单点的最大误差为 0.00089 mm,平均误差为  $1.935 \times 10^{-4}$  mm,均方根误差为  $1.96998 \times 10^{-4}$  mm。

### 6.3 单向拉伸

应用本文所开发系统测量小型薄片钢材试件在单向拉伸条件下的应变数据,并通过与应变片(粘贴在试件上计算区域的背面)的读数进行比对,来验证本系统在测量变形物体表面应变时的精度。

#### 6.3.1 硬件组成

如图 13 所示,搭建实验现场。实验在电子万能试验机上进行,试验机最大拉伸力为 10 kN,试件材料为 SPCC 钢。试件尺寸以及应变片(文中选用的是箔式单轴应变片,自身具有自补偿功能,不需要粘贴补偿片)的粘贴位置如图 14 所示,图中虚线框内为计算区域。

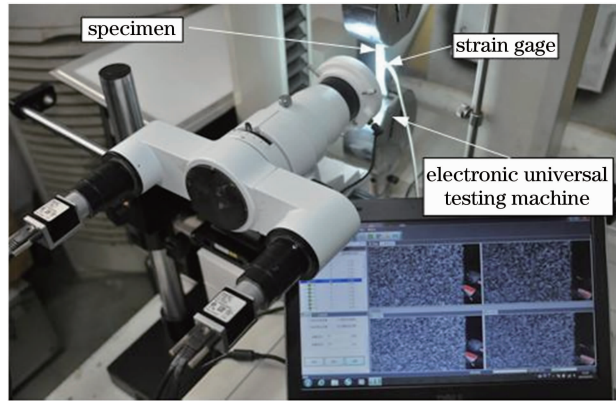


图 13 拉伸实验现场

Fig. 13 Tensile test scene

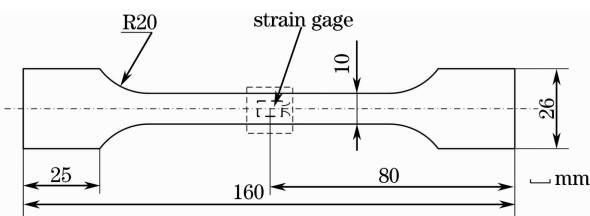


图 14 试件尺寸及应变片粘贴位置

Fig. 14 Specimen size and strain gage paste position

#### 6.3.2 实验过程及结果

实验前的准备主要包括:1)散斑纹理制备:在试件表面喷撒黑白相间的散斑纹理,其中散斑纹理要求细密均匀以保证试件表面具备足够多的匹配特征。2)应变片的粘贴:首先,在试件背面(无散斑图案)正对计算区域的位置打磨、抛光、划出定位线并均匀涂上胶水。然后按定位线位置将应变片准确粘贴,并用手纸包一块薄膜压平应变片挤出多余胶水,等胶水充分固化后方可进行实验。最后,将应变片引线焊接在连接片上并连接应变仪。3)系统标定和姿态调整:首先将体式显微垂直摆放(图 11)进行系统的标定,标定完成后利用万向支架将体式显微镜调整为水平位置,然后利用 XJTUMICRO 系统软件打开相机,根据计算机上相机窗口的实时图像进行显微镜支架高度的调整,使应变片粘贴位置处在系统视场中心偏上位置,保证试样在向上拉伸的过程中拥有足够的视场范围。

本次实验过程中显微系统的放大倍数为  $3 \times$ ,实验机的拉伸速度为 0.01 mm/min,相机帧率为 4 frame/s,应变片的变形极限为 5%,敏感栅长度为 0.3 mm。计算时截取了实验中采集的前 184 个状态,计算过程中选择的面片大小为  $45 \text{ pixel} \times 45 \text{ pixel}$ 、面片间距为 43 pixel、面片个数为 30,如图 15 所示,整个计算区域大小超过  $200 \text{ pixel} \times$

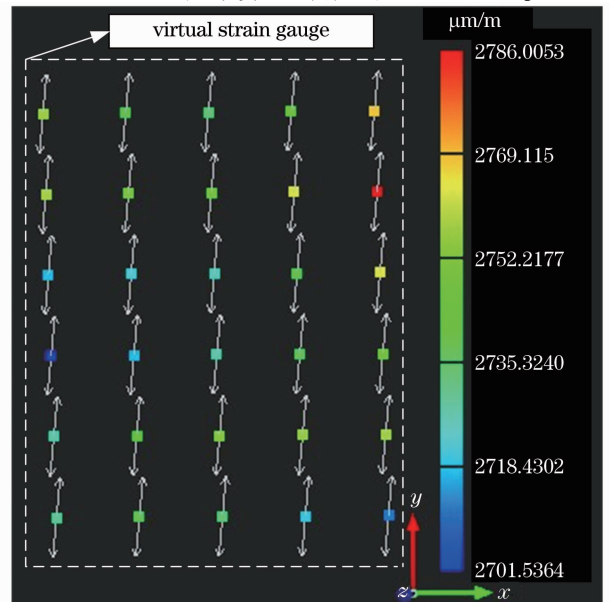


图 15 第 184 个状态的轴向应变  $\epsilon_{yy}$  色谱图

(白色双向箭头表示该点应变方向)

Fig. 15 Color map of axial strain  $\epsilon_{yy}$  for the 184th state (the white double sided arrow on behalf of the principal strain direction)



200 pixel(等效物理尺寸为 0.33 mm),相当于一个栅长为 330  $\mu\text{m}$  的虚拟应变片。图 15 是系统软件 3D 显示区显示的第 184 个状态的轴向应变  $\epsilon_{yy}$  结果。

由于应变片测量的是一个点的应变,而 XJTUMICRO 系统计算的是全场多个点的应变(图 15),为了便于两者对比,将系统计算区域中 30 个点的应变的平均值作为该状态下的测量结果。将每个状态的系统测量结果和相应的应变仪读数分别作为点  $x, y$  坐标绘制成图 16 所示的点集,并将两种方法获得的同一状态下的数据进行求差,求得两者数据偏差的标准差为 95  $\mu\epsilon$ 。由上述分析以及图 16 可知,XJTUMICRO 系统的测量结果和应变片的测量结果能够很好地吻合,且两者数据偏差的标准差不超过 100  $\mu\epsilon$ 。尽管在应变值较小时(小于 40  $\mu\epsilon$ ),两者的测量偏差较大(由图 16 的开始阶段得出)。

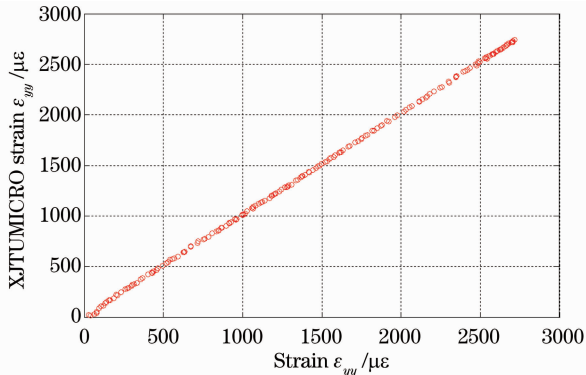


图 16 XJTUMICRO 计算结果与应变片测量结果对比  
Fig. 16 Comparison of measurement results of strain gage and XJTUMICRO

## 7 结 论

提出并实现了一种用于对微小尺寸材料表面进行全场三维变形测量的显微数字图像相关系统。显微系统标定实验、刚体平移实验以及小尺寸试件的单向拉伸实验,分别证明了 XJTUMICRO 系统在成像光路标定、物体表面位移测量和应变测量方面的准确性,同时也证实了该系统能够准确、全面地实现对微小尺寸材料的三维变形测量。本系统的出现可以更好地满足材料力学实验对微小结构件表面进行全场三维变形测量的需求。

## 参 考 文 献

- 1 M A Sutton, W J Wolters, W H Peters, *et al.*. Determination of displacements using an improved digital correlation method [J]. *Image and Vision Computing*, 1983, 1(3): 133–139.
- 2 S-H Tung, C-H Sui. Application of digital-image-correlation

- techniques in analysing cracked cylindrical pipes [J]. *Sadhana*, 2010, 35(5): 557–567.
- 3 Gu Guoqing, Wang Kaifu, Xu Xing. Measurement of in-plane micro-rotations and rotation-center location of a rigid body by using digital image correlation [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108004.
- 顾国庆,王开福,许星.基于数字图像相关的刚体内微小转动测量及转动中心定位[J].*中国激光*,2012,39(1):0108004.
- 4 He Neng, Liao Haili, Ma Cunming, *et al.*. Wind tunnel measurements based on digital image correlation method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051201.
- 何能,廖海黎,马存明,等.基于数字图像相关法的风洞试验测量技术[J].*激光与光电子学进展*,2013,50(5):051201.
- 5 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412004.
- 潘兵,俞立平,吴大方.使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J].*光学学报*,2013,33(4):0412004.
- 6 Sun Mingyong, Cai Kang, Yang Deyu, *et al.*. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111201.
- 孙明勇,蔡康,杨德宇,等.数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法[J].*激光与光电子学进展*,2012,49(11):111201.
- 7 Tang Zhengzong, Liang Jin, Guo Cheng. Slant-axis digital image correlation method based on photogrammetry correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112007.
- 唐正宗,梁晋,郭成.基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法[J].*光学学报*,2011,31(11):1112007.
- 8 A D Kammers, S Daly. Self-assembled nanoparticle surface patterning for improved digital image correlation in a scanning electron microscope [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(8): 1333–1341.
- 9 B S Salmons, D R Katz, M L Trawick. Correction of distortion due to thermal drift in scanning probe microscopy [J]. *Ultramicroscopy*, 2010, 110(4): 339–349.
- 10 M A Sutton, N Li, D Garcia, *et al.*. Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part II: experimental validation for magnifications from 200 to 10000 [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(6): 789–804.
- 11 L Larsson, M Sjö Dahl, F Thuvander. Microscopic 3-D displacement field measurements using digital speckle photography [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2004, 41(5): 767–777.
- 12 G Nicoletto, T Marin, G Anzelotti, *et al.*. Application of high magnification digital image correlation technique to micromechanical strain analysis [J]. *Strain*, 2011, 47(s1): e66–e73.
- 13 Shi Hongjian, Ji Hongwei, He Xiaoyuan. Optical 3D deformation measurement system and its application to investigation of mechanical behaviors of micro structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312007.
- 史红健,计宏伟,何小元.一种三维变形光学测量系统及微结构力学性能测试应用[J].*光学学报*,2011,31(3):0312007.
- 14 Z Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- 15 H W Schreier, D Garcia, M A Sutton. Advances in light microscope stereo vision [J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(3): 278–288.
- 16 D Zhang, M Luo, D D Arola. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation [J]. *Opt*

- Eng, 2006, 45(3): 033605.
- 17 K Li, Q Wang, J Wu, *et al.*. Calibration error for dual-camera digital image correlation at microscale [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2012, 50(7): 971–975.
- 18 B Pan, A Asundi, H Xie, *et al.*. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2009, 47(7-8): 865–874.
- 19 H A Bruck, S R McNeill, M A Sutton, *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 261–267.
- 20 M Shimizu, M Okutomi. Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching [J]. *International J Computer Vision*, 2005, 63(3): 207–224.
- 21 M Shimizu, M Okutomi. Precise sub-pixel estimation on area-based matching [C]. *Computer Vision, ICCV 2001, Eighth IEEE International Conference on*, 2001, 1: 90–97.
- 22 O Ravn, N Andersen, A Sørensen. Auto-calibration in automation systems using vision [J]. //Yoshikawa T, Miyazaki F, *Experimental Robotics III*. Berlin: Springer, 1994, 200: 206–218.
- 23 R Y Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323–344.
- 24 B Pan, H Xie, Z Guo, *et al.*. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. *Opt Eng*, 2007, 46(3): 033601.
- 25 A Fusiello, E Trucco, A Verri. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16–22.
- 26 X Armangué, J Salvi. Overall view regarding fundamental matrix estimation [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(2): 205–220.
- 27 R I Hartley, P Sturm. Triangulation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 68(2): 146–157.
- 28 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1980–1986.
- 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[J]. *光学学报*, 2007, 27(11): 1980–1986.

栏目编辑: 何卓铭