

基于摄影测量校正的斜光轴数字图像相关方法

唐正宗 梁 晋 郭 成

(西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 提出一种针对单相机、斜光轴测量条件下,基于摄影测量校正的二维数字图像相关法(DIC)。变形前,在被测物表面粘贴不少于 3 个控制点(圆形标志点),通过摄影测量技术得到控制点的三维坐标,利用控制点的三维坐标及其在图像上对应的二维坐标,通过空间后方交会法得到斜光轴相机的三维空间方位,拟合控制点的三维坐标得到控制面。变形过程中,对于数字图像匹配得到的每一个相关图像点,通过其投影射线与控制面相交得到其对应的三维点坐标。该方法不仅可以校正由于相机光轴倾斜引入的测量误差,而且可以直接、准确得到三维空间位移而不是像素级位移。通过与已有的三维 DIC 对比,该方法的位移测量精度优于 0.04 mm,应变测量精度优于 0.5%。

关键词 光学测量;斜光轴;数字图像相关;摄影测量;空间后方交会

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112007

Slant-Axis Digital Image Correlation Method Based on Photogrammetric Correction

Tang Zhengzong Liang Jin Guo Cheng

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

Abstract A novel single-camera two-dimensional digital image correlation method based on photogrammetry correction is developed for the situation that the camera axis is not perpendicular to the surface of the specimen. Before deformation, at least three control points (circle mark point) are placed on the specimen surface, and the three-dimensional (3D) coordinates of the control points are measured by the photogrammetry. Then the camera orientation is calculated by the space resection method, and a control plane is obtained by fitting the control points. During deformation process, for each point in the image matched by digital image correlation, its corresponding 3D point is acquired by intersecting between the point ray and the control plane. Using this method, not only the measurement error introduced by slant axis of the camera is corrected, but also the displacement in millimeters rather than in pixels can be gained directly. Experimental results comparing with the existing 3D digital image correlation method show that, the displacement measurement accuracy by the proposed method is better than 0.04 mm, and the strain measurement accuracy is better than 0.5%.

Key words optical measurement; slant axis; digital image correlation; photogrammetry; space resection

OCIS codes 120.3930; 120.3940; 120.4640

1 引 言

数字图像相关法(DIC)^[1]自 20 世纪 80 年代被提出以来,经过 20 多年的发展,在材料性能测试领域得到了极为广泛的应用^[2~5]。二维 DIC 使用一个

相机,可以测量平面物体的面内位移及应变,三维 DIC^[6]结合立体视觉与 DIC 技术,可以测量任意形状物体的三维位移及表面应变。与三维 DIC 相比,二维 DIC 设备更加简单、使用更为方便,且大多数

收稿日期: 2011-05-11; **收到修改稿日期**: 2011-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(50975219)和苏州市应用基础研究计划(SYG201014)资助课题。

作者简介: 唐正宗(1982—),男,博士研究生,主要从事光学摄影测量和变形测量等方面的研究。

E-mail: nevret@gmail.com

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

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

情况下足以满足测量需求,因此应用更加广泛^[7]。

使用二维 DIC 时,为了得到准确、可靠的测量结果,需要满足以下两个条件^[8]:1)被测物体表面应是一个平面或近似平面;2)相机光轴必须与被测物表面保持垂直。对于条件 1),如果被测物表面曲率足够小,可以近似看作平面来处理;对于条件 2),通常是依靠经验进行判断,但光轴与被测物法线间的偏差总是存在的^[9],而这种偏差必然会引入测量误差。孟利波等^[10]对二维 DIC 中由于相机光轴与被测物表面不垂直引入的测量误差进行了理论分析,得出了误差计算公式。龚昊等^[11]提出了一种基于数字图像处理调节光轴与载物台垂直性的方法。赵晶晶等^[12]提出了一种结合立体成像原理与数字图像处理调节机器视觉光轴与物面垂直度的新方法。Jeffrey 等^[13]提出了一种基于已知坐标的网格来校正斜光轴测量误差的方法。

对于实际测量来讲,相机光轴与物体表面的不垂直是必然存在的。而且对于一些大型物体,如桥梁、电力塔架等进行测量时,更是难以满足共轴测量光路条件^[14]。另外,二维 DIC 直接测量的位移是以像素为单位的,为了得到真实的三维空间位移还需给出准确的物距与像距的比例关系,而相机光轴倾斜时,由于各点放大率不同导致无法给出统一的比例。针对这些问题,本文提出了一种基于摄影测量技术对二维 DIC 在斜光轴测量情况下进行校正的方法。变形前,在被测物表面粘贴不少于三个控制点,通过摄影测量技术获得控制点的三维坐标,并建立控制面。然后,利用空间后方交会技术得到斜光轴相机的三维空间方位。变形过程中,对每个相关图像点,利用该点的投影射线与控制面相交就可以得到该点对应的三维坐标。该方法不仅可以校正因为相机光轴倾斜引起的测量误差,而且可以直接、准确得到真实的三维位移而不是像素级位移。通过与本课题组开发的双目三维 DIC 系统^[15]测量结果对比,本文方法测得的位移及应变均具有较高的精度。

2 DIC

DIC 是匹配两幅图像上对应点的方法。如图 1 所示,其中一幅为参考图像,另外一幅为变形图像,在参考图像中,取以待匹配点 C 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 大小的矩形子图像作为参考子图像,在变形图像中,通过一定的搜索方法,并按照预先定义的相关函数进行相关计算,寻找与参考子图像相似度最大的以 C' 为中心的目标子图像,则点 C' 即为点 C 在

变形图像中的对应点。采用最小距离平方和相关函数^[16]

$$C_{SSD}(p) = \sum_{x=-M}^{x=M} \sum_{y=-M}^{y=M} [f(x, y) - r_0 - r_1 g(x', y')]^2, \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 是参考子图像中任一点 P 的灰度值, $g(x', y')$ 是 P 在变形图像中的对应点 P' 的灰度值,变量 r_0, r_1 用于补偿由于光照不均匀而引起的灰度差异, $\mathbf{p} = [u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1]$ 表示相关参数向量,取决于所用的映射函数,因此采用一阶映射函数:

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y' &= y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 u, v 分别为子图像中心点 C 变形后在 x, y 方向的位移, $\Delta x, \Delta y$ 分别为 P 点与 C 点在 x, y 方向上的距离, u_x, u_y, v_x, v_y 为参考子区的位移梯度。

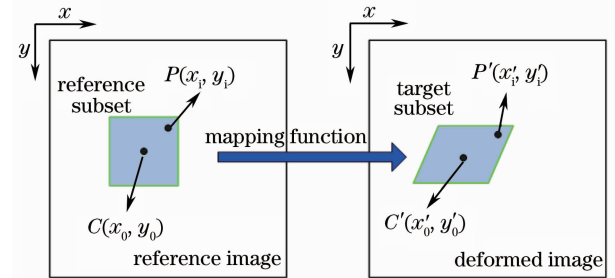


图 1 DIC 原理图

Fig. 1 Basic principle of DIC

求取 C_{SSD} 的极值是一个非线性优化问题,可以通过标准的最小二乘迭代算法(ILS)^[17]来求解。由于 (x', y') 为非整数像素,在计算过程中需要通过双三次样条插值来计算其灰度值 $g(x', y')$ 。

3 斜光轴 DIC

3.1 摄影测量基本原理

摄影测量技术的基本原理,是通过在物体的表面及其周围放置标志点,包括编码点和非编码点,然后从不同的角度和位置对物体进行拍摄(图 2),得到一定数量的照片,经过图像处理、标志点的定位、编码点的识别,可以得到编码点的编码以及标志点的中心图像坐标。利用这些结果,经过相对定向、绝对定向、三维重建以及光束平差,最后加入标尺约束及温度补偿,可以得到标志点准确的三维坐标。XJTUDP 是本课题组开发的用于工业检测的近景摄影测量系统^[18],利用该系统能在较短的时间内准确地获得物体表面关键点的三维信息,其测量精度

在 0.1 m 的测量范围内可以达到 0.01 mm。

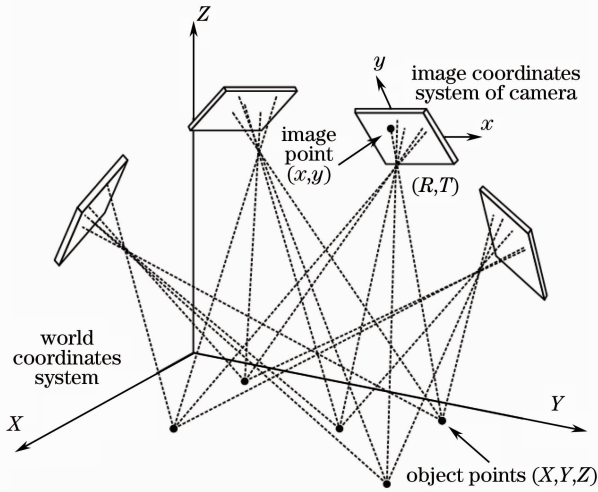


图 2 摄影测量原理示意图

Fig. 2 Principle of photogrammetry

3.2 单像空间后方交会

单像空间后方交会^[19],是指利用图像上不少于 3 个图像点坐标及其对应的物方点三维坐标,来求解相机在拍摄该图像时的外方位参数(相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 以及平移矩阵 \mathbf{T})的过程。摄影测量中通常是将共线方程线性化后迭代求解。这种求解方法属于非线性优化问题,需要较为准确的外方位元素初值。

采用基于三个控制点的角锥体法来求解外方位元素的初值。角锥体法利用摄影光束角锥体中的像方空间和物方空间的光线间顶角相等原理,来确定像片的外方位元素。如图 3 所示, P_1, P_2 和 P_3 表示世界坐标系下的三个已知坐标物体点(控制点), p_1, p_2 和 p_3 分别为三个点在摄站 S 上对应的图像点,因

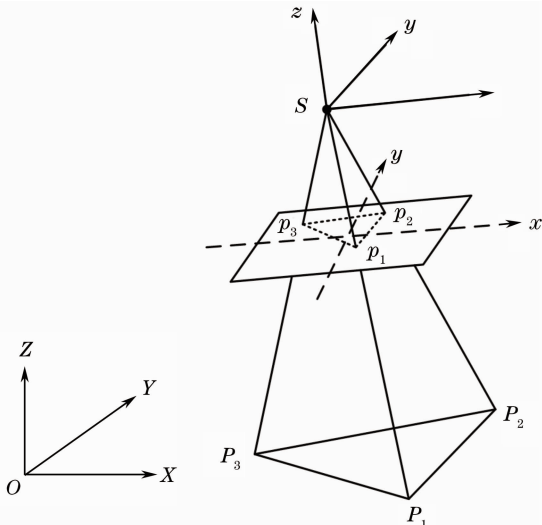


图 3 三点角锥体

Fig. 3 Three-point pyramid

此角锥体 $S-p_1p_2p_3$ 和 $S-P_1P_2P_3$ 相似。

在像空间坐标系下,对于角锥体 $S-p_1p_2p_3$,可以计算得到

$$\begin{aligned}\cos\angle Sp_1Sp_2 &= \frac{Sp_1^2 + Sp_2^2 - (p_1p_2)^2}{2Sp_1 \times Sp_2}, \\ \cos\angle Sp_1Sp_3 &= \frac{Sp_1^2 + Sp_3^2 - (p_1p_3)^2}{2Sp_1 \times Sp_3}, \\ \cos\angle Sp_2Sp_3 &= \frac{Sp_2^2 + Sp_3^2 - (p_2p_3)^2}{2Sp_2 \times Sp_3}.\end{aligned}\quad (3)$$

而在世界坐标系下,对于角锥体 $S-P_1P_2P_3$,也存在同样的关系

$$\begin{aligned}\cos\angle SP_1SP_2 &= \frac{SP_1^2 + SP_2^2 - (P_1P_2)^2}{2SP_1 \times SP_2}, \\ \cos\angle SP_1SP_3 &= \frac{SP_1^2 + SP_3^2 - (P_1P_3)^2}{2SP_1 \times SP_3}, \\ \cos\angle SP_2SP_3 &= \frac{SP_2^2 + SP_3^2 - (P_2P_3)^2}{2SP_2 \times SP_3}.\end{aligned}\quad (4)$$

在(4)式中,只有 SP_1, SP_2 和 SP_3 三个长度是未知数,可以通过参数消元解一元四次方程法或迭代法求解。采用后者,迭代法的初值可表示为

$$\begin{aligned}SP_1 &= \frac{Sp_1}{2} \times (P_1P_2/p_1p_2 + P_1P_3/p_1p_3), \\ SP_2 &= \frac{Sp_2}{2} \times (P_1P_2/p_1p_2 + P_2P_3/p_2p_3), \\ SP_3 &= \frac{Sp_3}{2} \times (P_2P_3/p_2p_3 + P_1P_3/p_1p_3).\end{aligned}\quad (5)$$

求得三边长 SP_1, SP_2 和 SP_3 之后,则可得三个物方点在像空间坐标系下的坐标

$$P'_i = p_i \times SP_i / Sp_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

现在,三个物体点在世界坐标系 P_i 和像空间坐标系下的坐标 P'_i 均为已知,二者存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times P_i = P'_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (7)$$

由于旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 分别只有 3 个独立变量,因此共有 6 个未知量,而利用三个物体点一共可以得到 9 个方程,因此求解(7)式可以得到两个坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 。

3.3 基于摄影测量校正的 DIC

传统的二维 DIC 要求在测量过程相机的光轴必须严格垂直于被测物表面,但是在实际的测量过程是这个条件是无法完全满足的,因此必然会引入测量误差。提出一种基于摄影测量校正的斜光轴二维 DIC 方法,这种方法不要求的光轴垂直于被测物表面。如图 4 为本文方法的示意图,其主要步骤包括:

1) 试件准备。实验开始前,在被测试件表面首

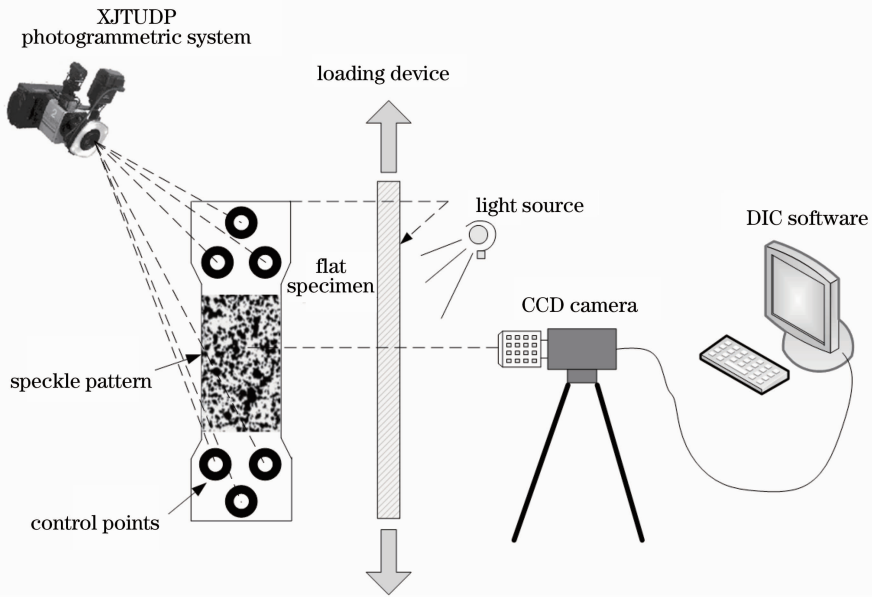


图 4 基于摄影测量校正的斜光轴二维 DIC 方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of slant-axis 2D DIC method based on photogrammetry correction

先喷涂散斑图案,然后再粘贴不少于 3 个圆形标志点(控制点)。

2) 测量控制点三维坐标。利用本项目组开发的 XJTUDP 摄影测量系统测量所粘贴的控制点并得到其三维坐标,拟合这些控制点可以得到表示试件表面的控制面 P 。

3) 相机内参数标定。多数二维 DIC 研究中通常忽略相机镜头畸变的影响,然而研究^[20]表明,要提高测量精度,必须考虑镜头畸变对测量结果的影响,对相机进行标定。采用一种基于摄影测量的相机自标定方法对相机进行标定^[21],并得到相机的内参数。

4) 试件安装及相机定位。将试件安装到加载装置上,安装测量相机(相机光轴不要求垂直于试件表面)并放置光源等附件。开始加载前,先用安装好的相机从倾斜的方向采集一幅图像,对该图像进行椭圆检测,得到控制点的图像坐标,图像识别不是论述重点,在此不作详述,请参考本课题组之前的论文^[22]。由于控制点的三维坐标在步骤 2) 已经获得,因此利用 3.2 节介绍的单像空间后方交会法可以获得此时单目相机的外方位参数,即相机坐标系相对于物方坐标系的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

5) 采集变形图像。开始加载,加载的同时利用相机采集试件的变形图像。采集完成后,选择感兴趣的变形区域,并进行散斑相关匹配,匹配完成后,利用步骤 3) 中标定得到的相机内参数对匹配结果进行畸变校正。

6) 三维重建及位移场、应变场计算。图 5 为利用控制面进行三维重建的原理示意图,设相机投影中心为 C ,对于每一个校正后的散斑匹配图像点 m , C 和 m 的连线即为该点的投影射线 L 。利用投影射线 L 与步骤 2) 中得到的控制面 P 相交即可得到 m 点在控制面中对应的三维点 M 。由于控制面 P 表示的是试件表面所对应的平面,因此就完成了对图像点 m 的三维重建。最后,利用得到的三维点坐标,计算获得相应的位移场及应变场^[23]。

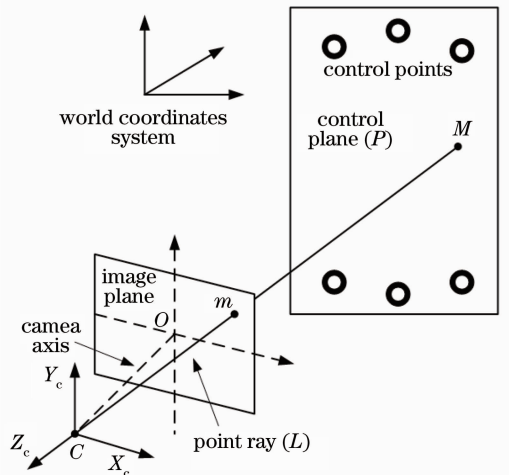


图 5 利用控制面进行三维重建

Fig. 5 3D reconstruction using control plane

4 实验及分析

应用本文方法测量薄板钢材试件(试件的长度

为 160 mm, 宽度为 30 mm, 厚度为 1 mm) 在单向拉伸实验中的变形、应变, 并通过与本课题组之前研发的双目三维 DIC 系统的测量结果进行对比来验证本文方法的测量精度。

4.1 硬件组成

图 6 为测量实验现场。为了方便与三维 DIC 方法对比, 在拉伸实验过程中, 采用夹角约为 30° 的左右两个相机同时拍摄试件的变形图像。首先对左、右相机两组图像, 用已有的三维 DIC 方法进行处理得到一组数据, 然后单独对左相机图像, 利用本文方法计算得到另外一组测量数据, 二者对比以验证本文方法的测量精度。

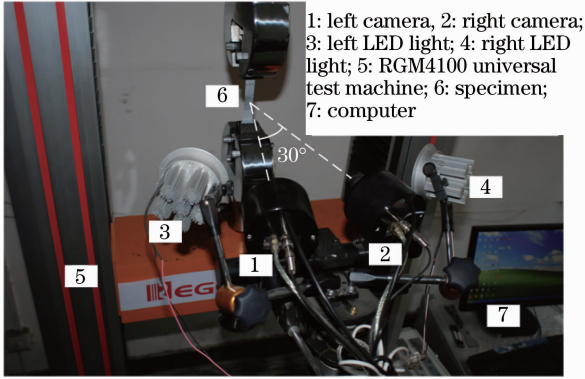


图 6 实验现场

Fig. 6 Experimental site

图 7 为本文方法中用到的 XJTUDP 摄影测量系统, 该系统的主要组成包括一个单反相机(相机型号为尼康 D80, 像素数 $3872 \text{ pixel} \times 2592 \text{ pixel}$, 像素大小为 $6.1 \mu\text{m}$, 镜头焦距为 24 mm), 两根高精度比例尺[长度分别为 89.597 mm 和 89.521 mm, 精度为 0.001 mm, 温度膨胀系数为 $22.4 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$], 一组编码点(12 位编码, 共 300 个)及一个笔记本电脑。

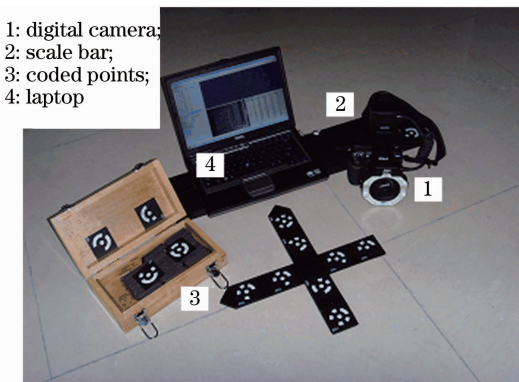


图 7 XJTUDP 系统组成

Fig. 7 System components of XJTUDP

4.2 实验过程及结果

实验开始前, 首先在试件表面喷射黑白相间的

散斑图案, 并在两端粘贴六个圆形标志点(控制点), 然后用 XJTUDP 系统测量这些控制点的三维坐标。图 8 显示的是一张摄影测量的工程图片, 在贴有控制点的试件周围均匀放置一些编码点, 再放置两根比例尺, 然后用数码相机从不同方位拍取照片, 相机光圈大小设为 8, 拍摄距离以保证标志点在图像上的直径不小于 10 pixel 为准。为了保证标志点能够被正确的识别, 拍摄时要求相机与标志点法线之间的夹角小于 45° , 另外为了保证测量精度, 对于小型物体一般要求从侧面围绕被测物每隔约 45° 拍摄 1 张照片, 最后再从被测物上方拍摄 2 张相互垂直的照片, 因此一般共需拍摄 10 张不同方位的照片。XJTUDP 系统经过标志点检测、预定向、三维重建和捆绑调整等过程就得到了所有标志点的三维坐标, 包括编码点和非编码点(控制点), 图 9 为显示在 OPENGL 空间里的摄影测量计算结果。表 1 显示的六个控制点的三维坐标以及拟合这些控制点得到的控制面的方程。

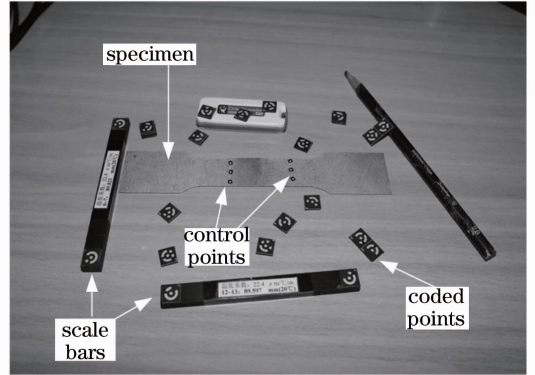


图 8 摄影测量图片

Fig. 8 Photogrammetry image

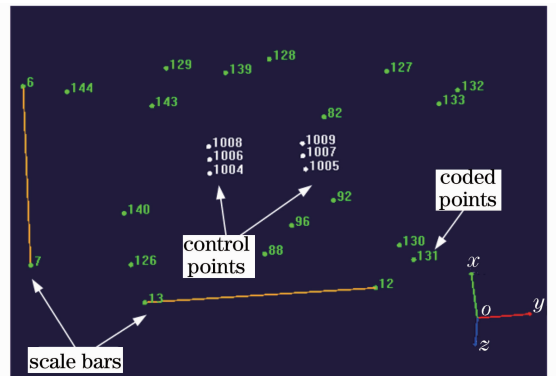


图 9 OPENGL 空间里显示的摄影测量计算结果

Fig. 9 Calculated photogrammetric result displayed in OPENGL space

表 1 控制点三维坐标及平面拟合结果

Table1 3D coordinates of control points and plane fitting result

Control points	X /mm	Y /mm	Z /mm
1	5.2196	-13.8765	-350.0971
2	2.6556	23.1356	-351.7103
3	-1.4604	-13.8936	-348.6959
4	-3.7991	22.1299	-350.2913
5	-7.8697	-14.1726	-347.3460
6	-10.0245	22.0802	-349.0114
Control plane	-0.2037X-0.0567Y-0.9774Z-341.9047=0		

得到控制点三维坐标及控制面方程之后,将贴有控制点的试件安装到实验机上并放置测量相机。为了方便与已有的三维 DIC 方法对比,使用内参数及相对关系已经标定好的夹角约为 30° 的双相机同步采集变形图像。测量时,两个相机对称的放置在试件两侧,与试件法线方向的角度大概分别为 15°。开始测量前,首先采集一幅照片用于相机定位,在这里只对左相机进行定位计算,对定位图像进行标志点检测得到控制点的图像坐标,由于控制点的三维坐标已经获得,因此利用 3.2 节介绍的单向空间后方交会法可以求取相机坐标系相对于世界坐标系的方位,包括旋转矩阵 R 和平移矩阵 T

$$R = \begin{bmatrix} -0.936 & -0.097 & 0.338 \\ -0.113 & 0.993 & -0.029 \\ -0.332 & -0.066 & -0.941 \end{bmatrix},$$

$$T = \begin{bmatrix} 123.315 \\ -11.637 \\ -325.183 \end{bmatrix}.$$

完成左相机定位后,开始拉伸实验并采集变形图像。实验过程中共采集到 50 个状态的图像,图像采集完成后,分别用已有的双目三维 DIC 的方法和基于摄影测量校正的单目 DIC 方法进行计算(只使用左相机图

像)。两种方法中均以第一个状态的左相机图像为参考图像,为了方便对比,选择相同的计算区域并使用同样的参数划分子图像(面片大小 15 pixel×15 pixel,步长为 13 pixel),如图 10 所示。

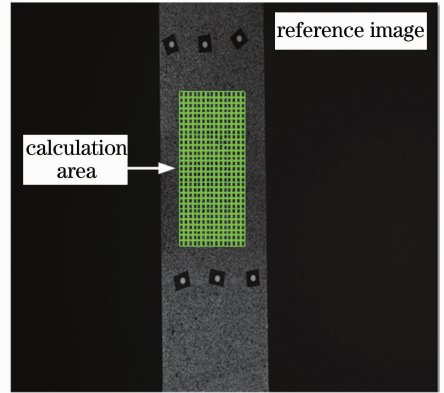


图 10 参考图像及计算区域

Fig. 10 Reference image and calculation area

本文方法按照 3.3 节中介绍的基于点的投影射线与控制面交会的方法进行三维重建,对于每一个状态,共得到 435 个点,然后计算位移场及应变场。为了验证本文方法的测量精度,将得到的结果与双目三维 DIC 的计算结果进行对比。图 11 显示的是在所有 50 状态中,两种方法得到的位移与主应变的平均偏差曲线。从图 11 可以看到位移的平均偏差最大值不超过 0.04 mm,而主应变的平均偏差最大值不超过 0.2%。从图 11 中也可以看到,在试验刚开始的前十个状态,位移和主应变的偏差值都有一个较快增大的阶段,然后在波动中趋于平稳,分析其原因,可能是因为试件在拉伸过程中发生了微小的离面变形。二维 DIC(包括本文方法)的基本前提是假设试件发生的是二维面内变形,试件发生离面变形必然引入一定的测量误差,关于离面变形对测量精度的影响请参考文献[24]。取计算区域的中心点

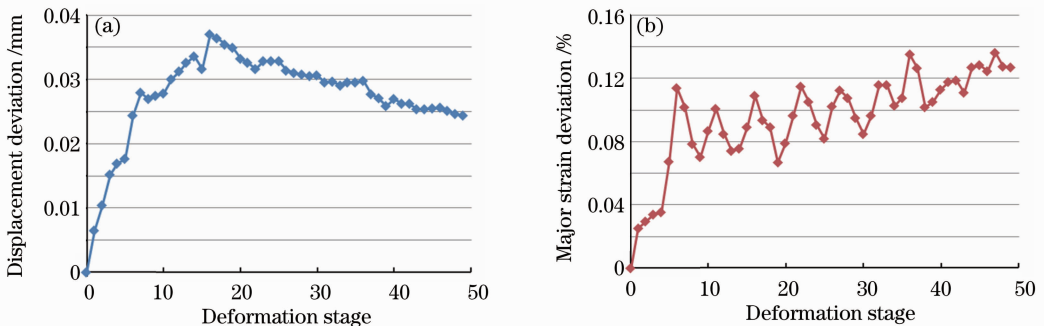


图 11 三维 DIC 和本文方法得到的(a)位移,(b)主应变的平均偏差曲线

Fig. 11 Average deviation curves of (a) displacement and (b) major strain between 3D DIC and our method

C 进行分析,图 12 为三维 DIC 方法计算得到的 C 点的运动轨迹图(部分状态),从图中可以看到,C 点的离面位移约为 0.2 mm,且在其周围上下波动,双目三维 DIC 不受离面变形的影响,而二维 DIC(包

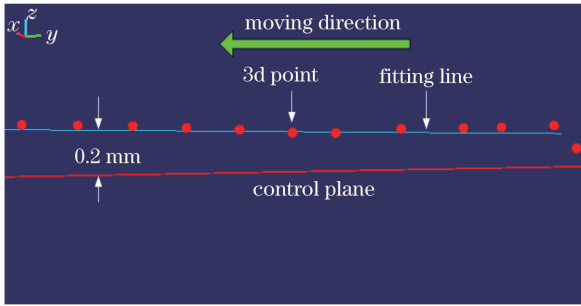


图 12 计算区域中心点的三维轨迹图

Fig. 12 3D trajectory of the central point of calculation area

括本文方法)无法测量离面变形,这应该是导致应变偏差在小范围内上下波动的原因。在试验过程中,控制离面变形量可以提高本文方法的测量精度。

图 13 显示的是对于第 50 个状态(试验结束状态),两种方法测得的位移及主应变偏差色谱图,从图中可以看到,位移偏差最大值不超过 0.04 mm,而主应变偏差最大值不超过 0.5%。从图 13 中可以看到,位移及主应变偏差在计算区域内没有呈现出平均分布的状态,原因同样可能是因为试件的变形不是绝对的二维面内变形所致。图 14 显示的是利用本文方法测得的第 50 个状态(试验结束状态)中试件的位移场及主应变场,可以看到试件的最大位移值为 12.68 mm,发生的最大主应变值为 36.77%。

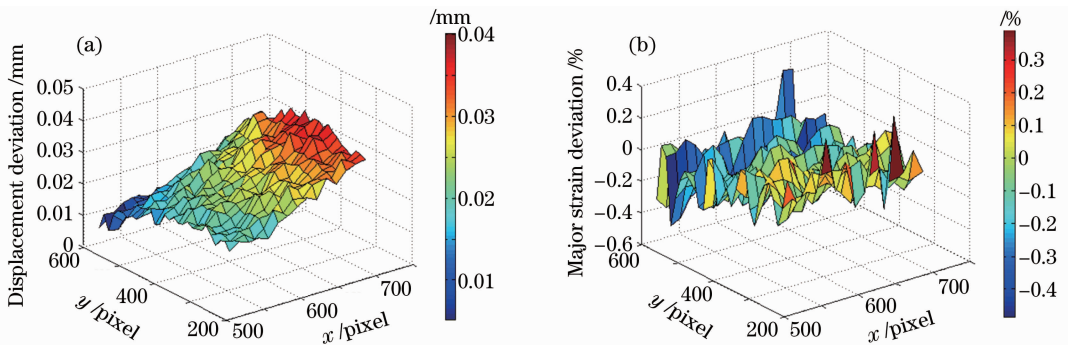


图 13 三维 DIC 和本文方法得到的第 50 个状态的(a)位移,(b)主应变偏差色谱图

Fig. 13 Deviation chromatogram of (a) displacement and (b) major strain between 3D DIC and our method

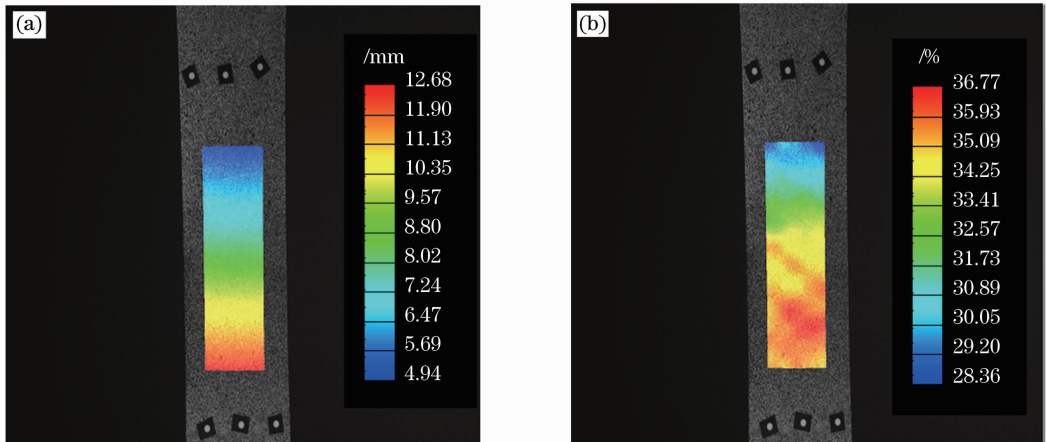


图 14 本文方法计算的第 50 个状态的(a)位移场,(b)主应变场

Fig. 14 (a) Displacement and (b) major strain field of the 50th state calculated by the proposed method

试验数据显示,本文的方法在相机光轴倾斜的情况下,位移的测量精度优于 0.04 mm,应变的测量精度优于 0.5%。在不考虑硬件影响的情况下,分析影响该方法测量精度的原因,主要包括:1)标志点的图像检测精度;2)控制点的三维坐标精度;3)DIC 算法本身的匹配精度;4)离面位移量;5)相机的

标定精度。其中 1),2)是本文方法区别于其他二维 DIC 方法的精度影响因素。对于圆形标志点的图像检测,使用亚像素拟合的方法,其中心点在图像上的定位精度可以达到 0.02 pixel。对于控制点的三维坐标,采用 XJTUDP 摄影测量系统进行测量,该系统在 0.1 m 的测量范围内可以达到 0.01 mm 的

测量精度,不低于三维 DIC 的测量精度。另外需要说明的是,控制点的三维坐标也可以通过其他方式(如三坐标测量机或接触式光笔等)获得,而控制点也可以选择其他图案。只要获得了这些控制点准确的三维坐标(不低于 0.01 mm),就可以利用这些控制点的三维坐标,按照本文的方法对测量相机进行斜光轴校正,并最终实现单相机、斜光轴情况下的准确的位移及应变测量。

5 结 论

提出一种基于摄影测量技术校正的斜光轴二维 DIC。与传统的二维 DIC 不同,本文方法不要求相机的光轴垂直于被测物表面,通过粘贴控制点的方法,不仅可以校正由于相机光轴倾斜引入的误差,而且可以直接测得真实的三维空间位移,而不是像素级位移。通过薄板钢材单向拉伸实验,与已有的三维 DIC 方法对比,实验结果显示,本文方法的位移测量精度优于 0.04 mm,应变的测量精度优于 0.5%。该方法在无法满足平行光轴的测量环境下有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 T. Chu, W. Ranson, M. Sutton. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Experimental Mechanics*, 1985, **25**(3): 232~244
- 2 Pan Bing, Wu Dafang. High-temperature digital image correlation method based on optical band-pass filtering imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 59~66
潘 兵, 吴大方. 基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 59~66
- 3 Pan Bing, Xie Huimin, Xia Yong *et al.*. Large-deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 400~406
潘 兵, 谢惠民, 夏 勇 等. 数字图像相关中基于可靠变形初值估计的大变形测量 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 400~406
- 4 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): 135~140
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): 135~140
- 5 Ye Nan, Zhang Liyan. Improved fractionized displacement transfer algorithm based on digital image correlation in large deformation applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 976~983
叶 南, 张丽艳. 大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 976~983
- 6 P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton. Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments [J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(3): 981~990
- 7 B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science & Technology*,

- 2009, **20**(6): 062001~062017
- 8 M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm *et al.*. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision [J]. *Photo-Mechanics*, 2000, **77**: 323~372
- 9 Ye Nan, Zhang Liyan. Determining plastic strain ratio of sheet metal based on stereo vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3515~3523
叶 南, 张丽艳. 基于立体视觉的板料塑性应变比测量 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3515~3523
- 10 Meng Libo, Jin Guanchang, Yao Xuefeng. Errors caused by misalignment of the optical camera axis and the object surface in the DSCM [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2006, **46**(11): 1930~1932 1936
孟利波, 金观昌, 姚学锋. DSCM 中摄像机光轴与物面不垂直引起的误差分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, **46**(11): 1930~1932 1936
- 11 Gong Hao, Lü Naiguang, Lou Xiaoping *et al.*. A method of verticality adjusting between optical axis and carrier in two-dimensional vision measurement [J]. *J. Beijing Institute of Machinery*, 2006, **21**(3): 35~38
龚 昊, 吕乃光, 娄小平 等. 二维视觉测量中光轴与载物台垂直度调节方法 [J]. *北京机械工业学院学报*, 2006, **21**(3): 35~38
- 12 Zhao Jingjing, Bai Rulin, Li Du *et al.*. A new method of verticality adjusting between optical axis and object surface of embedded machine vision controller [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(5): 63~69
赵晶晶, 白瑞林, 李 杜 等. 嵌入式机器视觉光轴与物面垂直度调节新方法 [J]. *光电工程*, 2010, **37**(5): 63~69
- 13 Jeffrey D. Helm, J. R. Deaner. Off-axis two-dimensional digital image correlation [C]. Proc 2004 SEM X Int. Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2004-06-7-10 Connecticut: SEM, 2004; Costa Mesa, 2004
- 14 Chen Daqing, Gu Jihua. Study on the digital image correlation method for dynamic displacement measurement in the case of slant optical axis [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, **18**(2): 89~93
陈大庆, 顾济华. 斜光轴数字图像相关法动态位移测量研究 [J]. *光电子技术与信息*, 2005, **18**(2): 89~93
- 15 Tang Zhengzong, Liang Jin, Xiao Zhengzhong *et al.*. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(10): 2244~2253
唐正宗, 梁 晋, 肖振中等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2244~2253
- 16 B. Pan, H. Xie, Z. Wang. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(28): 5501~5509
- 17 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 Engng.*, 2009, **47**(7-8): 865~874
- 18 Zhang Dehai, Liang Jin, Tang Zhengzong *et al.*. Exploitation and study of close range industry photogrammetry system based on large-scale complex surface products [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(5): 122~128
张德海, 梁 晋, 唐正宗 等. 大型复杂曲面产品近景工业摄影测量系统开发 [J]. *光电工程*, 2009, **36**(5): 122~128
- 19 T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle *et al.*. Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications [M]. UK: Whittles Publishing, 2006
- 20 S. Yoneyama, H. Kikuta, A. Kitagawa *et al.*. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(2): 023602~023609
- 21 Z. Xiao, J. Liang, D. Yu *et al.*. An accurate stereo vision system using cross-shaped target self-calibration method based on

- photogrammetry [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(12): 1252~1261
- 22 J. W. Liu, J. Liang, X. H. Liang *et al.*. Videogrammetric system for dynamic deformation measurement during metal sheet welding processes [J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49** (3): 033601~033608
- 23 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
- 24 M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari *et al.*. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2008, **46**(10): 746~757