

基于单摄像机的三维位移测试方法

孙 伟¹ 何小元² 郑 翔²

(¹ 南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016; ² 东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096)

摘要 基于三维位移测量手段在工程技术领域的必要性和重要性,开展了基于单摄像机和数字图像相关的三维位移测试方法研究。基于图像位移场矢量中心和斜率与面内和离面位移的分别对应关系,采用 Savitzky-Golay (SG) 微分滤波器分离图像位移子区内的常数项与一次项,可实现物体三维位移分量的有效分离。以针孔摄像机成像模型为基础,开展了相应的数值模拟实验及悬臂梁端部受载的实验,发展了与三维线性变形对应的散斑图模拟方法,验证了基于二阶位移模式的牛顿-拉夫森迭代法的精度和适用性。数值模拟与实验结果均验证了三维位移测试方法用于实现物体三维位移重构的可行性和优越性。

关键词 光学测量; 针孔摄像机成像模型; 数字图像相关; 二阶位移模式; 牛顿-拉夫森迭代法

中图分类号 O348; TP301 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1723

Three-Dimensional Displacement Measurement Based on Single CCD Camera

Sun Wei¹ He Xiaoyuan² Zheng Xiang²

(¹ College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)
² Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract Owing to the necessity and importance of the technique of three-dimensional (3D) displacement measurement in the field of engineering, a 3D displacement measurement system based on single CCD camera and digital image correlation is developed. With regard to the relationship between the center and the slope of the displacement vector and displacements in- and out-of the object plane, two dimensional Savitzky-Golay (SG) digital differentiator (an operator based on local subset coordinates) is employed to calculate constant terms (corresponding to the in-plane components) and the first order terms (corresponding to the out-of-plane components). On the theoretical basis of the pin-hole camera imaging model, a numerical simulation and an experiment on a non-uniformly deformed cantilever beam are conducted. In addition, the simulated speckle images associated with the 3D deformation are generated, which is further employed to validate the effectiveness and precision of the Newton-Raphson iterative method with a shape function of the second order. Simulated and experimental results demonstrate that both in-plane and out-of-plane displacements can be accurately retrieved using the proposed method.

key words optical measurement; pin-hole camera imaging model; digital image correlation; shape function of the second order; Newton-Raphson iterative method

1 引 言

20 世纪 80 年代提出了数字图像相关方法 (Digital image correlation method, DICM)^[1,2], 现在它已成为实验力学领域一种重要的光学测量方法,可用于解决实验力学中最基本的位移和变形测

量问题^[3,4]。传统的基于单摄像机的二维 DICM,只能测量物体表面的面内位移。为实现三维测量, P. F. Luo 等^[5,6]提出了基于双摄像机机的三维 DICM,其基本原理是双目立体视觉,即采用光轴相交的双摄像机图像系统。姚学锋等^[7]采用立体摄影

收稿日期: 2008-01-15; 收到修改稿日期: 2008-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(10727201)资助课题。

作者简介: 孙 伟(1980—),女,讲师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: nancysun@nuaa.edu.cn

导师简介: 何小元(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: mmhxy@seu.edu.cn

术与 DICM 相结合的方法研究三维变形场。虽然该方法能得到摄像机的内外参数,但整个标定的过程非常繁琐,难以在实际应用中推广,因此也限制了三维 DICM 在实际测量中的应用。J. D. Helm 等^[8]又提出了新的摄像机标定方法,简化了标定过程,并提出了新的三维数字相关方法,但需要采用非线性迭代法求解,而如何确定迭代初值并没有得到解决。汪敏等^[9]提出了基于物体内部三维位移场分析的 DICM,但目前仍处于数值模拟阶段。

通常情况下物体并非为绝对刚体,而为弹性体。由于载荷的作用或者温度的变化,物体内各点在空间的位置将发生变化,即产生位移。这一移动过程中,弹性体将同时发生两种可能的变化:刚体位移和变形位移。其中变形位移与弹性体的应力有着直接的关系,因此变形的测试更具有现实意义及工程应用价值。

由针孔摄像机成像模型可知,当物体发生三维位移、变形时,相应的图像位移矢量中心的偏移与物体的面内位移相关,而图像位移的斜率与物体的离面位移相关。因此通过分析图像位移矢量场,提取位移矢量场的中心及斜率,即可实现物体面内位移和离面位移的分离。因此本文利用单摄像机和 DICM 开展了三维位移的测试研究。

2 基本原理

2.1 光路分析

由图 1 的针孔摄像机成像模型可知^[10,11],当物体发生离面位移 d_b 时,物体表面距离光轴为 h 的点将在图像平面上产生虚面内位移 u_i :

$$u_i = \frac{d_b h'}{b} = \frac{M h d_b}{b} = \frac{M h' d_b}{a}, \quad (1)$$

式中 M 为成像系统的放大倍率, a 为像距, b 为物距, h' 和 H 分别为物点在发生离面位移前后相应像点

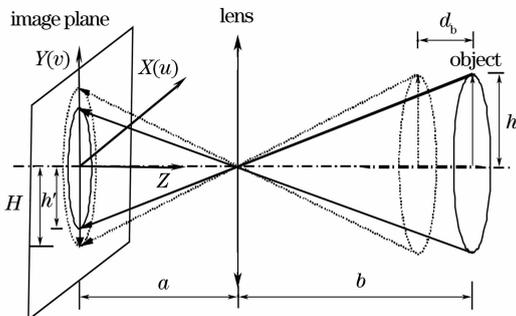


图 1 针孔摄像机成像模型

Fig. 1 Pin-hole camera imaging model

与光轴的距离。

当物体发生三维位移时,图像平面上的点在 X 方向发生的合成位移 u_i 将由实际面内位移 u (由物体面内位移引起) 和虚面内位移 u_i (由物体离面位移引起) 合成,即

$$u_i = u + \frac{M h' d_b}{a}. \quad (2)$$

类似地, Y 方向的合成位移 v_i 由实际面内位移 v (由物体面内位移引起) 和虚面内位移 v_i (由物体离面位移引起) 合成,即

$$v_i = v + \frac{M h' d_b}{a}. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可知,常数项分量与面内位移相关,一阶项分量与离面位移相关,因此通过分离图像位移矢量场的斜率和截距即可分离面内位移和离面位移,从而实现物体的三维位移场重构。

2.2 散斑图模拟

模拟散斑图是按照散斑场的统计模型、CCD 的成像模型、散斑场变形的力学模型、图像采集系统的噪声模型,用数值的方法生成的散斑图。散斑图中的任何参数均可精确控制,故快捷方便、省时省力。此外,模拟散斑图完全避开了实验中环境干扰、人工控制误差等一些不确定因素的影响,从而能更有效地研究 DICM 的本质^[12]。

当物体发生三维刚体位移时,相应的图像位移场分布如(2)式和(3)式。当物体发生三维变形时,由于变形模式的多样性和复杂性,因此无法采用统一的数学表达式表述物体所发生的实际变形,本文只考虑物体在面内及面外均只发生线性变形的情况,变形模式采用如下形式:

$$\begin{cases} u_i = u_0 + u_x x + u_y y + (k_1 x + k_2 y)(x - x_0), \\ v_i = v_0 + v_x x + v_y y + (k_1 x + k_2 y)(y - y_0), \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_0, v_0 分别为 x, y 方向的面内位移分量, u_x, u_y, v_x, v_y 为面内变形分量, k_1, k_2 为与离面位移相关的常数。当物体产生三维线性变形时,相应的图像位移场分布呈二次非均匀分布,这与物体发生面内非均匀变形类似,因此可用与生成非均匀变形的模拟散斑场类似的方法,模拟发生三维线性变形后的散斑场。

(4) 式中设置参数 $u_0 = 2, v_0 = 1, u_x = 0.005, u_y = 0.00005, v_x = 0.00005, v_y = 0.005, k_1 = 0.0001, k_2 = 0.0001$ 。其中 (x_0, y_0) 对应于光轴中心,定义图像中心为: $x_0 = 128, y_0 = 128$ 。采用文献^[12]中模拟散斑图像的模型来模拟由三维刚体位移引起的变形后

的散斑图像。图像大小为 256 pixel×256 pixel, 高斯光斑数目为 1500 个, 高斯光斑大小为 3 pixel, 模拟的变形前后的散斑图像如图 2 所示。

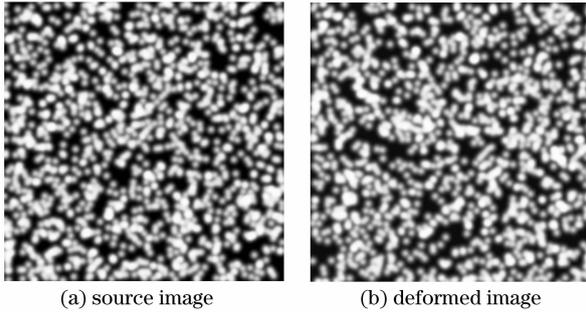


图 2 模拟的散斑图像

Fig. 2 Simulated speckle images

2.3 DICM

与物体的变形模式相适应, 数字图像相关技术中所采用的位移模式相应地取二阶模式^[12]。本文采用基于二阶位移模式的牛顿-拉夫森(Newton-Raphson)迭代法, 并选用最小平方距离相关函数:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2, \quad (5)$$

式中 $f(x_i, y_j)$ 为变形前的图像, $g(x'_i, y'_j)$ 为变形后的图像。(5) 式表示在变形前后的图像上, 各取大小为 $m \times n$ 的子区, 改变 $u_i = x_i - x'_i, v_i = y_j - y'_j$ 的值, 即在变形后的图像上移动子区, 可以得到不同的 C

值。使 C 取最小值的 u_i, v_i , 即是子区的位移。本文选用十二参数的二阶位移模式。

分别采用基于仿射变换的相关迭代法^[13]、Newton-Raphson 迭代法^[14]中的一阶和二阶位移模式, 对图 2 的源图像和目标图像作相关运算。模板大小为 41×41 , 计算区域均从 (50, 50) 到 (200, 200), 两个方向的间隔均取为 5, 因此计算点数为 $31 \times 31 = 961$ 。

计算结果表明, 采用二阶 Newton-Raphson 迭代法得到的结果最为平滑, 一阶次之, 而采用基于仿射变换的相关迭代法得到的结果却最差。为定性比较各种方法的好坏, 采用局部最小二乘拟合的方法对以上位移场作一次平面拟合, 并求解相应的平面斜率。由 (4) 式及相应的参数值可得位移场在两个方向的斜率均为 0.0078, 以此为基准可计算相应的计算误差, 结果如表 1 所示。由表 1 可见, 采用二阶位移模式可以精确求解由三维线性变形所引起的图像位移分布, 一阶次之。当采用一阶位移模式时, 基于局部坐标的 Newton-Raphson 迭代法得到的结果要优于基于仿射变换的相关迭代法(基于全局坐标)。这是由于当物体发生三维线性变形时, 相应的图像位移呈二阶非线性分布, 基于局部坐标的算法具有更强的适应性, 且基于二阶位移模式的 Newton-Raphson 迭代法得到的结果更为精确。

表 1 模拟散斑场计算结果比较

Table 1 Comparison of the calculated results of the simulated speckle images

	Newton-Raphson iterative method (shape function of second order)		Newton-Raphson iterative method (shape function of first order)		Iterative correlation method based on affine transformation	
	X	Y	X	Y	X	Y
Slope of the fitted plane / 10^{-3}	7.6941	7.691	7.6936	7.689	7.673	7.682
Relative error / %	1.3577	1.3974	1.3641	1.4231	1.6282	1.5128

2.4 三维位移分量分离原理

为实现三维线性位移分量的分离, 假设在物体上足够小的区域内其变形均为常量, 即为三维刚体位移。映射到图像位移场的分布, 即认为在较小的模板子区内图像位移服从线性分布。因此在较小的子区内可利用三维刚体位移分量的分离方法, 对三维线性位移分量进行提取和分离。由于假设只在局部较小的区域内成立, 因此应相应地采用基于局部坐标的方法来提取图像位移场的斜率和截距, 本文采用基于二阶位移模式的 Newton-Raphson 迭代法来分析图像位移场。

经典的 Savitzky-Golay(SG)微分滤波器可对含噪声的实验数据进行有效地平滑, 其基本原理是用

不同阶次的多项式分片对离散位移场进行最小二乘拟合^[15]。本文利用 SG 微分滤波器来提取图像位移场的一阶项和常数项。基本原理如下:

在图像位移场中选择 $(2M+1) \times (2M+1)$ ($M \geq 3$) 的子区, 采用一次多项式对该子区内的所有点作最小二乘拟合, 该多项式可表示为如下形式:

$$\begin{aligned} u_i(x, y) &= a_0 + a_1x + a_2y, \\ v_i(x, y) &= b_0 + b_1x + b_2y, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $x, y = -M \sim M$, (x, y) 为 (0, 0) 时为位移场子区的中心点, $a_{i=0,1,2}, b_{i=0,1,2}$ 为待定系数。由于未知数的个数小于方程的个数, 因此可采用最小二乘法来求解 (6) 式。(6) 式中的 u_i 可表示为如下形式:

$$u_t = \mathbf{X}a \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & -M & -M \\ 1 & -M+1 & -M \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M-1 & M \\ 1 & M & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_t(-M, -M) \\ u_t(-M+1, -M) \\ \vdots \\ u_t(0, 0) \\ \vdots \\ u_t(M-1, M) \\ u_t(M, M) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

由(7)式可知, $(a_0, a_1, a_2)^T = (X^T X)^{-1} X^T u_t$, 相应的一阶项等于 a_1 。由于采用基于图像子区的局部坐标, 相应的常数项 a_0 应转换为全局图像坐标系下的坐标值, 即 $a'_0 = a_0 - a_1 x_c - a_2 y_c$, 其中 (x_c, y_c) 为全局图像坐标系的原点。 Y 方向位移场的处理过程同 X 方向。局部最小二乘拟合法大大减小了噪声对图像位移场的干扰, 因此极大地提高了位移场常数项和一阶项的提取精度。

3 数值模拟

为模拟三维刚体位移, 在摄像机成像模型中的共线方程中引入三维线性位移参数: $u = 3 - 0.005x$, $v = 3$ 和 $w = -0.05x$ 。模拟的位移场分布如图 3(a) 所示。为分离三维位移分量, 需作如下标定: 物体离面位移与图像位移场斜率的关系; 物体离面位移与图像位移场截距的关系; 物体离面位移与图像放大倍率的关系。

由数值模拟值知, 图像位移场沿 Y 方向的斜率只与线性离面位移项 $w = -0.05x$ 有关(因为该方

向的面内位移为常数, $v=3$), 而沿 X 方向的斜率则不仅与线性离面位移项 $w = -0.05x$ 有关, 还与该方向的线性面内位移 $u = 3 - 0.005x$ 有关。为简便起见, 首先处理沿 Y 方向的位移场。具体过程为: 求取 Y 方向位移场的斜率(采用 SG 微分滤波器), 根据物体离面位移与图像位移场斜率的关系, 可得到相应的离面位移分量; 得到离面位移分量后, 根据物体离面位移与图像位移场截距的关系, 可求得与纯离面位移对应的图像位移场沿 Y 方向的截距; 然后采用 SG 微分滤波器求解原图像位移场的截距, 并转换为全局坐标系下相应的截距数值; 以上两个截距值相减即得到了与 Y 方向图像面内位移相对应的截距, 进一步根据物体离面位移与图像放大倍率的关系, 即得到了物体沿 Y 方向的位移分量。采用同样的程序处理沿 X 方向的图像位移场, 可得到物体沿 X 方向的位移分量。分离结果如图 3(b) 所示, 相对误差如图 3(c) 所示。数值模拟结果表明, Z 方向的最大误差只有 3.54%, 验证了本文提出的分离算法的可靠性和精度。

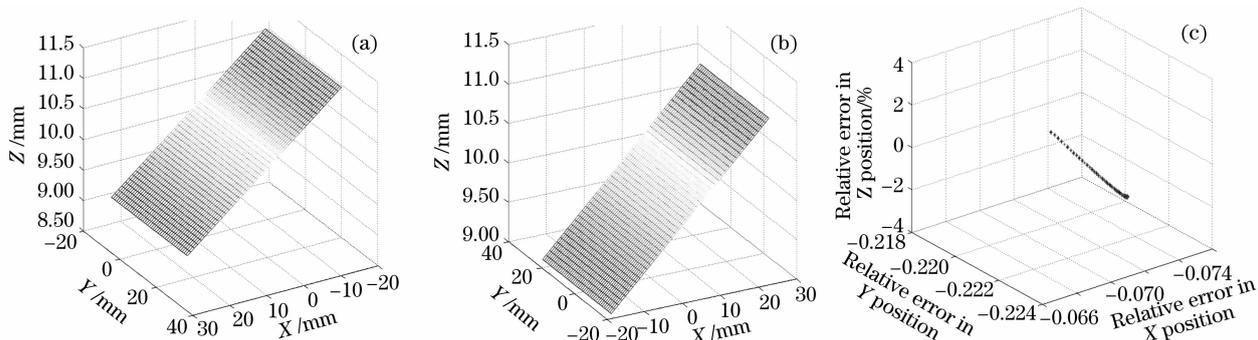


图 3 数值模拟结果。(a)位移场分布,(b)本文方法计算结果,(c)相对误差

Fig. 3 Simulated results. (a) Distribution of displacement field, (b) calculated result by the proposed method, (c) relative error

4 实验研究

4.1 标定过程

采用一硅片作为试件标定测试系统常数, 实际测量过程中选择测试硅片中心的一块矩形区域。试

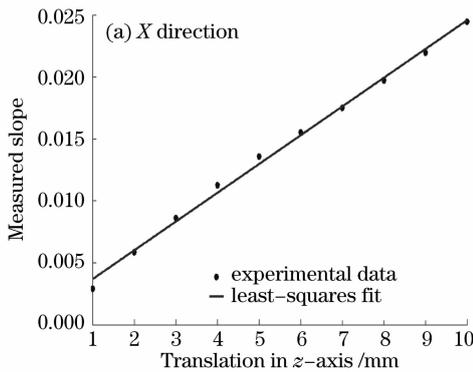
件表面具有很好的散斑分布且表面平整, 因此无需人工制斑处理且可减小由试件表面各点高度差异给测试带来的误差。首先将硅片放置于三维精密移动台上(精度为 $1 \mu\text{m}$), 保证摄像系统光轴与试件表面

尽可能垂直。试件表面采用白光照明,摄像机的焦距比数(f 值)设置为 22,以获得较小的孔径和较大的景深,采集图像时选用时间平均模式,即实验中参与相关运算的图像均为同一状态下 20 幅时间序列图像平均后的结果。

在实验开始前,需要对系统作精确的标定,标定过程如下:

1) 调节摄像系统各参数,保证产生清晰的像,记下此刻位置 A ;

2) 标定位置 A 处的放大倍率:沿 X 轴和 Y 轴分别给试件施加一系列连续的位移,采用基于仿射变换的相关迭代法计算相应的图像平移量。对得到的物体位移和图像平移之间的关系曲线作最小二乘线性



拟合,斜率即为相应的图像放大倍率 M 。调节试件回归原位,即将其沿 X 轴和 Y 轴的位移重新置 0;

3) 沿 Z 轴移动试件,间隔为 1 mm,共移动十次。将在新位置处采集的图像依次与位置 A 处的图像作相关运算,获得相应位置处图像位移场的斜率与截距。同时在每一个新位置处均需标定图像的放大倍率。

4) 经过以上标定步骤,得到物体离面位移与图像放大倍率、图像位移场斜率(s_{x3}, s_{y3})及截距(b_{x3}, b_{y3})的关系,分别如图 4、图 5 和图 6 所示。纯离面位移情况下的斜率和截距分别记为 s_{xw}, s_{yw} 和 b_{xw}, b_{yw} ,纯面内位移情况下的平移量记为 b_{xx} 和 b_{yy} 。因此整个实验的流程如图 7 所示。

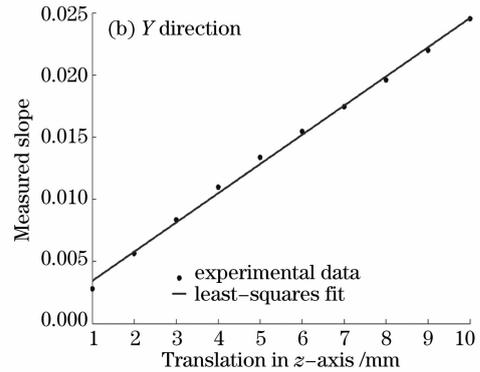


图 4 图像位移场斜率与物体离面位移的关系

Fig. 4 Relationship between image displacement slope and object out-of-plane displacement

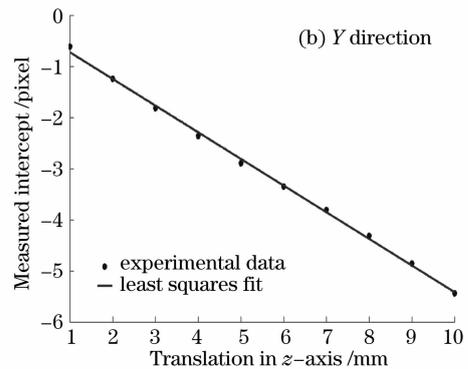
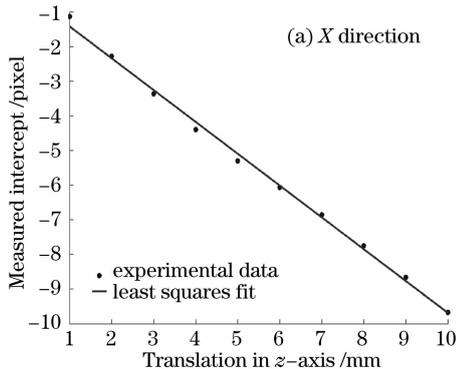


图 5 图像位移场截距与物体离面位移的关系

Fig. 5 Relationship between image displacement intercept and object out-of-plane displacement

值得注意的是,在标定各个位置处摄像系统的放大倍率时,面内图像平移值取整个图像位移场的平均值,放大倍率则由物体面内平移值与计算得到的图像实际平移量均值之间的最小二乘线性拟合结果得到。已知不同位置处的放大倍率即可标定出整个系统的像距^[16]。当物体产生纯离面位移时,采用全场最小二乘拟合的方法获取图像位移场的平均斜率与截距。由一系列的离面位移与图像位移场斜率

间的关系即可标定出整个系统的物距^[16]。

4.2 实验过程

为验证本文算法在实践中的可行性,采用悬臂梁端部加载的方法进行实验。试件尺寸:长 206 mm,宽 20 mm,高 2 mm。由经典的弹性理论知,当悬臂梁端部受载时,沿荷载方向(定义为 Z 方向,梁横截面的对称轴方向)将产生较大的位移,同时沿梁纵轴线方向(定义为 X 方向)亦有较小的位移,而梁横截

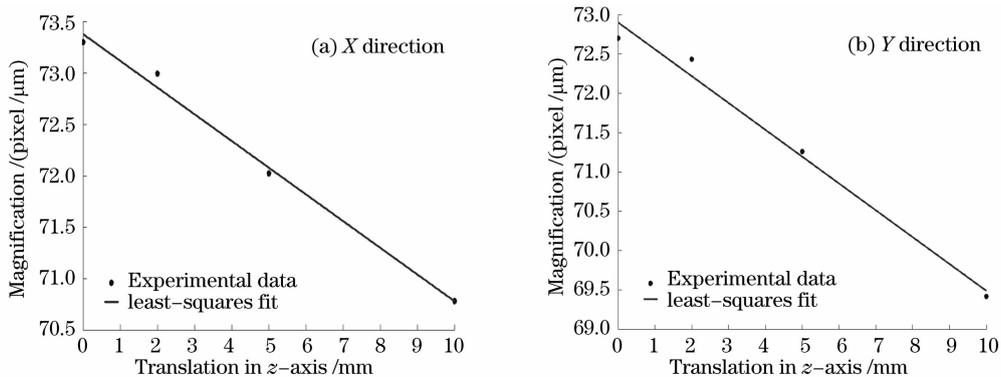


图 6 图像位移场放大倍率与物体离面位移的关系

Fig. 6 Relationship between image displacement magnification and object out-of-plane displacement

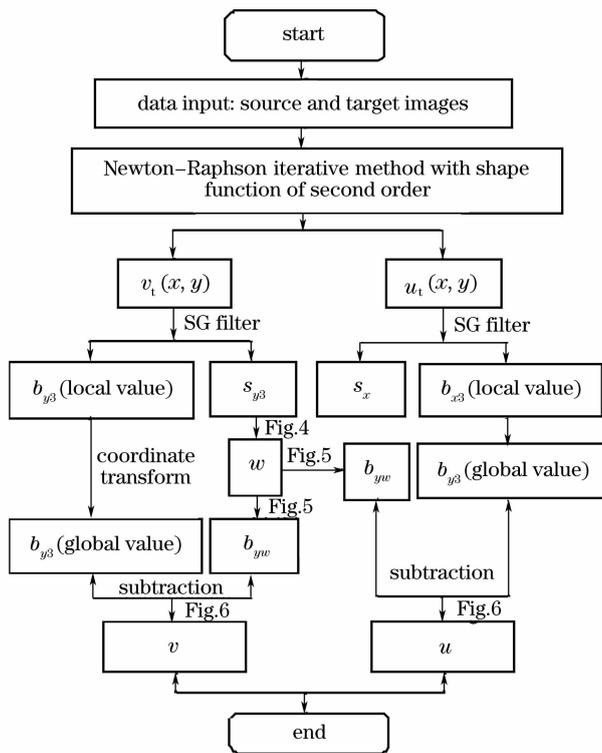


图 7 本文算法流程图

Fig. 7 Flow chart for the proposed method

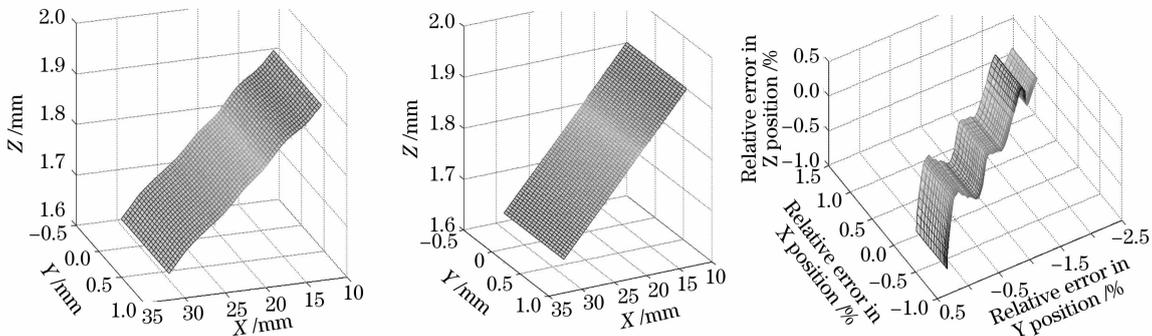


图 8 悬臂梁实验结果。(a)理论位移场分布,(b)本文方法计算结果,(c)相对误差

Fig. 8 Experimental results of a cantilever beam. (a) Theoretical distribution of displacement field, (b) calculated result by the proposed method, (c) relative error

面内与 Z 方向垂直的方向(定义为 Y 方向)位移应
为零。采用上节的方法对该测试系统进行标定,其
中面内位移间隔取为 $100\ \mu\text{m}$,离面位移间隔取为
 $500\ \mu\text{m}$, Z 方向移动范围在 $5\ \text{mm}$ 内。标定后采用
三维精密移动台对悬臂梁端部加载,移动位移为
 $2.1\ \text{mm}$ 。为验证本文提出的算法在三维位移场分离
中的可靠性,分别在 X 方向和 Y 方向施加 $200\ \mu\text{m}$ 的
刚体位移。由经典的弹性力学理论可得相应的位移
场分布如图 8(a)所示。采用本文方法求解三维位移
场的分布,结果如图 8(b)所示,相对误差如图 8(c)所
示。实验结果表明,实验结果数值与理论值吻合得较
好,最大误差不超过 2.5% 。该验证实验进一步验证
了本论文方法在实践中的可行性与精度。

实验结果表明,测量精度基本满足宏观测量要
求,但相对精密测量,精度还有待提高。通过对标定
与实际测量操作过程的分析,认为误差的主要来源有:
摄像系统的光轴与试件表面存在倾角;周围环境
误差及 CCD 的噪声影响;三维精密移动台的定位误
差;相关运算误差及数据平均和拟合误差;标定算法
误差;分离算法误差;另外操作过程中还存在随机误
差和粗大误差等。

5 结 论

提出了基于单摄像机和 DICM 相结合的三维
位移测试新方法。数值模拟结果验证了该算法的可
行性。模拟物体发生三维位移后形成的散斑图,讨
论适用的 DICM,通过各种方法的比较,确定基于二
阶位移模式的 Newton-Raphson 迭代法最为精确和
适用。采用悬臂梁端部受载的实验验证该方法的精
度和可行性,实验结果表明最大误差小于 3% 。

本方法的成功为开展基于单摄像机的三维动、
静态测试方法提供了可靠的理论与实验基础,也为
三维测试领域注入了新的活力,但亦存在一定的局
限性:基于位移模式阶次的限制,目前只能实现有限
变形的测试,且精度低于双目测试技术;采用的摄像
机成像模型为理想的针孔模型,由于透镜设计的复
杂性和工艺水平等因素的影响,实际透镜成像系统
不可能严格地满足针孔模型,镜头畸变问题不可
避免。

参 考 文 献

1 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital imaging techniques in

- experimental stress analysis[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~431
- 2 T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton *et al.*. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Exp. Mech.*, 1985, **25**(3): 232~245
- 3 Yang Yong, Yang Yanlei, Li Ming *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 197~201
杨 勇,王琰蕾,李 明 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 197~201
- 4 Chen Daqing, Gu Jihua, Jiang Jinhua. Study on the digital speckle correlation method for in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 907~912
陈大庆,顾济华,姜锦虎. 斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 907~912
- 5 P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton M A *et al.*. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. *Exp. Mech.*, 1993, **33**(2): 123~132
- 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 Yao Xuefeng, Lin Bisen, Jian Longhui *et al.*. Three-dimensions deformation field measurement combining digital speckle correlation technology with stereo photography [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(4): 473~476
姚学锋,林碧森,简龙晖 等. 立体摄影术与数字散斑相关方法相结合用于研究三维变形场[J]. 光学技术, 2003, **29**(4): 473~476
- 8 J. D. Helm, S. R. McNeil, M. A. Sutton. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(7): 1911~1920
- 9 Wang Min, Hu Xiaofang, Wu Xiaoping. Digital image correlation method for the analysis of 3-D internal displacement field in object [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, **55**(10): 5135~5139
汪 敏,胡小方,伍小平. 物体内部三维位移场分析的图像相关方法[J]. 物理学报, 2006, **55**(10): 5135~5139
- 10 Zhang Chuangxin, Xu Jinliang, Zhang Yougli *et al.*. Three-dimensional reconstruction of free-flying insect based on single camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 61~66
赵创新,徐进良,张永立 等. 基于单摄像机的昆虫自由飞行参量三维重构[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 61~66
- 11 R. S. Sirohi. *Speckle Metrology* [M]. New York: M Dekker Inc, 1993
- 12 Peng Zhou, Kenneth E. Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(8): 1613~1620
- 13 Zhifeng Zhang, Yilan Kang, Huanwen Wang *et al.*. A novel coarse-fine search scheme for digital image correlation method [J]. *Measurement*, 2006, **39**(8): 710~718
- 14 H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton *et al.*. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Exp. Mech.*, 1989, **29**(1): 261~267
- 15 Pan Bing, Xie Huimin. Full-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
- 16 Huang Yuanhao. Development of digital image correlation method for displacement and shape measurement[D]. Singapore: National University of Singapore, 2004