

文章编号: 0253-2239(2008)05-0894-08

基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法

孙 伟¹ 何小元² C. Quan³ 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)

³ 新加坡国立大学机械系, 新加坡 119260

摘要 基于三维位移测量在工程技术领域的必要性和重要性,开展了单摄像机和数字图像相关相结合的三维刚体位移测试方法的研究。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,采用最小二乘拟合法分离图像位移场的常量项与一次项,据此,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,开展了数值模拟及硅片平移实验,发展了与三维刚体位移对应的散斑图模拟方法,验证了基于仿射变换的相关迭代法的精度和适用性。数值模拟与实验结果验证了数字图像相关方法用于实现物体三维刚体位移重构的可行性和优越性,最大测量误差为 5%。

关键词 光学计量; 针孔摄像机成像模型; 数字图像相关; 基于仿射变换的相关迭代法; 三维刚体位移重构; 散斑图模拟

中图分类号 O348; TP301 文献标识码 A

Three-Dimensional Rigid Body Displacement Measurement Based on Digital Image Correlation

Sun Wei¹ He Xiaoyuan² Quan Chenggen³ Zheng Xiang²

¹ College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

² Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

³ Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260

Abstract Owing to the necessity and importance of the three-dimensional (3-D) displacement measurement technique in the field of engineering, a system based on a single CCD camera and a method of 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, a least-squares fit method is employed to calculate constant terms (corresponding to the in-plane component) and the first order terms (corresponding to the out-of-plane component), and the three-dimensional displacement components are separated. On the theoretical basis of the pin-hole camera imaging model, a numerical simulation and an experiment on three-dimensional translation of a silicon wafer are conducted. The simulation method of speckle images associated with the three-dimensional rigid body displacement is developed, which is further employed to validate the effectiveness and precision of the iterative correlation method based on affine transformation. Simulated and experimental results demonstrate that both in-plane and out-of-plane displacements can be accurately retrieved with the proposed method, and the maximum error is 5%.

key words optical metrology; pin-hole camera imaging model; digital image correlation; iterative correlation method based on affine transformation; retrieval of three-dimensional rigid body displacement; simulation of speckle images

收稿日期: 2007-10-09; 收到修改稿日期: 2007-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(1072720)和国家重点基础研究专项经费(2006CB300404)资助课题。

作者简介: 孙 伟(1980-),女,河南人,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,江苏人,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

1 引 言

自 20 世纪 80 年代数字图像相关方法 (Digital image correlation method, DICM) 被提出后^[1,2], 该方法在理论研究方面得到不断发展和完善的同时, 也围绕数字图像相关方法的应用开展了大量的工作。现在数字图像相关方法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^[3~5]。传统的基于单摄像机的二维数字图像相关方法, 只能测量物体表面的面内位移。为实现三维测量, P. F. Luo 等^[6,7]提出了基于双摄像机的三维数字图像相关方法, 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^[8]采用立体摄影术与数字图像相关方法相结合的方法研究三维变形场, 测试了编织复合材料试件的三维变形。虽然该法能得到摄像机的内外参量, 但整个标定的过程非常繁琐, 难以在实际应用中推广, 因此也限制了三维数字图像相关方法在实际测量中的应用。J. D. Helm 等^[9]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, 但该方法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^[10]提出了基于物体内部三维位移场分析的数字图像相关方法, 但该方法仍处于数值模拟阶段。

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。本文利用单摄像机和数字图像相关方法开展了三维刚体位移的测试研究。

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^[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

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

类似地, Y 方向的位移 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

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

由(2)式、(3)式可知, 常量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。

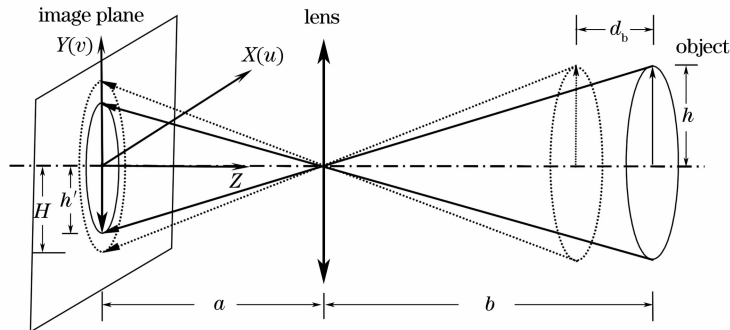


图 1 针孔摄像机成像模型

Fig. 1 Pin-hole camera imaging model

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。散斑图中的任何参量均可精确控制, 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数字图像相关方法的本质^[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、(3)式。以此为基础可模拟由三维刚体位移引起的变形后的散斑图像, 其中变形模式采用以下形式:

$$\begin{cases} u_k = u_0 + k_1(x - x_0) = k_1x + k_2, \\ v_k = v_0 + k_1(y - y_0) = k_1y + k_3, \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_k, v_k 分别为 x, y 方向的合成位移分量, u_0, v_0 分别为 x, y 方向的面内位移分量, k_1 为与离面位移相关的常量, $k_2 = u_0 + k_1x_0, k_3 = v_0 + k_1y_0$ 。

在(4)式中设置参量 $k_1 = 0.01, k_2 = 2, k_3 = 1$, 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 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 高斯光斑数目为 1500 个, 高斯光斑大小为 3 pixel, 则模拟的变形前后的散斑图像如图 2 所示。

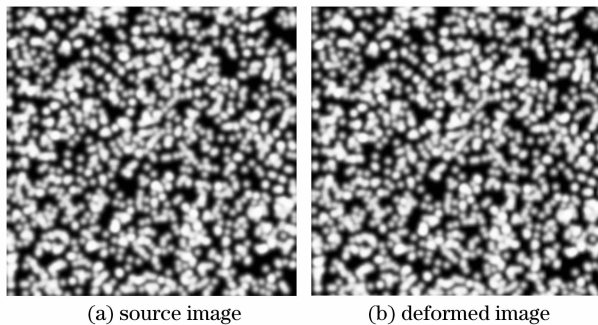


图 2 模拟的散斑图像

Fig. 2 Simulated speckle images

2.3 数字图像相关方法

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一阶模式^[13]。基于仿射变换的全局坐标位移模式包含了刚体平移、旋转、剪切和正应变等力学量, 所以可用作一阶形函数。为提高数字图像相关方法的测量范围(包括较大刚体转动和形变), 形函数模式采用基于全局坐标的形式:

$$\begin{cases} \xi = a_1 + (a_2 - 1)x + a_3y, \\ \eta = a_4 + a_5x + (a_6 - 1)y, \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} a_1 &= sx \cos \theta dx + sy dy (A \cos \theta - \sin \theta), \\ a_2 &= sx \cos \theta, \\ a_3 &= sy (A \cos \theta - \sin \theta), \\ a_4 &= sx \sin \theta dx + sy dy (A \sin \theta + \cos \theta), \\ a_5 &= sx \sin \theta, \\ a_6 &= sy (A \sin \theta + \cos \theta) \end{aligned}$$

构成 6 个仿射变换系数, (sx, sy) 和 (dx, dy) 分别为尺度因子和平移因子, θ 为旋转角度, A 为剪切因子。形函数包含了刚体平移、旋转、剪切和正应变。在传统的数字图像相关方法中, 均采用基于局部坐标的形函数, 其实质为形函数在子区中心点的一阶泰勒展开, 因此只能用于测试小变形和较小刚体转动的

情况。本文采用基于全局坐标的形函数, 精确表达了图像子区间的变形模式, 因此可准确测试含有较大刚体位移和转动及一阶形变的物体表面的位移值。

由牛顿-拉夫森(Newton-Raphson)迭代法^[14]可知, 当初值充分接近于真解时, 其迭代过程将按平方速度收敛。如果初值距离真解较远时, 则整个迭代过程可能会发散。因此合理的初值估计对于相关运算的收敛程度和速度具有重要影响。由基于仿射变换的位移模式的分析与讨论知, 基于仿射变换的位移模式可准确求解刚体位移及一阶形变量, 因此采用基于仿射变换的方法作初值估计具有相当高的可靠性。具体过程为:

1) 在参考图像中选取一组特征比较明显的区域, 通常选择散斑图案中最亮或者最暗的区域, 检测该区域的灰度最大值(若是散斑暗点则检测该区域的灰度最小值)(整像素级精度);

2) 采用曲面拟合法提高最值的识别精度, 即以灰度最大值所在位置为中心选择周围 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 或者 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的区域 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$, 且 $n \geq 3$), 对其作最小二乘曲面拟合, 拟合曲面的极值点所对应的位置即为亮点中心的坐标(亚像素级精度);

3) 在目标图像中重复前两个步骤求得匹配点 (x_i^*, y_i^*) 的坐标值;

4) 利用(5)式求解相应的仿射变换矩阵, 这样就得到了(5)式中各参量的初值。

由高斯分布公式可知, 高斯散斑的灰度分布具有平移和旋转不变性, 因此当物体发生变形时, 对应的高斯散斑由于标准差的变化产生高斯曲面的张开或聚拢变化, 这与物体的拉伸或收缩相对应。因此当物体发生变形后, 亦可采用相同的方法检测变形后散斑亮点的位置。综上, 基于曲面拟合的特征点定位技术保证了基于仿射变换的初值估计方法的可靠性和精度。

将两种技术有机结合, 本文提出了基于仿射变换的相关迭代法, 它基于特征点的仿射变换得到全场仿射变换参量的初值, 并对全场位移初值进行估计; 在此基础上, 采用基于仿射变换的位移模式[全局坐标形式, 即(5)式], 对仿射变换 6 个参量进行迭代优化; 最终得到匹配点的仿射变换坐标。具体流程如图 3 所示。

分别采用双参量法、曲面拟合法、频域相关法、牛顿-拉夫森迭代法和基于仿射变换的相关迭代法, 对图 2 的源图像和目标图像作相关运算。其中除了频

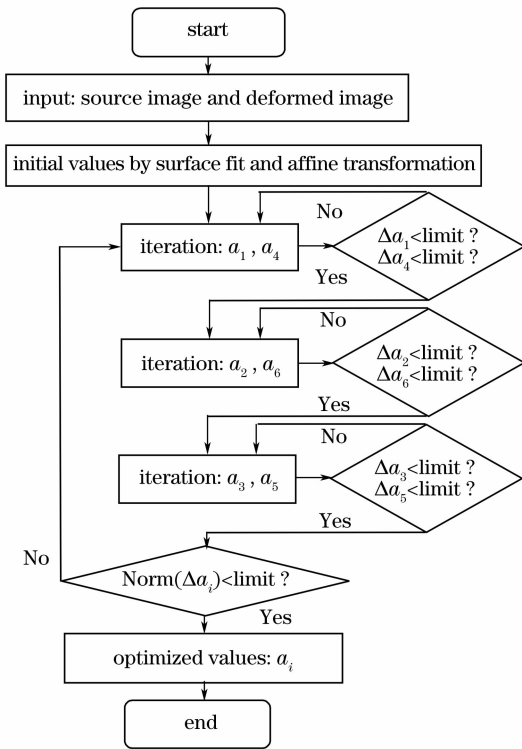


图3 基于仿射变换的相关迭代法的流程图

Fig. 3 Flow chart for the iterative correlation method based on affine transformation

域相关模式采用 64×64 的模板外,其余方法均采用 41×41 的模板。计算区域均从 $(50, 50)$ 到 $(200, 200)$,两个方向的间隔均取为 15,因此计算点数为 $11 \times 11 = 121$ 。

计算结果表明,采用频域相关模式得到的结果起伏最大,双参量法和曲面拟合法得到的结果次之,而采用牛顿-拉夫森迭代法和采用基于仿射变换的相关迭代法得到的结果则相当平滑。为定性比较各种方法的好坏,采用最小二乘拟合法对以上位移场作一次平面拟合,并求解相应的平面斜率。由模拟理论值知,由于离面位移的影响,位移场在两个方向的斜率均为 0.01,以此为基准可计算出各种方法的相对误差,结果如表 1 所示。由表 1 可见,采用基于仿射变换的相关迭代法求解由三维刚体位移引起的图像位移场的精度最高,牛顿-拉夫森迭代法的精度稍逊之,曲面拟合法次之(观察发现,曲面拟合法中沿 X 方向的斜率误差最小,原因可能在于曲面拟合算法具有较强的平滑效果),双参量法紧随其后。无论采用何种方法,相应的误差在 X 方向总小于 Y 方向,原因在于设置的刚体位移沿 X 方向较大。由于基数较大,相应的相对误差减小,因此利用增大基数即分母的办法可减小相对误差。因此,测试应变时

可预先给物体施加一定量的刚体位移以提高应变的计算精度。数值模拟结果表明,采用基于仿射变换的相关迭代法可以最高精度求解由三维刚体位移引起的图像位移场分布。

表 1 模拟散斑场计算结果比较

Table 1 Comparison of the calculated results of simulated speckle images

Method	Slope	Relative error / %
Two variables	X 0.010047	0.47
	Y 0.01016	1.60
Surface fit	X 0.009969	0.31
	Y 0.01011	1.10
Spectrum correlation based on the multiplication mode	X 0.010606	6.06
	Y 0.012116	21.16
Iterative correlation method based on Newton-Raphson	X 0.010046	0.46
	Y 0.010094	0.94
Iterative correlation method based on affine transformation	X 0.010033	0.33
	Y 0.010086	0.86

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刚体平移参量,具体数值如表 2 所示。为实现三维位移场的分离并验证本文原理的正确性,建立以图像左上角点为原点的图像坐标系,提取合成位移矢量场分别沿 X 和 Y 方向的斜率 (s_{x3} 和 s_{y3}) 和截距 (b_{x3} 和 b_{y3}),及与纯离面位移和纯面内位移分别对应的图像位移斜率和截距。其中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} 。

由表 2 可知,当物体发生三维位移或纯离面位移时,图像位移矢量场的斜率相同;而物体发生三维刚体位移时的图像位移矢量场的截距,等于纯面内位移和纯离面位移分别对应的图像位移矢量场的截距之和。模拟结果证明了本文方法在原理上的正确性,即通过提取位移矢量场的中心及斜率,可实现物体面内位移和离面位移的分离。注意,通常情况下图像中心与摄像系统的光心总存在偏差,因此纯离面位移情况下的图像位移矢量场中心与图像中心并不重合,即使建立以图像中心为原点的坐标系,纯离面位移所对应的图像位移矢量场的截距也不为零。基于此,本文建立以图像左上角点为原点的坐标系,以示问题的一般性。

在实际的工作环境中,通常难以保证光轴与物体平面完全垂直,即光轴与物体平面总存在一定的

倾角。为模拟真实的实验环境,在摄像机成像模型中的共线方程中引入旁向倾角 ω 和航向倾角 φ ,均取值为 5° (一般的实验情况下,通过目测足以保证光轴的倾斜角度在 5° 以内)。采用同表 2 类似的分

表 2 理想状态下三维刚体位移测试模拟结果

Table 2 Simulative results of three-dimensional rigid body displacement in ideal state

States	u /mm	v /mm	w /mm	s_{xu}	s_{yv}	b_{xu}	b_{yv}	b_{xx}	b_{yy}	s_{x3}	s_{y3}	b_{x3}	b_{y3}
1	1	1	50	-0.09	-0.09	23.36	23.36	-12.05	-12.05	-0.09	-0.09	11.32	11.32
2	2	2	80	-0.15	-0.15	39.54	39.54	-25.49	-25.49	-0.15	-0.15	14.05	14.05
3	1	2	90	-0.18	-0.18	45.35	45.35	-12.99	-25.99	-0.17	-0.17	32.37	19.37
4	2	1	100	-0.20	-0.20	51.40	51.40	-26.51	-13.25	-0.20	-0.20	24.89	38.15

表 3 实际状态下三维刚体位移测试模拟结果

Table 3 Simulative results of three-dimensional rigid body displacement in actual state

States	u /mm	v /mm	w /mm	s_{xu}	s_{yv}	b_{xu}	b_{yv}	b_{xx}	b_{yy}	s_{x3}	s_{y3}	b_{x3}	b_{y3}
1	1	1	50	-0.08	-0.08	18.82	20.93	-12.40	-12.40	-0.08	-0.08	6.86	8.97
2	2	2	80	-0.15	-0.15	34.65	36.88	-25.88	-25.88	-0.15	-0.15	9.36	11.59
3	1	2	90	-0.17	-0.17	40.34	42.61	-13.40	-26.40	-0.17	-0.17	27.45	16.83
4	2	1	100	-0.19	-0.19	46.26	48.57	-26.93	-13.68	-0.19	-0.19	19.97	35.42

数值模拟结果表明,当物体发生三维位移或纯离面位移时,图像位移矢量场的斜率相同;而物体发生三维位移时的图像位移矢量场的截距,并不等于纯面内位移和纯离面位移分别对应的图像位移矢量场的截距之和。即在斜光轴成像系统中,以上分析方法出现了误差(主要为截距造成的误差),为此选择截距的相对误差作为斜光轴成像系统中的误差评判标准。计算截距的相对误差与倾斜角度的关系,结果如图 4 所示。采用最小二乘法对数据结果作线性拟合,拟合表达式为 $y = 0.70474x + 0.043038$ 。由该表达式可知,当倾斜角度为 7.09° 时相应的误差为 5% (工程中的许可误差范围)。而通常情况下,当光轴的倾斜角度在 5° 以内时,相应的误差不超过 3.57%。数值模拟结果进一步证明了本论文

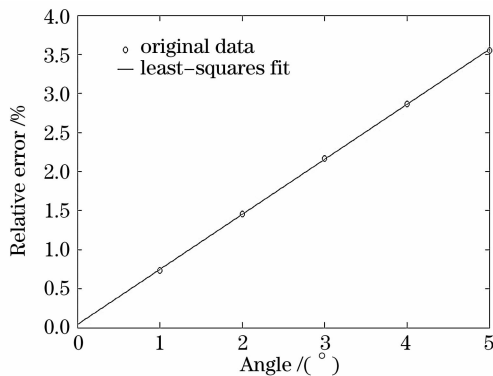


图 4 截距相对误差与倾斜角度的关系

Fig. 4 Relation between inclined angle and relative error of intercept

析方法进行计算,结果如表 3 所示。注意,由于倾斜角度的影响,三维位移情况下的斜率和截距是基于最小二乘的线性拟合法获得的,纯位移分量情况下则取平均值。

方法在实际工作环境中的可行性。

4 实 验

采用一硅片作为试件进行三维刚体平移实验,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) 调节摄像系统各参量,保证产生清晰的像,记下此刻位置 B;

2) 标定位置 B 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 B 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。

像放大倍率、图像位移场斜率及截距的关系，分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

4) 经过以上标定步骤，得到物体离面位移与图

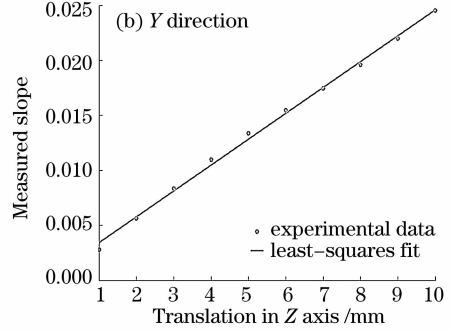
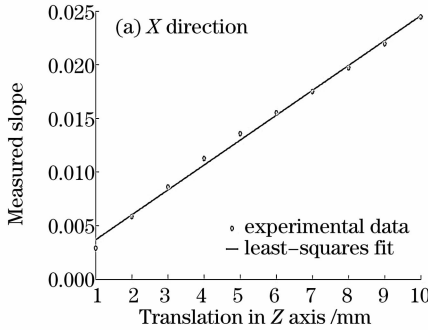


图 5 图像位移场斜率与物体离面位移的关系。(a) X 方向，(b) Y 方向

Fig. 5 Relationship between slope and out-of-plane displacement. (a) X direction, (b) Y direction

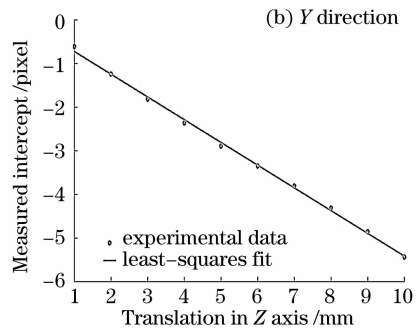
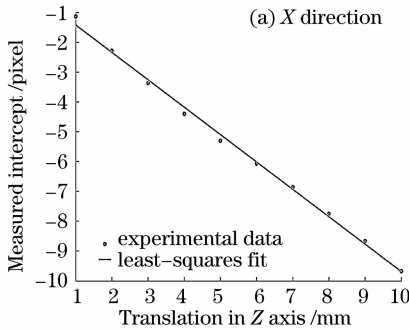


图 6 图像位移场截距与物体离面位移的关系。(a) X 方向，(b) Y 方向

Fig. 6 Relationship between intercept and out-of-plane displacement. (a) X direction, (b) Y direction

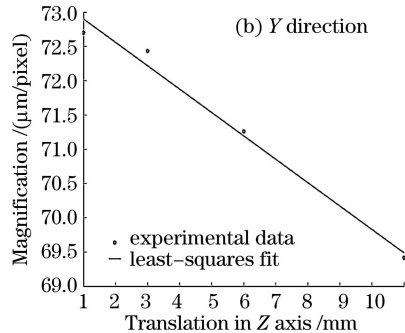
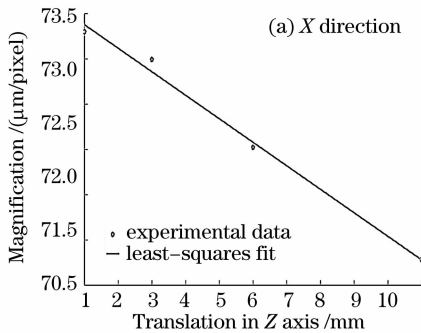


图 7 图像位移场放大倍率与物体离面位移的关系。(a) X 方向，(b) Y 方向

Fig. 7 Relationship between magnification and out-of-plane displacement. (a) X direction, (b) Y direction

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^[15]。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^[15]。

标定了系统常量之后，给试件一系列给定的三维刚体位移，范围在 $[200 \mu\text{m}, 10 \text{mm}]$ 之间，如表 4 所示， w 为试件的离面位移，下标 p, m 分别为相应的规定和测量值。通过计算实验过程中不同状态对应的图像位移场斜率及截距，并与标定常量进行比较，即可获得物体的三维位移值。具体过程如下：

1) 采集试件产生任意刚体位移后的图像并与位置 B 处的图像作相关运算，得到图像位移场的斜率 (s_{x3} 和 s_{y3}) 及截距 (b_{x3} 和 b_{y3})；

2)由图 5 中离面位移与图像位移场斜率的关系知,作最小二乘线性拟合后的结果分别为: $s_{xw} = 0.0023213\omega + 0.0013611$ 和 $s_{yw} = 0.0023501\omega + 0.0010915$,将 s_{x3} 和 s_{y3} 代入即可确定试件的离面位移 w ;

3)由图 6 中离面位移与图像位移场截距的关系知,图中直线的拟合方程分别为: $b_{xw} = -0.91829\omega - 0.50038$ 和 $b_{yw} = -0.52106\omega - 0.20537$,将由步骤 2)获得的离面位移 w 代入即可确定相应的截距 b_{xw} 和 b_{yw} ;

4)将图像位移场的截距 b_{x3} 和 b_{y3} 与由步骤 3)得到的截距 b_{xw} 和 b_{yw} 相减,得 b_{xx} 和 b_{yy} ;

5)由图 7 中离面位移与图像放大倍率的关系可知,直线的拟合方程分别为: $M_x = -0.25974\omega + 73.377$ 和 $M_y = -0.34126\omega + 72.903$,将由步骤 2)得到的离面位移 w 代入即可确定相应的图像放大倍率 M_x 和 M_y ;

6)将步骤 4)获得的截距值与步骤 5)得到的图像放大倍率相乘即可得到试件实际的面内位移 u, v 。

表 4 三维刚体位移测试结果

Table 4 Comparison of prescribed and measured three-dimensional rigid body displacement

State	u			v			w		
	$u_p/\mu\text{m}$	$u_m/\mu\text{m}$	Error / %	$v_p/\mu\text{m}$	$v_m/\mu\text{m}$	Error / %	w_p/mm	w_m/mm	Error / %
1	250	249.03	0.388	250	254.11	1.644	2	1.92	4
2	100	99.69	0.31	250	248.20	0.72	5	5.25	5
3	200	201.60	0.8	250	248.62	0.552	5	5.26	5.2
4	0	-3.78	NA	200	200.26	0.13	10	9.96	0.4
5	100	96.39	3.61	250	251.10	0.44	10	9.96	0.4
6	250	247.35	1.06	250	251.65	0.66	10	9.97	0.3

验证实验的计算结果如表 4 和图 7 所示。表 4 表明,当试件的三维刚体位移从 $200 \mu\text{m}$ 增加到 10 mm 时,最大误差为 5.52% 。面内位移最大误差不超过 $5 \mu\text{m}$,离面位移最大误差为 0.26 mm ,且随着离面位移的增大,相应的误差减小。可能原因是当物体本身的位移较大时,相应的由误差源所引起的误差将相对减弱;而当位移较小时,无论是面内还是面外均有较大的误差,主要原因是当物体产生小位移时倾角等误差源引起的误差占主导地位,即存在误差放大效应。

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数字图像相关方法相结合的三维刚体位移测试新方法。数值模拟结果验证了该算法的可行性。在实现三维刚体位移测试时,模拟物体发生三维刚体位移后形成的散斑图,讨论适用的数字图像相关方法,通过各种方法的比较,确定基于仿射变换的相关迭代法最为精确和适用。采用三维刚体平移实验验证该方法的精度和可行性,实验结果表明最大误差在 5% 左右。

数字图像相关的三维刚体位移测试方法具有如下优点:光学装置和标定程序简单;实验及试样的预处理过程简单;测试范围与图像的放大倍率相关,量程较大;测试精度较高;实时动态,自动化程度较高。本文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

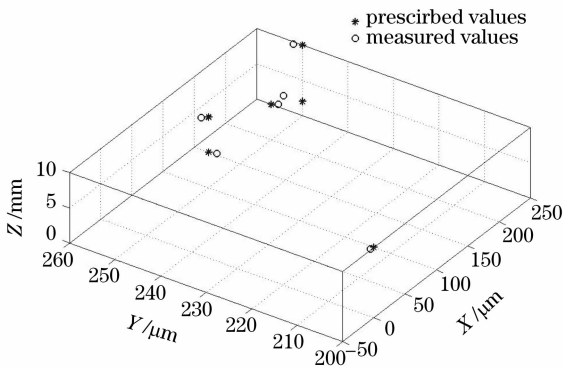


图 8 三维刚体位移测试结果

Fig. 8 Measured results of three-dimensional rigid body displacement

实验数据表明,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

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. Eng.*, 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, Wang 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 Qiu Tian, Guo Li, Li Donghui *et al.*. Digital speckle marginal correlation measuring method [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1092~1096
邱 天,郭 立,李东晖 等. 数字散斑的边缘相关测量法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1092~1096
- 5 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan, Lin Baoping. Application of micro-digital speckle correlation technique to study mechanical property of advanced thin film material [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1104~1108
陈凡秀,何小元,林保平. 显微数字散斑相关测量新型薄膜的力学性能[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1104~1108
- 6 P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton M A *et al.*. Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision[J]. *Exp. Mech.*, 1993, **33**(2): 123~132
- 7 P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton. Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(3): 981~990
- 8 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
- 9 J. D. Helm, S. R. McNeil, M. A. Sutton. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(7): 1911~1920
- 10 Wang Min, Hu Xiaofang, Wu Xiaoping. Digital image correlation method for the analysis of 3-D internal displacement field in object [J]. *Acta Physica 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数字图像相关方法[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5135~5139
- 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. Eng.*, 2001, **40**(8): 1613~1620
- 13 Z. F. Zhang, Y. L. Kang, H. W. 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. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Exp. Mech.*, 1989, **29**(1): 261~267
- 15 Yuanhao Huang. Development of digital image correlation method for displacement and shape measurement[D]. Singapore: National University of Singapore, 2004