

文章编号: 1001-4888(2013)05-0586-09

数字图像相关曲面拟合法相关系数 修正算法的实验研究^{*}

俞海¹, 郭荣鑫¹, 夏海廷¹, 颜峰¹, 张玉波¹, 何天淳²

(1. 昆明理工大学 工程力学系, 云南省先进材料力学行为与微观结构设计高校重点实验室, 云南昆明 650500;

2. 云南大学, 云南昆明 650500)

摘要: 为了提高数字图像相关曲面拟合法亚像素定位精度, 经研究发现, 在实际应用中, 曲面拟合法在亚像素位移为 0.5 像素左右时会发生较大的波动, 与实际亚像素位移发生一定偏离, 导致此位置位移的不连续。本文通过分析曲面拟合法亚像素位移偏离真实位移的原因, 给出了具体修正方法, 用模拟平移实验讨论了修正系数 k 和子区大小对修正结果的影响, 用三点弯曲实验验证了修正方法在复杂变形情况下的有效性, 提高了曲面拟合法在实际应用中的测量精度。

关键词: 图像处理; 数字图像相关; 曲面拟合; 相关系数修正; 亚像素

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-177

0 引言

数字图像相关方法是上世纪八十年代由 Yamaguchi, W. H. Peters 和 W. F. Ranson 等人提出的。该方法通过对表面具有随机分布散斑点的物体变形前后数字图像的灰度相关匹配, 来获得物体表面的位移及变形场, 物体表面随机分布的散斑点即位移及变形的载体。自该方法被提出以来, 众多学者就对其不同算法的精度和计算效率进行了深入研究, 指出了不同方法的优缺点^[1-8]。

相关系数曲面拟合法是现在较常用的方法之一, 它对相关系数矩阵进行曲面拟合, 通过所拟合曲面上相关系数峰值点的位置来获取物体表面某一点的亚像素位移。相关文献^[9-11]通过该方法所采用的相关函数、曲面拟合函数形式、子区窗口大小、曲面拟合窗口大小等方面做了深入的研究, 并通过模拟散斑平移^[12]等实验评价了各种影响因素对亚像素定位精度的影响。在实际应用中, 受散斑本身质量和实验中随机噪声等相关因素的影响, 会导致亚像素定位精度的明显降低。本文通过大量实验分析发现, 曲面拟合法用于物体表面小变形测量时, 亚像素位移在 0.5 像素左右会发生较大的波动, 波动幅度明显大于其他亚像素位移处, 使得位移场在此位置不连续。本文针对上述问题进行了相关分析, 并提出修正方法, 用相关实验验证了修正方法的有效性, 提高了曲面拟合法亚像素位移定位的精度。

1 基本原理

1.1 相关系数曲面拟合法

相关系数曲面拟合法是以整像素位移点为中心, 对其相邻各像素点所在位置处的相关系数进行曲面拟合, 通过所拟合曲面上相关系数峰值点的位置来获取物体表面某一点的亚像素位移。相关研究^[13]

^{*} 收稿日期: 2012-11-29; 修订日期: 2013-05-07

基金项目: 云南省应用基础研究基金面上资助项目(2011FB029); 高等学校博士学科点专项科研基金(20105314110006)

通讯作者: 郭荣鑫(1964—), 博士生导师, 教授, 主要从事数字光测实验力学, 多场耦合下金属基复合材料的宏观损伤与断裂。

E-mail: guorx@kmust.edu.cn

发现对于相关系数曲面较平缓的情况, 高斯拟合需要较大的窗口, 这样不仅降低了计算效率, 而且可能会产生较大的误差。采用如图1所示 3×3 小拟合窗口二次多项式的拟合精度和计算效率都优于前者, 因此现多采用此方法。对整像素位移搜索到的 (x', y') 周围各点的相关系数, 用二元二次函数表示为:

$$C(x_i, y_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_j + a_5 y_j^2 \quad (1)$$

上式中 $a_0, \dots, a_5$ 可以采用最小二乘法来求解。在所拟合曲面相关系数极值点处满足方程:

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3 x + a_4 y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial y} = a_2 + 2a_5 y + a_4 x = 0 \quad (3)$$

联立(2)、(3)式, 求解便得:

$$x = \frac{2a_1 a_5 - a_2 a_4}{a_4^2 - 4a_3 a_5}, \quad y = \frac{2a_2 a_3 - a_1 a_4}{a_4^2 - 4a_3 a_5} \quad (4)$$

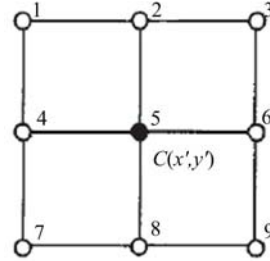


图1 3×3 相关系数曲面拟合法示意图

Fig. 1 The schematic diagram of 3×3 curve-fitting method

1.2 相关系数曲面拟合法亚像素定位分析

由连续介质力学理论可知, 固体的变形具有连续性, 不会发生跳跃式的变形。而本文研究发现, 上述曲面拟合法在实际用于小变形情况下物体表面变形测量时, 亚像素位移在 0.5 像素左右会发生较大的波动, 波动幅度明显大于其他亚像素位移处, 即在此位置发生了不同幅度的位移“断层”。这样的波动大大影响了此方法用于物体小变形测量的精度, 特别情况下甚至不适合于物体小变形测量。原因是在实际测量中, 受散斑图质量和其他相关因素的影响, 用(1)式所示函数形式对相关系数矩阵进行曲面拟合时, 所拟合曲面上峰值点位置与实际亚像素位移存在一定误差, 使得亚像素计算结果与实际亚像素位移发生了一定的偏离。这种偏离在亚像素位移为 $0 \sim 0.5$ 像素内计算结果大于实际亚像素位移, $0.5 \sim 1$ 像素内小于实际亚像素位移。而且当亚像素位移在 0.5 像素左右, 相邻两个计算点的整像素定位不同时, 对应的相关系数矩阵会发生较大的非正常波动, 导致此位置位移的不连续。图2所示为一标准金属试样在单项拉伸状态下用1.1所述方法计算得到的在拉伸方向上的位移曲线。

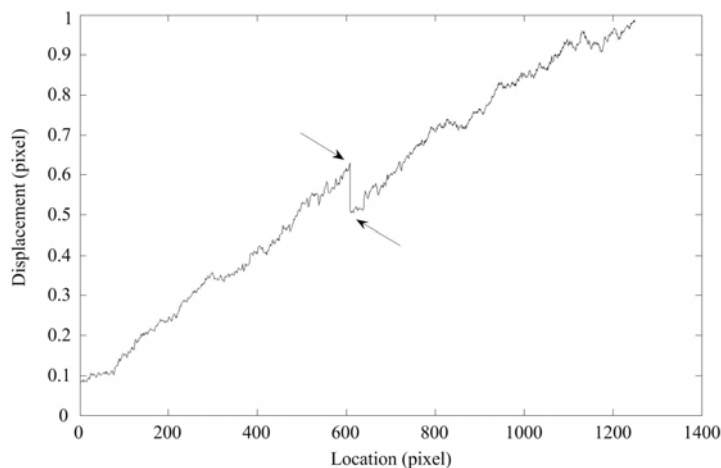


图2 采用1.1所述方法计算得到的位移曲线

Fig. 2 The displacement curves calculated by the traditional method

1.3 曲面拟合法相关系数的修正

针对曲面拟合法在实际应用中亚像素定位的较大误差, 本文对用于曲面拟合的相关系数矩阵进行了修正。由于实际应用中曲面拟合法在亚像素定位时, 与实际亚像素位移会发生一定的偏离, 所以根据1.2的分析可以通过提高相关系数矩阵中心点的相关系数, 来获取准确的亚像素位移。一种方法是相关系数矩阵中心点的相关系数数值不改变, 而通过降低周围点的相关系数值间接地来提高相关系数矩阵

中心点的相关系数值。另一种是直接提高相关系数矩阵中心点的相关系数,而周围点的相关系数不变。但实际应用中单纯地采用上述方法的任何一种都可能会产生一定的误差。本文首先用如下函数作用于相关系数矩阵:

$$C_C = E + \log_2 C \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} C(1,1) & C(1,2) & C(1,3) \\ C(2,1) & C(2,2) & C(2,3) \\ C(3,1) & C(3,2) & C(3,3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

本文中采用标准化协方差相关函数^[13]。式(5)的作用是根据 $C(i, j)$ 的大小,不同幅度地改变 $C(i, j)$ 对拟合曲面峰值点位置的影响因子,即权函数,(5)式可以有效地减小数据的波动。然后再用下式分别从 X、Y 两个方向提高相关系数矩阵中心点的相关系数。

$$c_y = C_C(2,2) + \frac{|C(2,1) - C(2,3)|}{L^k} \quad (7)$$

$$c_x = C_C(2,2) + \frac{|C(1,2) - C(3,2)|}{L^k} \quad (8)$$

$$C_{CX} = \begin{bmatrix} C_C(1,1) & C_C(1,2) & C_C(1,3) \\ C_C(2,1) & c_x & C_C(2,3) \\ C_C(3,1) & C_C(3,2) & C_C(3,3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_{CY} = \begin{bmatrix} C_C(1,1) & C_C(1,2) & C_C(1,3) \\ C_C(2,1) & c_y & C_C(2,3) \\ C_C(3,1) & C_C(3,2) & C_C(3,3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

经上述方法的修正,新的相关系数矩阵分别为 C_{CX} 和 C_{CY} ,最后用(1)式的二元二次函数分别对 C_{CX} , C_{CY} 进行拟合求解,取 C_{CX} 的 x 解作为修正 x 解, C_{CY} 的 y 解作为修正 y 解。上式中 E 为对应的三阶单位矩阵; L 为在 X 或 Y 方向上与相关系数中心点相邻两个点之间的距离,这里 $L=2$; k 为修正系数。通过提高相关系数矩阵中心点的相关系数可以有效地消除亚像素位移计算结果偏离实际亚像素位移的问题,使亚像素位移在 0.5 像素左右处保持位移的连续性。图 3 为相关系数矩阵修正后计算得到的对应图 2 的位移曲线。

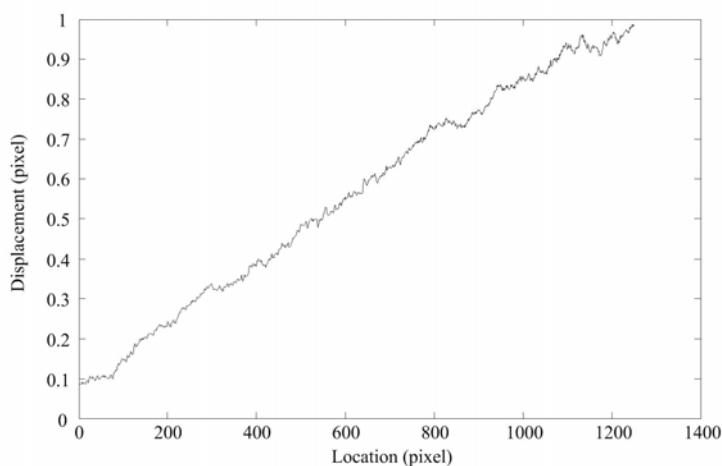


图 3 相关系数矩阵修正后计算的位移曲线

Fig. 3 The displacement curves calculated by the corrected method

2 实验分析

2.1 与经典 NR 方法的比较

为了验证修正后曲面拟合法的有效性,本文首先采用模拟平移实验,对在相关实验中得到的一副平

均灰度梯度为 20.2942 的散斑图(图 4),利用傅立叶变换中的相移定理对其做位移可精确控制的空域平移^[14]。将此散斑图连续平移 20 次,相邻两幅图的平移量为 0.05 像素,最大平移位移为 1 像素。然后用修正前后的曲面拟合法和 NR(采用最小平方距离相关函数、一阶形函数和双三次样条插值算法)方法计算这些平移后的散斑图像中 961(31×31)个均匀分布点的位移。计算得到了不同亚像素位移下的均值误差和标准差,图像子区大小为 41×41 像素。

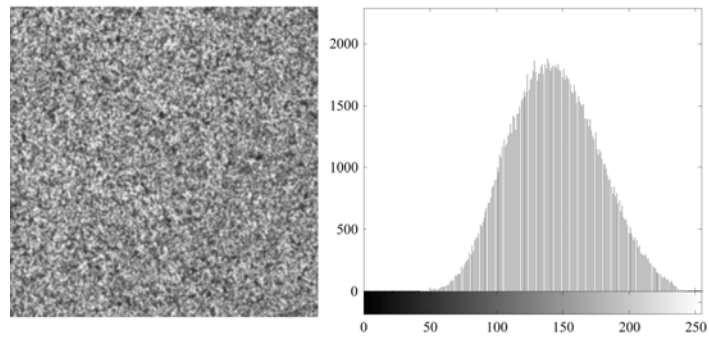


图 4 散斑图像及其灰度直方图

Fig. 4 Speckle image and its histogram

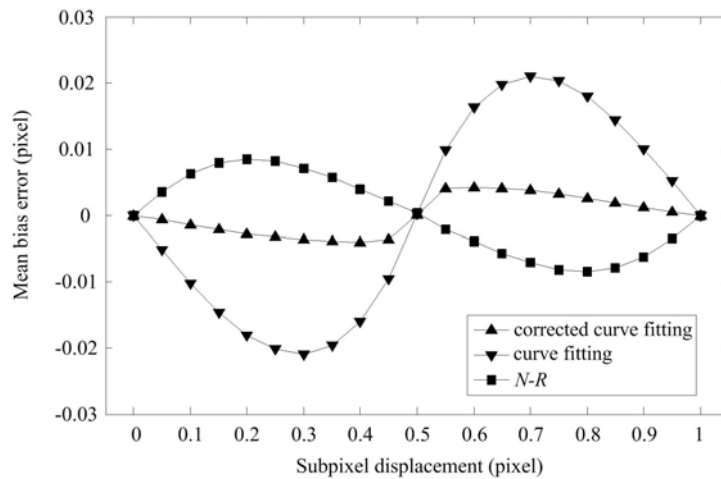


图 5 散斑图刚体平移为 0~1 像素时 3 种亚像素位移测量方法的均值误差

Fig. 5 Mean bias errors of three subpixel registration algorithms for rigid body translation images over 0-1 pixel displacement range

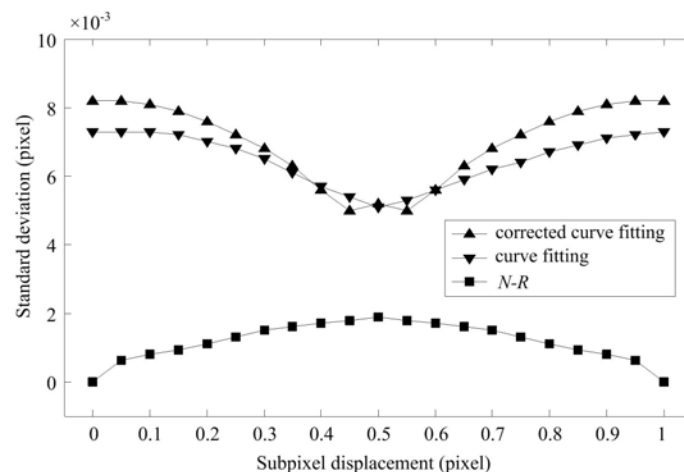


图 6 散斑图刚体平移为 0~1 像素时 3 种亚像素位移测量方法的标准差

Fig. 6 SD errors of three subpixel registration algorithms for rigid body translation images over 0-1 pixel displacement range

图 5、图 6 显示的是曲面拟合法修正前后以及 NR 方法亚像素位移测量算法的均值误差和标准差与给定位移量的关系曲线,这里修正曲面拟合法的修正系数 $k=6$ 。从图 5、图 6 可以看出,在模拟平移

实验中,修正后的曲面拟合法均值误差明显减小,甚至优于 NR 方法。标准差与原拟合法基本一致,没有较明显的变化,说明修正曲面拟合法可以有效减小系统测量误差。

2.2 k 值对修正结果的影响

本文所提出修正方法的修正结果与修正系数 k 有密切关系,不同的 k 值对应着不同的修正结果。为了研究 k 值对曲面拟合法修正结果的影响,采用与 2.1 相同的方法及子区大小来研究。图 7、图 8 给出了不同 k 值下亚像素位移的均值误差和标准差。

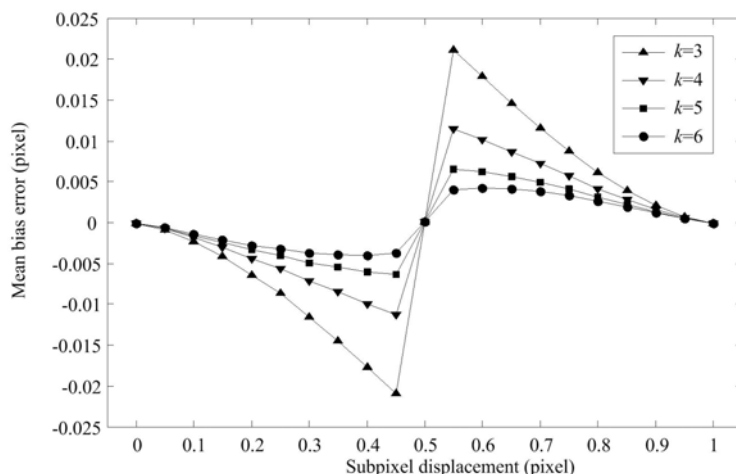


图 7 散斑图刚体平移为 0~1 像素时不同 k 值下修正方法亚像素位移测量的均值误差

Fig. 7 Mean bias errors of corrected method under different k value for rigid body translation images over 0-1 pixel displacement range

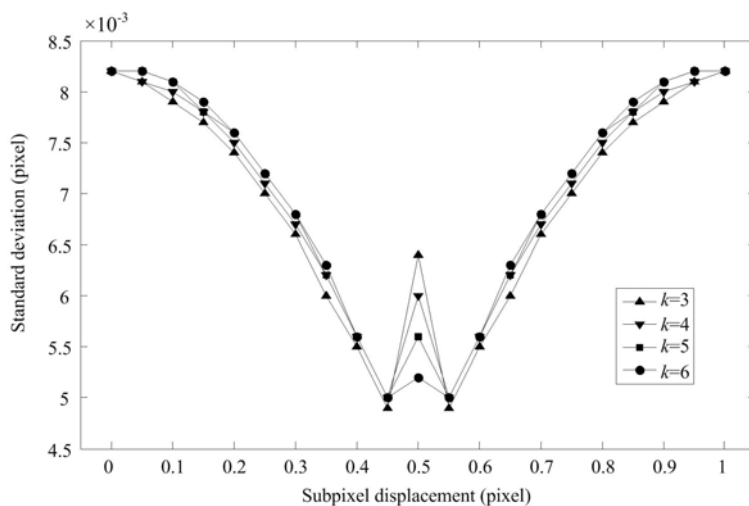


图 8 散斑图刚体平移为 0~1 像素时不同 k 值下修正方法亚像素位移测量的标准差

Fig. 8 SD errors of corrected method under different k value for rigid body translation images over 0-1 pixel displacement range

从图 5、图 6、图 7、图 8 对比中可以看出,当修正系数 $k=3$ 时,原曲面拟合法和修正曲面拟合法在 0~1 亚像素位移中最大均值误差和标准差在幅值上基本相等,但是均值误差曲线形式发生明显变化。随着修正系数 k 值的增大,均值误差显著向 0 值靠近,当修正系数 $k>6$ 时,均值误差曲线趋于稳定, k 值的增大不再对均值误差产生明显的影响,而标准差曲线在不同 k 值下基本一致,只是在亚像素位移为 0.5 像素位置处幅值与 k 值有关。

2.3 计算窗口大小对修正结果的影响

计算窗口大小是数字图像相关中的一个重要参数,也是相关学者研究的重点问题。较小的计算窗口虽然计算效率高,但是计算得出的整像素相邻各点的相关系数会有较大变化;计算窗口较大可以补偿、降低各种噪声的影响,使计算出来的相邻各点相关系数变化趋于平缓,但是计算效率相对较低,而且可能会出现计算结果失真的现象。图9、图10给出了本文模拟平移实验中,给定亚像素位移为0.3像素时子区大小对应于均值误差和标准差的曲线图。

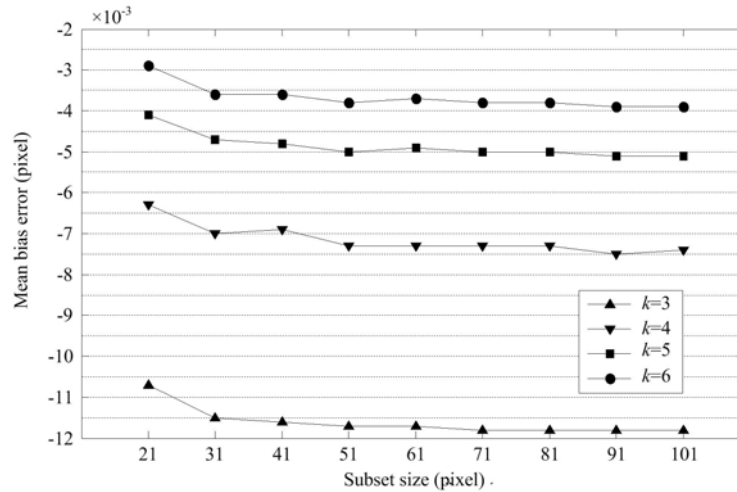


图9 散斑图刚体平移量为0.3像素时亚像素位移测量均值误差—子区窗口大小曲线

Fig. 9 Mean bias errors of subpixel registration algorithms under different subset size for rigid body translation images at 0.3 pixel displacement

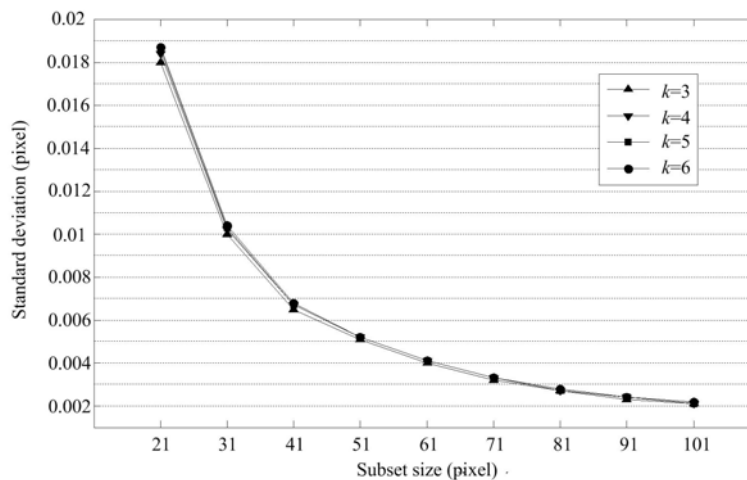


图10 散斑图刚体平移量为0.3像素时亚像素位移测量标准差—子区窗口大小曲线

Fig. 10 SD errors of subpixel registration algorithms under different subset size for rigid body translation images at 0.3 pixel displacement

图9、图10显示在相同的 k 值下,不同的窗口大小对应基本相同的均值误差(窗口大小为 21×21 像素时,数值上有略微的增大),说明在固定 k 值下,窗口的大小对均值误差基本没有影响,标准差随窗口的增大不断减小,当子区窗口大于 81×81 像素时趋于稳定,随窗口的增大标准差减小幅度变小,符合窗口在数字图像相关方法中对标准差的影响作用,而且从图10可以看出对于不同的 k 值,标准差曲线基本重叠在一起,说明 k 值对标准差的影响基本可以忽略。

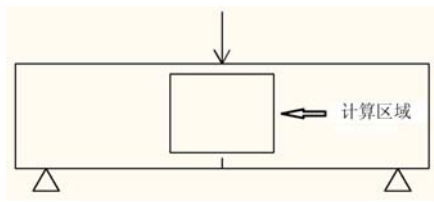


图 11 试验示意图

Fig. 11 Sketch map of test

2.4 复杂变形实验

上文仅从模拟平移实验来验证本文修正方法的有效性,为了进一步研究修正曲面拟合法在实际应用中的有效性,这里进行了三点弯曲实验,为了使变形更具复杂性在三点弯试件下端压头方向用线切割切开一小口。用修正前后的曲面拟合法和 NR 方法对图 11 所示变形前后计算区域进行相关计算,计算子区大小为 41×41 像素。

图 12 为三种方法计算结果的 U、V 位移场,可以看出原曲面拟合法数据波动较大,而且在亚像素位移为 0.5 像素左右位置处锯齿形波动很明显,使位移等值线在此位置不连续;修正曲面拟合法虽然光滑性略差于 NR 方法,但与原拟合法相比数据波动不再明显,而且原拟合法在亚像素位移为 0.5 像素左右是位移等值线不连续的问题基本消除,等值线在数值上也与 NR 方法基本一致。

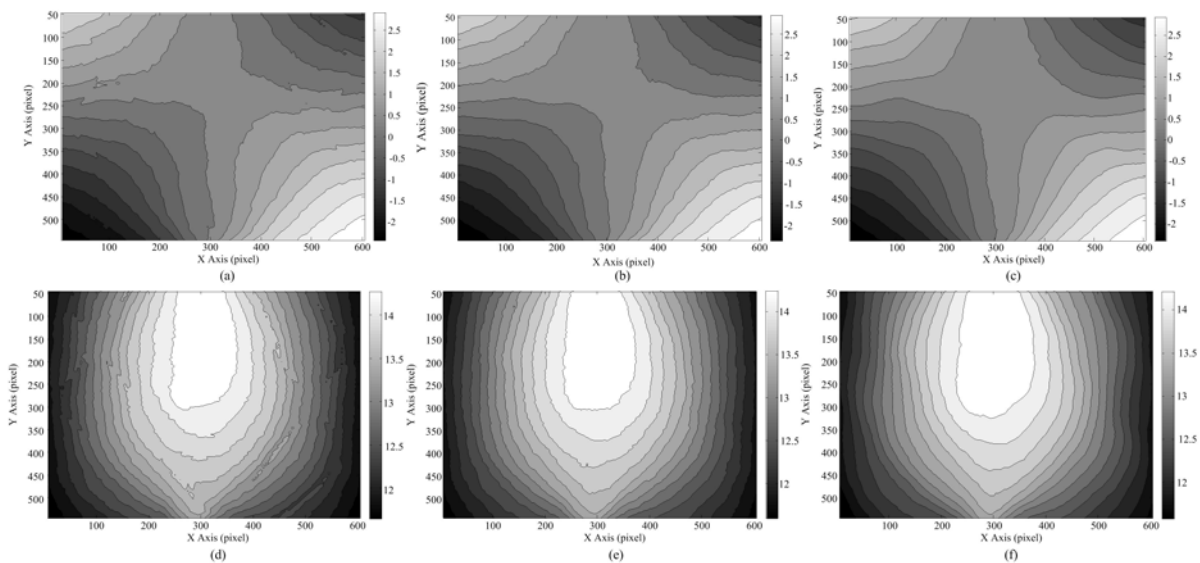


图 12 3 点弯曲实验 U、V 场计算结果(a、d 为原拟合法, b、e 为修正拟合法, c、f 为 NR 方法)

Fig. 12 Calculated U and V displacement fields of three-point bending experiment

3 结论

本文就数字图像相关曲面拟合法在实际应用中精度低、数据波动大的问题进行了相关研究,给出了修正方法,用模拟平移实验和三点弯曲实验验证了修正方法的有效性,得到相关结论。

(1) 在模拟刚体平移实验中,随修正系数 k 值的增大,计算均值误差显著减小,当 $k > 6$ 时,计算均值误差趋于稳定。

(2) 在模拟刚体平移实验中,随子区窗口的增大,修正方法计算均值误差基本保持一致,但幅值均与 k 值有关,而标准差不受 k 值的影响,只与子区窗口有关。

(3) 在实际物体表面变形测量应用中,各种影响因素较为复杂, k 值选取对修正结果十分重要,而且 k 值的选取与图像质量密切相关, k 值的自适应需要进一步研究,本文推荐的 k 值为 $[4, 6]$ 。

参考文献:

- [1] 伍卫平, 何玉明, 胡而已. 移动最小二乘三次曲面拟合法分析图像亚像素位移[J]. 固体力学学报, 2008, 29(专辑): 224—227 (Wu Weiping, He Yuming, Hu Eryi. Sub-pixel Displacement Analysis Based on the Moving Least-Square Cubic Surface Fitting Algorithm[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(S. Issue): 224—227(in

- Chinese))
- [2] Wang Min, Cen Yuwan, Hu Xiaofang, et al. A Weighting Window Applied to the Digital Image Correlation Method[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41:154—158.
- [3] 马少鹏, 金观昌, 赵永红. 数字散斑相关方法亚像素求解的一种混合方法[J]. 光学技术, 2005, 31(6):871—874 (Ma Shaopeng, Jin Guanchang, Zhao Yonghong. A Hybrid Method for Sub-pixel Registration of Digital Speckle Correlation Method[J]. Optical Technique, 2005, 31(6):871—874(in Chinese))
- [4] 赵玮, 周战荣, 吴长江, 闫夷升. 两种插值亚像素定位法在数字散斑测量中的应用[J]. 光学技术, 2008, 34:248—249 (Zhao Wei, Zhou Zhanrong, Wu Changjiang. Applications of two Interpolation Sub-pixel Positioning in Digital Speckle Measurement[J]. Optical Technique, 2008, 34:248—249(in Chinese))
- [5] 郭荣鑫, 蔡光程, 马琨, 李俊昌. 数字散斑测量中亚像素位移计算方法的选择研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5):65—67 (Guo Rongxin, Cai Guangchen, Ma Kun, Li Junchang. A comparative Study on the Sub-pixel Displacement Calculation Methods Used in Digital Speckle Measurement[J]. Laser Journal, 2005, 26(5):65—67 (in Chinese))
- [6] 王琛影, 何小元. 相关识别中的曲面拟合法[J]. 实验力学, 2000, 15(3):281—284 (Wang Chenying, He Xiaoyuan. Curved Surface Approximation in Correlation Recognition Method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(3):281—284(in Chinese))
- [7] 王军, 白福忠. 数字图像的亚像素位移测量算法改进[J]. 煤矿机械, 2011, 32(10):217—219 (Wang Jun, Bai Fuzhong. Improvement Algorithm of Digital Image Sub-pixel Displacement Measurement [J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(10):217—219(in Chinese))
- [8] 樊雪松, 李鸿琦, 邢冬梅. 一种新的数字散斑搜索方法及其精度分析[J]. 机床与液压, 2004, 7:34—37 (Fan Xuesong, Li hongqi, Xing Dongmei. A New Digital Speckle Correlation Method and Its Precision Analysis[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 7:34—37(in Chinese))
- [9] 潘兵, 续伯钦, 冯娟, 陈丁. 关于数字图像相关中曲面拟合法的几点讨论[J]. 实验力学, 2005, 20:44—50 (Pan Bing, Xu Boqin. Sub-pixel Registration Using Quadratic Surface Fitting in Digital Image Correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20:44—50(in Chinese))
- [10] 李善祥, 孙一翎, 李景镇. 数字散斑相关测量中亚像素位移搜索的曲面拟合研究[J]. 光子学报, 1999, 28(7):639—640 (Li Shanxiang, Sun Yiling, Li Jingzhen. Curved Surface Fit of Sub-pixels Displacement Searching in Digital Speckle Correlation Measurement Technology[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(7):639—640 (in Chinese))
- [11] 潘兵, 续伯钦, 陈丁, 冯娟. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报, 2005, 26(2):129—134 (Pan Bing, Xu Boqin, Chending, Feng Juan. Sub-pixel Registration Using Quadratic Surface Fitting in Digital Image Correlation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2):129—134(in Chinese))
- [12] Zhou P, Goodson K E. Sub-pixel Displacement and Deformation Gradient Measurement Using Digital Image/Speckle Correlation[J]. Opt Eng, 2001, 40(8):1613—1620.
- [13] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社, 2002 (Yu Qifeng. Image Based Precise Measurement and Motion Measurement[M]. Beijing:Science Press, 2002(in Chinese))
- [14] Sehreier H W, Sutton M A. Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions[J]. Experimental Mechanics, 2002, 42(3):303—310.

Experimental Study of Correction Algorithm for Quadratic Surface Fitting in Digital Image Correlation

YU Hai¹, GUO Rong-xin¹, XIA Hai-ting¹, YAN Feng¹, ZHANG Yu-bo¹, HE Tian-chun²

(1. Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Key Laboratory of Yunnan Higher Education Institutes for Mechanical Behavior and Microstructure Design of Advanced Materials, Kunming 650500, China; 2. Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve subpixel positioning accuracy of quadratic surface fitting in digital image correlation, it is found that large subpixel displacement fluctuation occurs round 0.5 pixels in practical application which leads to the deviation of calculation result from actual subpixel displacement and the displacement discontinuity at this position. A specific correction method is proposed in this paper by analyzing the cause of subpixel displacement deviation in surface fitting. The effects of correction factor k and sub-region size on the correction results were studied by simulation translation experiment. Correction method effectiveness in complex deformation was verified by three point bending experiment. Above results improve the measurement precision of curved surface fitting in practical application.

Keywords: image processing; digital image correlation; curved surface fitting; correlation coefficient correction; subpixel