

基于改进曲面拟合法的数字散斑相关方法研究

李凯强^{1,2,3,4}, 朱丹^{1,2,3,4}, 佟新鑫^{1,3,4}

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

⁴辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

摘要 采用二元二次多项式曲面拟合方法进行精确亚像素定位, 这种数字散斑相关方法具有计算简单、求解效率高优点。然而传统方法通常选取整像素周围的 9 个像素点进行曲面拟合, 为此提出了曲面拟合的改进方案, 采用整像素周围最近的 6 个像素点和相关系数, 直接求解二元二次多项式。采用计算机模拟产生散斑图样, 分别模拟了刚体平移和单向拉伸实验。实验结果证明, 改进方案具有计算效率高、计算误差小的优点。

关键词 图像处理; 数字散斑相关方法; 曲面拟合; 亚像素; 光电测量

中图分类号 TN247; TN911.73; TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051001

Digital Speckle Correlation Method Based on Improved Curved Surface Fitting Method

Li Kaiqiang^{1,2,3,4}, Zhu Dan^{1,2,3,4}, Tong Xinxin^{1,3,4}

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

⁴Liaoning Provincial Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract The digital speckle correlation method based on bivariate quadratic polynomial curved surface fitting method for precise sub-pixel localization has the advantages of simple calculation and high efficiency. The original method usually selects nine pixels around the integer pixel for surface fitting. We use the nearest six pixels around the integer pixel and the correlation coefficient to directly solve the bivariate quadratic polynomial through analyzing the possible improvement schemes of surface fitting. The speckle patterns are generated by computer simulation, as well as the rigid body translation experiments and uniaxial tension experiments are simulated respectively. Experimental results show that the improved scheme has the advantages of high computational efficiency and small computational error.

Key words image processing; digital speckle correlation method; curved surface fitting; sub-pixel; photoelectric measurement

OCIS codes 100.2000; 100.4550; 110.2760

1 引言

数字散斑相关方法是由 Yamaguchi^[1] 和 Peters 等^[2] 提出的一种位移光学测量方法。在实际测量过

程中, 该方法光路简单, 以白光作为实际光源, 不需要严格的环境条件, 并可对全场范围内的区域进行非接触测量^[3], 能够与全息成像^[4]、医学成像^[5] 等技术相结合, 在实际测量中有着广泛的应用。

收稿日期: 2017-10-17; **收到修改稿日期:** 2017-11-14

作者简介: 李凯强(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: likaiqiang@sia.cn

导师简介: 朱丹(1962—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电跟踪测量及其工程应用等方面的研究。

E-mail: danzhu@sia.cn

在数字散斑相关方法中,基于曲面拟合的亚像素定位能够消除图像中的噪声,通过对目标各像素点的相关系数进行拟合,得到描述目标特性的尺寸、形状等参数,进而将位置信息定位于亚像素精度^[6]。该方法在实际应用中的难点在于如何提高计算效率和计算精度。

2 基本原理

2.1 数字散斑相关方法

数字散斑相关方法基本原理如图 1 所示。通过图像采集系统得到参考图像和变形图像,为确定点 P 经变形后的位置,选取以点 P 为中心的参考子区,以互相关函数或最小平方距离函数作为目标函数^[7],在变形图像中进行相关块匹配,使得目标函数取极值从而找到目标子区,进而确定点 P 在变形图像中的位置点 $P'(x', y')$,两者之差即位移矢量 $\mathbf{p} = (u, v)$,其中 u 为 x 方向的位移分量, v 为 y 方向的位移分量。

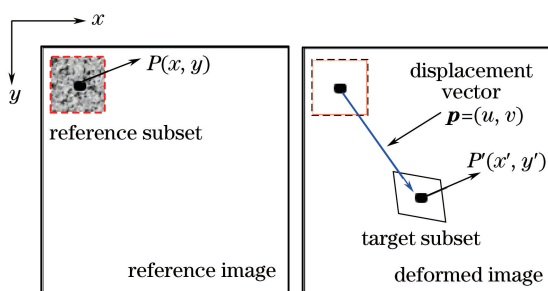


图 1 数字散斑相关方法原理示意图

Fig. 1 Schematic of the principle of digital speckle correlation method

数字散斑相关方法包括整像素搜索过程和亚像素定位过程^[8]。1) 整像素搜索过程。设定整像素搜索步长,在全局区域范围内对变形图像进行块匹配,得到整像素位置,此时的计算精度为 1 pixel。2) 亚像素定位过程。由于测量对精度要求高,只定位于整像素是远远不够的,因此还需要采取合适的亚像素定位算法。常用的亚像素定位算法主要有基于曲面拟合的亚像素定位算法、基于灰度梯度的亚像素定位算法、基于迭代求解的亚像素定位算法^[9]。基于曲面拟合的亚像素定位算法采用曲面拟合法求解亚像素位移,它具有抗噪声能力较强、精度高、计算效率高等优点,该算法是数字图像相关亚像素定位中的一种重要方法,在实际应用中被广泛采用。

2.2 基于曲面拟合的亚像素定位算法

基于曲面拟合的亚像素定位算法基本原理如图

2 所示。经过整像素搜索过程,将变形后原像素点的位置定位于整像素点 $O(x, y)$,并结合周围 8 个像素点(如图 2 所示的点 $A \sim H$)共计 9 个点来拟合相关系数曲面^[10],具体函数形式为

$$C(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2, \quad (1)$$

式中 a_0, \dots, a_5 为二次曲面的待定系数, x 为像素点横坐标取值, y 为像素点纵坐标取值。对(1)式求解极值点可得

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial y} = a_2 + 2a_5y + a_4x = 0. \quad (3)$$

求解(2)式和(3)式所组成的方程组,即可得到亚像素位置点 $P'(x', y')$ 的表达式为

$$P'(x', y') = P' \left(\frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5} \right). \quad (4)$$

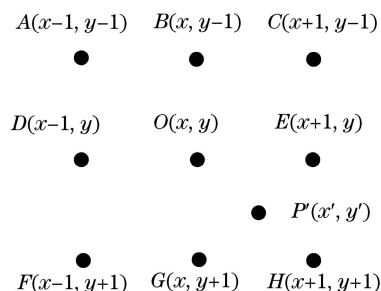


图 2 基于曲面拟合法的亚像素定位算法原理示意图

Fig. 2 Schematic of the principle of sub-pixel localization algorithm based on curved surface fitting method

2.3 改进曲面拟合法的亚像素定位算法

为求解(1)式中二次曲面的待定系数 a_0, \dots, a_5 ,采用传统的 9 点曲面拟合算法得到 9 个方程组,进而将问题转化为利用最小二乘法求解超静定方程组问题。为此提出采用图 2 中整像素位置点 $O(x, y)$ 及其周围 5 个整像素点共计 6 个像素点,直接求解二次曲面的表达式。

根据统计学中的排列组合基本原理,在点 O 周围选取 5 个点的方案共有 $C_8^5 = 56$ 种,由于已经确定了整像素位置为点 O ,因此精确的亚像素位置一定在点 O 周围,为此在选择其他像素点时,考虑其与点 O 的位置关系和中心对称情形(例如“ A, B, D, E, G, O ”,“ B, C, D, E, G, O ”,“ B, D, E, F, G, O ”,“ B, D, E, G, H, O ”其实为同一种方案的 4 种不同情形,即本文中的方案 6),可以将所有的像素点选取方案归纳为以下 6 种方案:方案 1 为 $A, B,$

C, D, E, O ; 方案 2 为 A, C, F, H, B, O ; 方案 3 为 A, B, C, D, F, O ; 方案 4 为 H, B, C, D, F, O ; 方案 5 为 E, B, C, D, F, O ; 方案 6 为 A, B, D, E, G, O 。

经具体计算验证, 方案 1 在实际求解过程中会出现奇异矩阵, 因此方案 1 不可行。由此可知, 6 种方案(即方案 2~6 与传统的 9 点曲面拟合算法, 下

同)可行。

3 实验方法

首先, 利用计算机生成模拟光强高斯分布数字散斑图样^[11]。生成模拟光强高斯分布数字散斑图样的表达式为

$$I_1(x, y) = \sum_{k=1}^S I_0 \exp \left[-\frac{(x - x_k - v_0 - v_x x - v_y y)^2 + (y - y_k - u_0 - u_x x - u_y y)^2}{d^2} \right], \quad (5)$$

式中 S 为散斑颗粒数目, I_0 为散斑颗粒中心点的随机分布光强, x_k 和 y_k 为第 k 个随机产生的形变之前的散斑颗粒中心点的横坐标和纵坐标, u_0 和 v_0 为预先设定的 x 方向和 y 方向的位移分量, u_x, u_y, v_x, v_y 为预先设定的位移梯度分量, d 为散斑颗粒半径。

根据文献[7]和文献[9]研究的散斑参数对计算精度的影响, 利用(5)式设置散斑参数 $S = 1000$, $I_0 = 0.65$, $d = 4$, 得到一幅大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的散斑图样 A, 如图 3 所示。

然后, 针对散斑图样 A, 采用规范化自协方差相

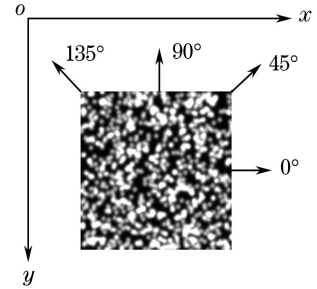


图 3 散斑图样 A

Fig. 3 Speckle pattern A

关公式^[12]进行计算, 其表达式为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}}, \quad (6)$$

式中 $f(x_i, y_i)$ 为参考图像窗口中点 (x_i, y_i) 处的灰度值, \bar{f} 为参考图像窗口的平均灰度, $g(x'_i, y'_i)$ 为形变图像窗口中点 (x'_i, y'_i) 处的灰度值, \bar{g} 为形变图像窗口的平均灰度。相关窗口尺寸取 $41 \text{ pixel} \times 41 \text{ pixel}$ ^[13], 计算散斑图样 A 中心区域 $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 的 1600 个像素点的位移值, 用计算机仿真模拟刚体平移、单向拉伸两个实验, 比较改进后的曲面拟合方案与传统的 9 点曲面拟合算法的计算精度和计算效率。

4 实验验证

4.1 刚体平移实验

傅里叶变换的相移性质表达式为

$$f(x - x_0, y - y_0) \Leftrightarrow F(\alpha, \beta) \exp \times \left[-j2\pi \left(\frac{\alpha x_0}{M} + \frac{\beta y_0}{N} \right) \right], \quad (7)$$

式中 α, β 为频域分量, M, N 为像素尺寸。通过傅

里叶变换的相移性质, 可以实现对散斑图样 A 的精确亚像素平移。刚体平移实验的具体操作过程为: 为了排除在选点计算时带来的不对称性影响, 首先将散斑图样 A 沿如图 3 所示的 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向分别进行 $0.01 \sim 1 \text{ pixel}$ 范围内的精确亚像素平移, 每次平移间隔为 0.01 pixel (需要说明的是, 为了保证散斑图样 A 在 45° 方向上平移, 需要使其沿 x 正方向和 y 负方向同时平移 0.01 pixel ; 为了保证散斑图样 A 在 135° 方向上平移, 需要使其沿 x 负方向和 y 负方向同时平移 0.01 pixel , 因此在 45° 和 135° 这两个方向上实际平移间隔为 $0.01 \times \sqrt{2} \text{ pixel}$), 然后计算均值误差和相对误差, 其表达式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |z(i, j) - r(i, j)|}{W \times H}, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{\delta}{r} \times 100\%, \quad (9)$$

式中 $z(i, j)$ 为通过数字散斑相关方法计算得到的位移值, $r(i, j)$ 为实际位移值, $W \times H$ 为计算区域的像素尺寸。

4.1.1 6种方案在4个方向的亚像素位移

采取方案2~6与传统的9点曲面拟合算法,得到在4个方向0.01~1 pixel范围内的亚像素位移

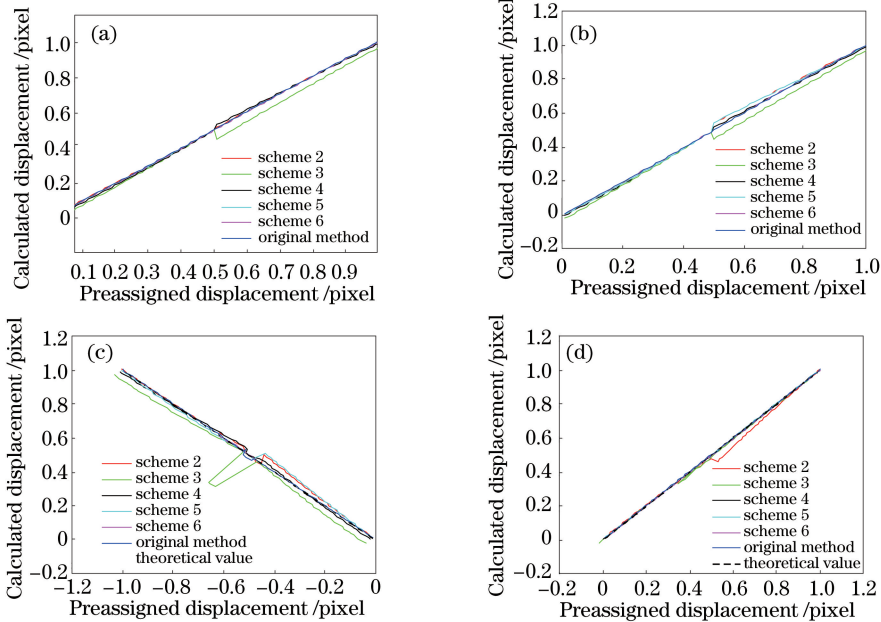


图4 6种方案在4个方向的亚像素位移计算结果曲线。(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 45° ; (d) 135°

Fig. 4 Curves of calculation results of sub-pixel displacement in four directions with six schemes.

(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 45° ; (d) 135°

4.1.2 6种方案在两个方向的亚像素位移的均值误差

采取方案2~6与传统的9点曲面拟合算法,得

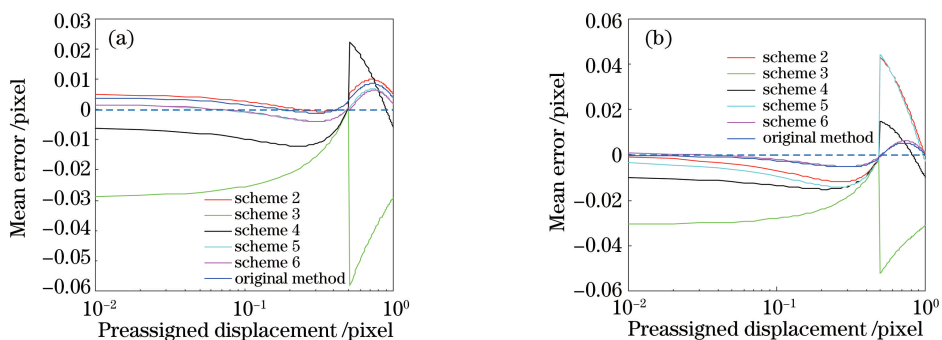


图5 6种方案在两个方向的亚像素位移计算结果的均值误差曲线。(a) 0° ; (b) 90°

Fig. 5 Mean error curves of calculation results of sub-pixel displacement in both directions with six schemes.

(a) 0° ; (b) 90°

由图5可以看出,在 0° 和 90° 方向上,方案6和传统的9点曲面拟合算法在整个计算过程中将计算误差控制在0.01 pixel内,在 0° 方向上的0~0.1 pixel和0.5~1 pixel的位移区间,方案6的计算误差甚至小于传统的9点曲面拟合算法;其他方案

计算结果曲线,如图4所示。

由图4可以看出,方案6和传统的9点曲面拟合算法在各个方向的计算结果都与预先给定的真实位移结果相一致,而其他方案则在不同方向上出现了较大的偏差。

到在 0° 和 90° 这两个方向的亚像素位移计算结果的均值误差曲线,如图5所示。其中,横坐标为对数坐标。

的计算误差均超过了0.01 pixel,在 90° 方向上,当位移超过0.5 pixel时,计算误差最为明显。

4.1.3 6种方案在两个方向的亚像素位移的均值相对误差

采取方案2~6与传统的9点曲面拟合算法,得

到在 0° 和 90° 这两个方向的亚像素位移计算结果的均值相对误差曲线,如图 6 所示。其中,横坐标为对数坐标。

由图 6 可以看出,6 种方案在 0° 和 90° 方向上的均值相对误差均随着位移的增大而减小(除了在 0.5 pixel 位移处,在该处方案 2~5 会发生较大跳

变);而方案 6 和传统的 9 点曲面拟合算法的均值相对误差一直保持在 5% 以内(在 $0.1 \sim 1$ pixel 的位移区间,均值相对误差甚至小于 2%)。因此,从整体上看,方案 6 去掉是一种结果精确、稳定的计算方法,其计算结果可与传统的 9 点曲面拟合算法相媲美,要优于方案 2~5。

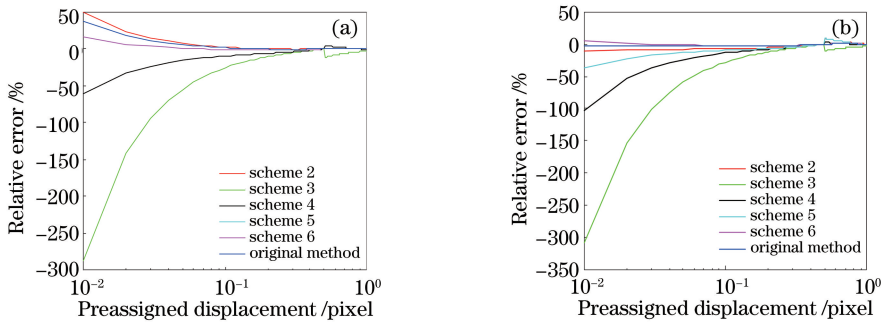


图 6 6 种方案在两个方向的亚像素位移计算结果的均值相对误差曲线。(a) 0° ; (b) 90°

Fig. 6 Mean relative error curves of calculation results of sub-pixel displacement in both directions with six schemes.

(a) 0° ; (b) 90°

4.1.4 方案 6 所有 4 种情形在两个方向的亚像素位移均值误差和另两个方向的亚像素位移

2.3 节提到,同属于方案 6 的像素点选取方案共有 4 种不同情形(情形 1 为“A、B、D、E、G、O”,情形 2 为“B、C、D、E、G、O”,情形 3 为“B、D、E、F、G、O”,情形 4 为“B、D、E、G、H、O”)。为了简单起

见,进行了 4 组实验来分析所有 4 种情形对计算结果的影响。采取同属于方案 6 的所有 4 种情形的计算方案,得到在两个方向的亚像素位移计算结果的均值误差曲线和另两个方向的亚像素位移计算结果曲线,如图 7 所示。其中,图 7(a)和图 7(b)展示了所有 4 种情形在 0° 和 90° 方向的亚像素位移计算结

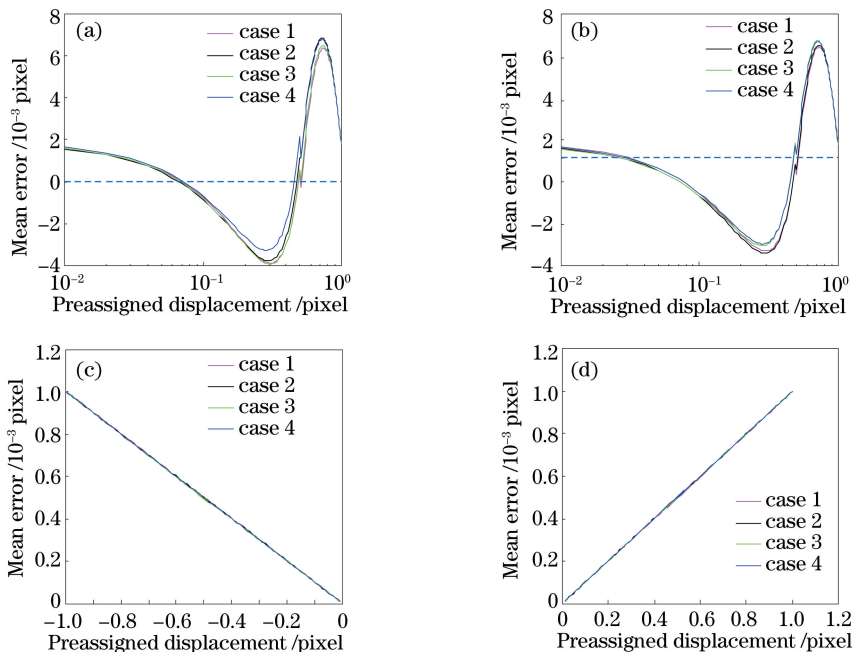


图 7 方案 6 的所有 4 种情形在两个方向的亚像素位移计算结果的均值误差曲线和另两个方向的亚像素位移计算结果曲线。

(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 45° ; (d) 135°

Fig. 7 Mean error curves of calculation results of sub-pixel displacement in two directions and curves of calculation results of sub-pixel displacement in the other two directions for all four cases of scheme six. (a) 0° ; (b) 90° ; (c) 45° ; (d) 135°

果的均值误差曲线,横坐标为对数坐标。图 7(c)和图 7(d)展示了所有 4 种情形在 45° 、 135° 方向的亚像素位移计算结果曲线。

由图 7(a)和图 7(b)可以看出,所有 4 种情形的均值误差曲线类似,且计算精度都为 0.01 pixel,计算误差小于 0.008 pixel;由图 7(c)和图 7(d)可以看出,所有 4 种情形都符合给定的亚像素位移值。因此,进一步证实了方案 6 是一种精确、可靠的亚像素

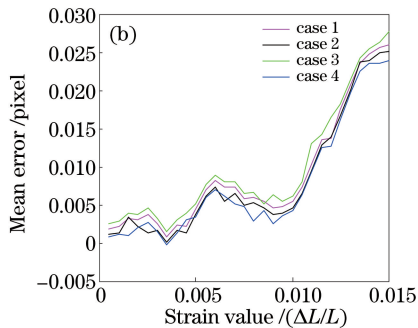
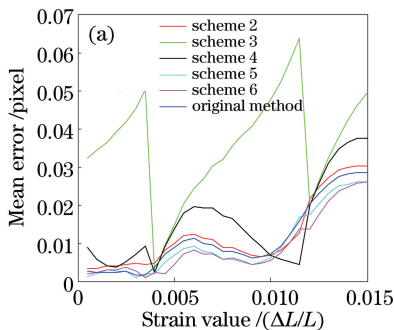


图 8 单向拉伸的均值误差曲线。(a) 6 种方案;(b) 方案 6 的所有 4 种情形

Fig. 8 Mean error curves of the uniaxial tension. (a) Six schemes; (b) all four cases of scheme 6

由图 8(a)可以看出,在散斑图样产生应变的情况下,与其他求解方法相比,方案 6 减小了计算误差,提高了计算精度。由图 8(b)可以看出,方案 6 的所有 4 种情形在计算误差方面相差不大,通常可以满足计算精度要求。

所有计算工作均在 Intel(R) Core(TM) i7-6700 3.4 GHz 处理器,4 GB 内存,Windows 7 操作系统下完成。在计算效率方面,传统的 9 点曲面拟合算法和方案 6 方法运行时间分别为 72.9055 s 和 66.3666 s(方案 6 四种情形的平均计算时间)。由于方案 6 只需要计算 6 个像素点的相关系数值,因此与传统的 9 点曲面拟合算法相比,计算效率得到了提高。

5 结 论

针对传统的 9 点曲面拟合算法进行亚像素定位的问题,提出了改进的数字散斑相关方法,并实验证明了改进方案的有效性,其计算精度可与传统的 9 点曲面拟合算法相媲美,计算效率也得到了提高,因此更适合对实时性要求较高的全场位移计算。

在真实的测量任务中,尤其是室外现场测量,由于环境因素的变化,特别是光照的变化直接影响数字散斑相关方法的计算精度。针对这一问题,改进算法并提升稳健性,将是下一步的工作任务。

位移计算方法。

4.2 单向拉伸实验

针对散斑图样 A,通过改变(5)式中的参数 u_x ,每次增加 0.0005 pixel,变化 30 次,其他参数不变,得到含有 30 张模拟 x 方向单向拉伸的散斑图样本集(应变 $\epsilon = \Delta L/L$ 范围为 0.0005~0.0150)。利用(8)式计算均值误差,并绘制曲线,如图 8 所示。

参 考 文 献

- [1] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 2000, 14(11): 1270.
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging technique in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431.
- [3] Shan B H, Huo X Y, Liu Y. A stereovision measurement method using epipolar constraint to correct digital image correlation matching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804003. 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804003.
- [4] Chen B, Yang J, Li X Y, *et al.* Aberration correction and speckle noise reduction in long distance digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 020902. 陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 远距离数字全息成像波前畸变校正和散斑噪声抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 020902.
- [5] Li Q, Ding S H, Li Y D, *et al.* Advances in research on THz digital holographic imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050006. 李琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050006.

- [6] Li X Z, Liu H H, Zhen Z Q, *et al.* Investigation of curved surface fitting method in sub-pixel displacement digital speckle correlation measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(8): 72-75.
李新忠, 刘汇慧, 甄志强, 等. 亚像素数字散斑相关测量的曲面拟合法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(8): 72-75.
- [7] Pan B, Xu B Q, Chen D, *et al.* Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, 26(2): 128-134.
潘兵, 续伯钦, 陈丁, 等. 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): 128-134.
- [8] Liang Z N, Yin B, Wang S G. Study on effect of subset size on digital image correlation with a new method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1212005.
梁振宁, 印波, 王石刚. 研究子窗口对数字散斑相关计算影响的新方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212005.
- [9] Meng L B, Ma S P, Jin G C. On the performance of the subpixel displacement Estimation used in digital speckle correlation method (DSCM) [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(3): 343-348.
孟利波, 马少鹏, 金观昌. 数字散斑相关测量中亚像素位移测量方法的比较[J]. *实验力学*, 2003, 18(3): 343-348.
- [10] Li S X, Sun Y L, Li J Z. Curved surface fit of subpixels displacement searching in digital speckle correlation measurement technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(7): 638-640.
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): 638-640.
- [11] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [12] Liu C, Dai Y T, Dai M L, *et al.* Deformation measurement by two-dimensional multi-camera full-field digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1212002.
刘聪, 戴云彤, 戴美玲, 等. 二维多相机全场数字图像相关变形测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1212002.
- [13] Pan B, Xie H M, Wang Z Y, *et al.* Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.