

用于数字图像相关位移测量的一种改进爬山算法

叶沛, 张梅, 马万龙, 朱天天, 李桂华*

安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601

摘要 数字图像相关(DIC)方法因其光路简单、适应性好在位移和应变测量中得到广泛应用,在大位移测量中提高DIC匹配速度尤为重要。提出一种改进的爬山算法,修正了传统爬山法易陷入局部极值的缺点,提高了搜索速度,使其适用于大位移测量。用模拟散斑图对改进算法进行实验测试和对比分析,结果表明:这种方法的总体搜索速度与精度优于传统爬山法,当步长改变系数选择恰当时,该算法能以较快的搜索速度得到正确结果。

关键词 机器视觉; 数字图像相关法; 爬山法; 整像素搜索; 大位移测量; 搜索速度

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.021506

Improved Climbing Algorithm for Digital Image Correlation Displacement Measurements

Ye Pei, Zhang Mei, Ma Wanlong, Zhu Tiantian, Li Guihua*

School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract Digital image correlation (DIC) method has been widely used in displacement and strain measurements because of its simple optical path and good adaptability. It is particularly important for improving the speed of DIC matching in large displacement measurements. This paper proposes an improved climbing algorithm that corrects the shortcomings that result in the traditional climbing algorithm easily approaching the local extremum. Furthermore, the proposed algorithm improves the search speed, making it suitable for large displacement measurements. It is tested and compared with simulated-speckle patterns. The results show that the overall search speed and precision of this method are better than those of traditional climbing algorithms. When the step-size change coefficient is appropriate, the algorithm can quickly obtain the accurate result.

Key words machine vision; digital image correlation method; climbing algorithm; integral pixel search; large displacement measurement; search speed

OCIS codes 150.1135; 120.4630; 030.6140; 100.4999

1 引言

数字图像相关(DIC)位移测量方法是 20 世纪 80 年代由日本 Yamaguchi、美国的 Peters 和 Ranson 等共同提出的^[1]。DIC 方法因具有光路简单、非接触、全场测量、对环境要求低等优点,在光测力学相关研究中得到越来越广泛的应用。提高相关搜索速度是 DIC 方法研究的重要方向。在早期的研究中,大都采用逐点搜索法,搜索时间长速

度慢。后来经过不断改进,提出了许多基于经典数学理论的相关搜索方法,如粗细搜索法、Newton-Raphson 迭代算法、双参数法等,以及后来基于智能的搜索算法,如爬山法、人工鱼群算、粒子群算法、遗传算法等^[2-5]。

1983 年, Peters 等^[6]提出粗细搜索法,将整个搜索过程分两部分进行:首先用粗搜索定位搜索范围,然后利用细搜索进行精确搜索,计算物体实际位移,提高算法的精度。1988 年, Sutton 等^[7]提出

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-06-05; 录用日期: 2019-07-03

基金项目: 留学回国启动基金项目(2015KJS010003)、安徽省教育厅重点项目(KJ2016A037)、安徽省基金项目(1908085ME172)

* E-mail: guihualil@163.com

Newton-Raphson 算法,将数字散斑相关方法的测量精度提高了一个数量级。1989年,Sutton等^[8]将Newton-Raphson 迭代算法加以改进,对散斑图进行二元三次样条插值,提高了DIC法的测量速度和精度。1991年,陈绍春等^[9]提出双参数法,通过参数拟协调元的直接分析来计算位移,后来其被用于DIC分析中。1996年,Zhao等^[10]提出了爬山搜索算法,提高了DIC的测量精度。2012年,张小莲等^[11]提出了一种引入停止机制的爬山法,并应用在了风力发电领域。2018年,姚万业等^[12]提出了基于风速预测的改进爬山法。

粗-细搜索法是对位移及位移导数同时搜索,计算量大,搜索时间长;Newton-Raphson 迭代算法相对于粗-细搜索法比较省时,但当计算目标函数的Hessian矩阵及其逆矩阵的维数较高时计算量也很大^[13];双参数法因公式推导复杂,计算量大,已经很少用于DIC测量中;爬山法采用局部寻优方法,只需少量的搜索步骤,计算速度相对较快,但易陷入局部极值。智能算法在亚像素分辨率位移测量时优势明显,2018年,葛朋祥等^[14]将遗传算法、粒子群算法、人工鱼群算法等智能算法在匹配精度和搜索速度等方面进行了对比分析,认为微小位移测量时,遗传算法的综合性能较优。但并没有解决测量大位移时时间较长且误差较大的问题。

为了改善传统DIC方法易陷入局部最优及大位移计算速度过慢等缺点,本文对爬山法进行了改进,通过使用自适应的改变步长方法,避免陷入局部寻优,并通过模拟散斑图对基于改进爬山法的DIC方法在大位移测量中的适用性进行验证。

2 DIC方法介绍

2.1 DIC基本原理

选择变形前后的两幅图像作为研究对象,变形前图像为参考图像,变形后图像为目标图像。在参考图像中以待测点 $P(x, y)$ 为中心选择一个大小为 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的矩形参考子区,在目标图像中选择相同尺寸的目标子区。对参考子区与目标子区进行相关匹配,用相关系数的大小来衡量匹配程度,相关系数最大值所对应的点 $P'(x', y')$ 即为目标子区的中心点,根据点 $P(x, y)$ 和 $P'(x', y')$ 的坐标差值可求出两幅图像的相对位移量 $d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ ^[15-16],其中 $\Delta x = x' - x$, $\Delta y = y' - y$ 。DIC基本原理如图1所示^[17]。

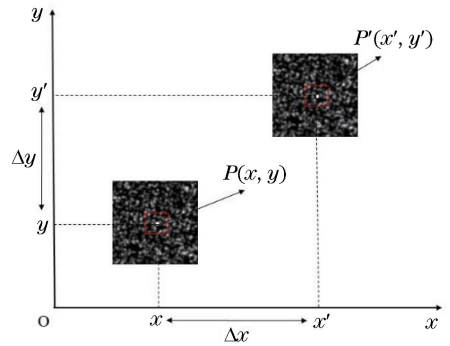


图1 DIC基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of DIC

目前,衡量匹配程度的相关系数有数十种,根据Tong等^[18-19]对相关系数的研究,零均值归一化互相关函数对图像灰度值的线性变化不敏感,相关计算的精度和稳健性均较高,因此本文以其作为评价参考子区和变形子区匹配程度的函数,表达式为

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - \bar{f}] \times [g(x', y') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中: M 为子区尺寸; $f(x, y)$ 为参考图中点 (x, y) 处的灰度值; $g(x', y')$ 为目标图中点 (x', y') 处的灰度值; \bar{f} 为参考子区的平均灰度; \bar{g} 为目标子区的平均灰度。 C 值越接近于1,目标子区与参考子区的匹配度越好, $C = 1$ 表示完全匹配。

2.2 爬山法原理

爬山算法是一种局部择优的方法,采用启发式方法对深度优先搜索进行改进,它利用反馈信息帮助生成解的决策,属于人工智能算法的一种。但也因为爬山算法局部寻优以及不断缩小寻优区域的特

性,当测量范围较大及爬山距离较远时,容易陷入局部极值。图 2 为爬山法原理示意图。

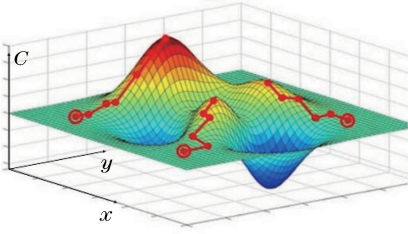


图 2 爬山法示意图

Fig. 2 Diagram of climbing method

3 改进爬山法

3.1 内部自适应循环

1)在参考图像中选择以待测点 $P(x, y)$ 为中心的参考子区,并在目标图像中以相同坐标选择起算点 $Q_1(x, y)$ 为中心的目标子区。应用(1)式计算两个子区的相关系数,以作为目前最大相关系数,用 $C'_{\max}(k)$ 表示,其中 k 为内循环计数,其对应的 $Q_k(x, y)$ 作为第 k 次内循环的起算点。

2)每次内循环以内步长 L_{in} 为间隔,以起算点 $Q_k(x, y)$ 为中心选择八邻点,分别计算以每个点为中心的子区与目标子区的相关系数 $C_i (i = 1, \dots, 8)$ 。八邻点的像素坐标位置如图 3 所示。

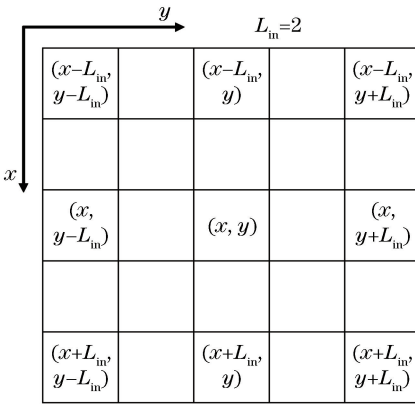


图 3 八邻点图

Fig. 3 Diagram of eight adjacent points

3)比较 $C'_{\max}(k)$ 与 $C_i (i = 1, \dots, 8)$ 的大小,并改变 $L_{in}(k)$ 与 $C'_{\max}(k)$ 。当前起算点相关系数小于八邻点相关系数中的最大值时,以这个最大值点作为新的起算点,以这个最大值作为目前最大相关系数。否则,起算点与目前最大相关系数不变,改变内步长找到新的八邻点,新的最大相关系数为

$$C'_{\max}(k+1) = \begin{cases} \max(C_i), & \max(C_i) > C'_{\max}(k) \\ C'_{\max}(k), & \max(C_i) < C'_{\max}(k) \end{cases} \quad (2)$$

当前起算点相关系数大于八邻点相关系数中的最大值时,内步长改变过程可表示为

$$L_{in}(k+1) = \begin{cases} L_{in}(k), & \max(C_i) > C'_{\max}(k) \\ L_{in}(k) - \frac{1}{C'_{\max}(k)}, & \max(C_i) < C'_{\max}(k) \end{cases} \quad (3)$$

为了减少多余计算,内步长根据理想相关系数的最大值 1 与当前起算点相关系数 $C'_{\max}(k)$ 的比值自适应改变,重复循环直到 $L_{in}(k) = 0$,得到局部极值 $C_{f\max} = C'_{\max}(k)$ 。

将内部循环的最后结果 $C_{f\max}$ 作为重要依据输入外循环中。

3.2 基于阈值的自适应外循环

改进爬山法使用 3.1 节中得到的 $C_{f\max}$,以设定好的阈值 C_{th} 为判断依据,这个阈值在使用模拟散斑图时一般设为 0.85,即当相关系数大于 0.85 时认为搜索成功。并提出了一个外循环步长 L_{out} 为内循环步长 L_{in} 赋值。 L_{out} 以整像素最小单位 1 pixel 为初始值,根据理想相关系数最大值 1 与当前局部极值 $C_{f\max}$ 的差值进行自适应改变,并且为了加快搜索速度设置了一个步长改变系数 S 。

当 $C_{f\max} < C_{th}$,改变 L_{out} 的值:

$$L_{out}(k+1) = L_{out}(k) + S \times (C_{\max} - C_{f\max}) \quad (4)$$

为 L_{in} 重新赋值,进入内循环:

$$L_{in} = L_{out}(K+1), \quad (5)$$

式中: K 为外循环计数; S 为外步长改变系数。

当 $C_{f\max} > C_{th}$ 时,将 $C_{f\max}$ 作为正确结果输出。

改进爬山法流程图如图 4 所示。

4 实验验证

4.1 传统爬山法与改进爬山法结果对比

将一幅模拟散斑图向固定方向平移 1 ~ 50 pixel 位移,得到 50 幅位移图像,如图 5 所示。

对这一系列散斑图分别用传统爬山法与改进爬山法进行对比测试,测试时使用的子区尺寸为 41 pixel × 41 pixel,部分测试结果如表 1 所示。

可以看出,传统爬山法搜索时间波动较大,并且不能保证搜索精度,而改进爬山法的搜索速度相比传统爬山法有明显提升,并且能够保持稳定的搜索精度。从中提取位移为 50 pixel 的一组结果进行对比,在参考图中随机选择坐标为 (94, 94) 的感兴趣点,目标图像中的正确搜索结果坐标应为 (144, 144)。

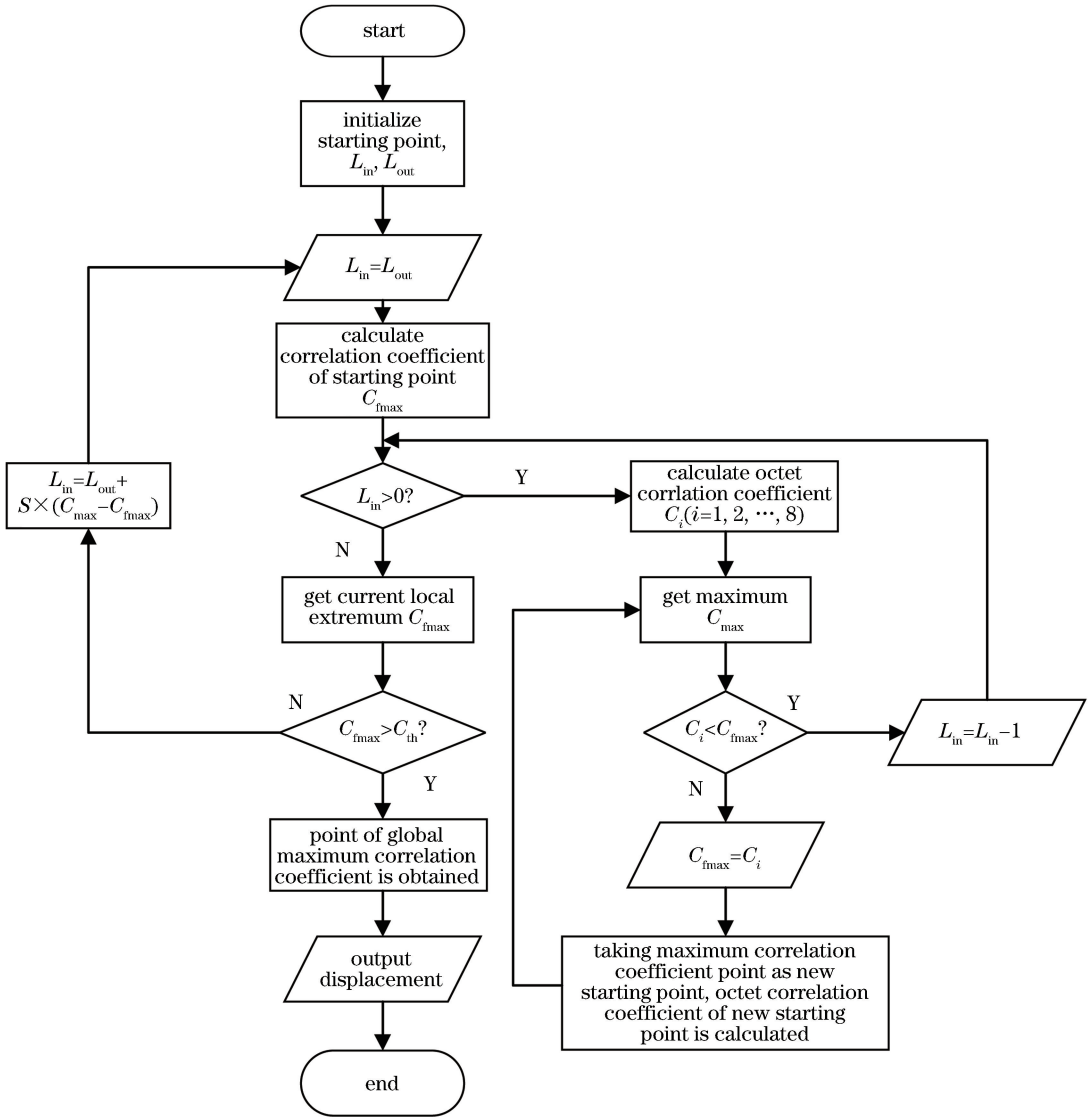


图 4 改进爬山法流程图

Fig. 4 Flow chart of improved climbing method

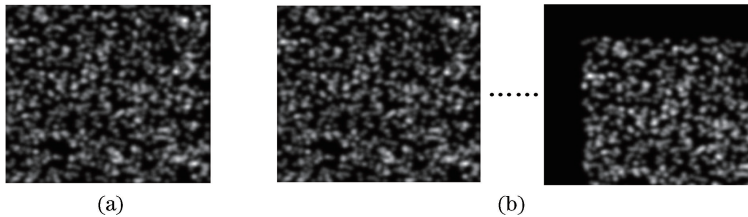


图 5 系列位移图像。(a)参考图;(b) 1~50 pixel 位移

Fig. 5 Serial displacement images. (a) Reference map; (b) 1~50 pixel displacement

传统爬山法相关系数搜索分布图如图 6 所示。搜索结果中最大相关系数为 0.3519，峰值子区中心点坐标为(92, 133)，与正确搜索结果坐标(144, 144)不同，从图 6 中可以看出次峰值较多，搜索失败。

改进爬山法搜索结果如图 7 所示。搜索结果相

关系数为 0.9981，峰值子区中心点坐标为(144, 144)，与正确搜索结果坐标(144, 144)相同，次峰值很少，搜索成功。并且可以看出，改进爬山法找到了理想极值点，没有陷入局部极值，并且较传统爬山法搜索了更少的点数，就得到了正确的搜索结果，比传统爬山法效率更高，速度更快。

表 1 改进爬山法与传统爬山法对比实验结果

Table 1 Comparison of experimental results between improved climbing method and traditional climbing method

Displacement / pixel	Search accuracy (correlation coefficient)		Search time /s	
	Improved climbing algorithm	Traditional climbing algorithm	Improved climbing algorithm	Traditional climbing algorithm
1	0.9933	0.9956	0.04129	0.162766
2	0.9985	0.9983	0.04122	0.218557
3	0.9982	0.9984	0.04188	0.259821
4	0.9971	0.9983	0.04654	0.331936
5	0.9963	0.9985	0.03581	0.404434
10	0.9964	0.3520	0.0771	0.134824
20	0.9975	0.2195	0.08963	0.012802
25	0.9956	0.9981	0.09785	0.614014
30	0.9972	0.9982	0.122	0.53071
35	0.9972	0.9984	0.1495	0.655383
40	0.9997	0.3519	0.11733	0.057715
45	0.994	0.9979	0.1626	0.375475
50	0.9984	0.3519	0.16837	0.192130

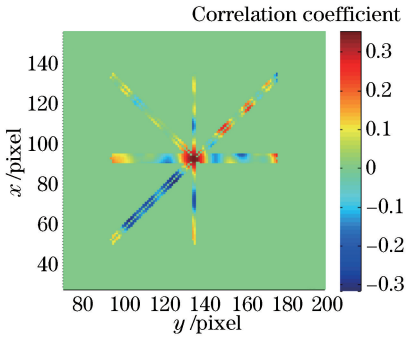


图 6 传统爬山法搜索结果

Fig. 6 Research results of traditional climbing method

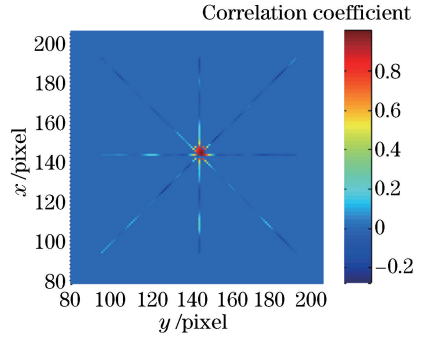


图 7 改进爬山法搜索结果

Fig. 7 Research results of improved climbing method

4.2 步长改变系数 S 对计算时间的影响

利用上面已有的一系列位移图,在目标图像中以坐标点(103,103)确定目标子区,在所有位移图像中对这一目标子区进行搜索。同一组参数进行多次计算,对30次正确结果所用时间取均值。所用电脑

配置如下:处理器 Intel(R) Core(TM) i5_7200U, 2.5 GHz,运行软件环境为 MATLAB r2014a。

图 8(a)、(b)分别给出了固定测量位移为 25 pixel 时和固定子区尺寸为 51 pixel × 51 pixel 时,步长改变系数 S 对搜索时间的影响。

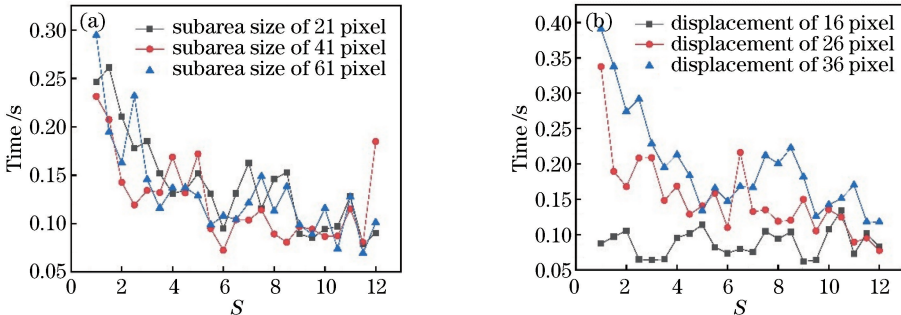
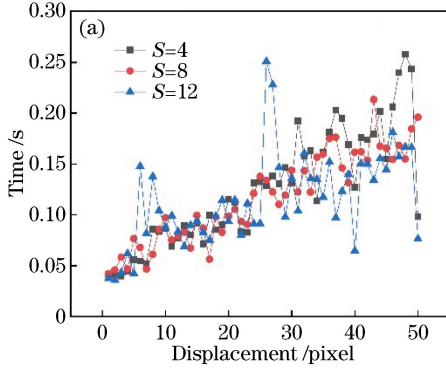


图 8 步长改变系数 S 对搜索时间的影响。(a) 位移为 25 pixel;(b) 子区尺寸 51 pixel × 51 pixel

Fig. 8 Influence of step-size change coefficient S on search time. (a) Displacement is 25 pixel; (b) subarea size is 51 pixel × 51 pixel

由图 8(a)可以看出,随着系数 S 的增大,搜索时间呈下降趋势,且在 9 到 11 之间保持稳定。当 S 大于 12 时,步长一次改变过大可能跳过了最佳步长,导致搜索时间有所增加。由图 8(b)可以看出,在测量不同位移时,大位移测量时间要多于小位移



测量时间。

4.3 测量位移大小对计算时间的影响

图 9(a)、(b)分别给出了固定子区尺寸为 51 pixel×51 pixel 时与固定步长改变系数 S 时,测量位移对搜索时间的影响。

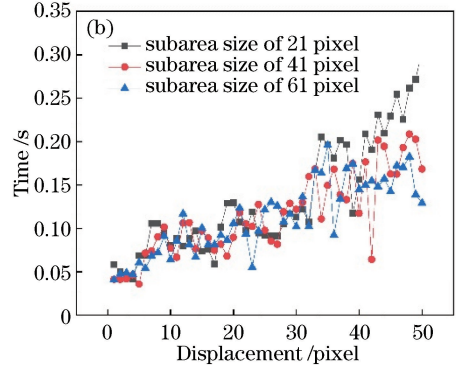


图 9 测量位移对搜索时间的影响。(a) 子区尺寸 51 pixel×51 pixel;(b) $S=9$

Fig. 9 Influence of measured displacement on search time. (a) Sub area size is 51 pixel×51 pixel; (b) $S=9$

可以看出搜索时间随搜索位移的增大呈增大趋势,在保证搜索结果正确的基础上,当搜索位移在 30 pixel 以下时,能够保证搜索时间在 0.1 s 以内,当搜索位移大于 30 pixel 时,搜索时间偶尔会大于 0.2 s。以上实验体现了改进爬山法能够满足 1~50 pixel 范围内的位移测量,并且能够保证较快的搜索速度。

4.4 更大位移的测量

为证明改进爬山法对较大位移测量的适用性,使用更大位移模拟散斑图对改进爬山法进行测试。对于尺寸为 256 pixel×256 pixel 的图片来说,100 pixel 已经是相对较大的位移。如果位移大于 100 pixel,就会出现搜索子区移动到图片范围之外的问题,导致无法搜索到正确结果。表 2 为位移范围为 90~100 pixel 时的测试结果。可以看出,改进爬山法能测量 100 pixel 以下的整像素位移,并且搜索时间低于 0.4 s。

表 2 位移为 90~100 pixel 时改进爬山法的测量结果

Table 2 Measurement results of improved climbing method for displacement of 90~100 pixel

Displacement / pixel	Search time / s	Search accuracy (correlation coefficient)
90	0.32703	0.998
91	0.2627	0.998
92	0.22109	0.9981
93	0.22653	0.998
94	0.09752	0.9981
95	0.11088	0.9978
96	0.35147	0.9992
97	0.21997	0.9977
98	0.33607	0.998
99	0.14172	0.998
100	0.14102	0.9981

参 考 文 献

- [1] Rui J B, Jin G C, Xu B Y. A new digital speckle correlation method and its application [J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(5): 599-607.
芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, 26(5): 599-607.
- [2] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25 (3): 232-244.
- [3] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. Experimental

5 结 论

基于位移量为 100 pixel 以内的测量实验,对改进爬山法的性能进行了实验测试。实验结果表明,改进爬山法解决了传统爬山法易陷入局部极值的缺点。在测量 50 pixel 以内位移时,当步长改变系数 S 小于 12 时,改进爬山法搜索时间随着 S 的增大而减小。改进爬山法能够满足较大位移的测量(小于 100 pixel),并能够保证一定的搜索速度。

- Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
- [4] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [5] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213427.
- [6] Peters W H, Ranson W F, Sutton M A, et al. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics[J]. Optical Engineering, 1983, 22(6): 226738 .
- [7] Sutton M A, McNeill S R, Jang J, et al. Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates[J]. Optical Engineering, 1988, 27(10): 271070.
- [8] Sutton M A , Turner J L , Bruck H A , et al. Full-field representation of discretely sampled surface deformation for displacement and strain analysis[J]. Experimental Mechanics, 1991, 31(2): 168-177.
- [9] Chen S C, Shi Z C. Two-parameter method for constructing element stiffness matrix [J]. Computational mathematics, 1991, 13(3): 286-296
陈绍春, 石钟慈. 构造单元刚度矩阵的双参数法[J]. 计算数学, 1991, 13(3): 286-296.
- [10] Zhao W Z, Jin G C. An experimental study on measurement of Poisson' s ratio with digital correlation method [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60(8): 1083-1088.
- [11] Zhang X L, Li Q, Yin M H, et al. An improved hill-climbing searching method based on halt mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 128-134.
张小莲, 李群, 殷明慧, 等. 一种引入停止机制的改进爬山算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 128-134.
- [12] Yao W Y, Jia Z X, Huang P. Improved MPPT strategy for climbing method based on wind speed prediction [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(2): 44-49.
姚万业, 贾昭鑫, 黄璞. 基于风速预测的改进爬山法最大功率追踪策略[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(2): 44-49.
- [13] Wang H W, Kang Y L, Xie H P. Advance in digital speckle correlation method and its application [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195-203.
王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195-203.
- [14] Ge P X, Ye P, Li G H. Application of digital image correlation method based on genetic algorithm in micro-displacement measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612006.
葛朋祥, 叶沛, 李桂华. 基于遗传算法的数字图像相关法在微位移测量中的应用[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612006.
- [15] Zhang H J, Li G H, Liu C, et al. Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.
张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.
- [16] Ge P X, Li G H. Application of a combinatorial DIC algorithm in sub-pixel displacement measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111202.
葛朋祥, 李桂华. 一种组合式 DIC 算法在亚像素级位移测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111202.
- [17] Ge J K, Qiu Y H, Wu C M, et al. Summary of genetic algorithms research [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(10): 2911-2916.
葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [18] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications [J]. Strain, 2005, 41(4): 167-175.
- [19] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching [J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5501-5509.