

大变形测量数字图像的种子点匹配方法

唐正宗, 梁晋, 肖振中, 郭成

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对数字图像相关方法中的大变形测量难题, 提出了一种数字图像的种子点匹配方法. 对于连续变形的图像系列, 将图像子区划分后, 选取其中任一子区作为种子点并进行相关匹配, 根据相邻状态变形的连续性, 提出了一种改进的整像素搜索方法, 可保证种子点在大变形情况下仍能匹配成功. 当种子点匹配完成后, 根据同一状态相邻点变形的连续性, 利用种子点的相关参数计算其 4 个邻近点的相关参数初值并完成匹配, 按照同样的方法依次向外扩散, 直至所有的点匹配完成. 通过刚体旋转和单向拉伸实验表明, 对于 40° 旋转图像的位移场以及高达 113% 的钢试件大变形, 测量结果良好, 具有较高的精度, 证明了该方法的有效性.

关键词: 大变形测量; 数字图像相关; 种子点; 最小二乘迭代

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0051-05

Digital Image Correlation Method Based on Seed Point for Large Deformation Measurement

TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, Guo Cheng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problem of large deformation measurement with digital image correlation method, a method based on seed point is presented. Dividing subsets in the reference image, one point is chosen as the seed point and is matched first. Utilizing the deformation continuity of adjacent stages of a series images, an improved integer pixel search method is proposed, which guarantees that the seed point can be matched successfully even in large deformation situation. Once the seed point is matched, it can be used to calculate the initial correlation parameters of its four neighbor points following the deformation continuity of neighbor points in one stage, then the four neighbor points can be matched successfully. The above process repeats until all the points are matched. A rigid rotation experiment and a tensile test are carried out to verify the proposed method. The measurement results of 40 degrees rotation and large deformation up to 113% confirm the validity and precision.

Keywords: large deformation measurement; digital image correlation; seed point; iterative least-squares method

数字图像相关方法(DIC)最初由 Sutton 等人^[1]提出, 由于该方法具有非接触、高精度、全场测量、实验设备简单等优点, 因此在材料力学性能测试领域得到了广泛的应用^[2-3].

在数字图像相关方法中, 对于变形前散斑图像

上的某一点, 为了寻找该点在变形后散斑图像上的对应点, 通常是利用该点周围矩形子区内的散斑灰度信息, 在变形后的图像上通过求取相关系数的最大值(或最小值)来寻找. 求取相关系数最大值(或最小值)的过程是一个非线性优化的过程, 可以通过最

小二乘迭代算法^[4] (ILS) 进行求解. ILS 算法的收敛性严重依赖于初值的选取, 但只有准确的初值才能保证算法迅速收敛. 通常, 利用整像素搜索方法得到位移的初值, 并作为 ILS 算法的初值. 该方法在被测物体发生较大刚体旋转或大变形的情况下就会失效, 而一些全局优化算法不需要初值, 如遗传算法^[5]、差分算法^[6]等, 但计算效率却很低, 因此很少在实际中使用. 文献[7]提出了一种基于仿射变换的粗细搜索法, 通过选取 3 个或更多的特征点来计算 2 幅图像的整体相对变形, 文献[8]提出采用基于人机交互的方式来获取大变形初值的方法, 但这 2 种方法均需要人工交互, 因此对于数量较大的系列变形图片较为繁琐.

在变形测量过程中, 通常会得到连续变形的多个状态的图像(变形量不断增大), 一般情况下, 相邻状态图像的变形会存在连续性, 因此本文提出了一种数字图像的种子点匹配方法. 该方法利用相邻状态变形的连续性对种子点进行匹配, 然后通过同一状态的相邻点的变形连续性, 使种子点为其他点提供初值, 并最终完成对所有点的匹配, 在无需人工交互的情况下实现了对大变形过程的高效测量.

1 数字图像相关方法

数字图像的相关方法就是寻找 2 幅图像上的匹配点, 图 1 以 1 幅图像作为参考, 而另外 1 幅图像作为变形图像. 在参考图像中, 取以待匹配点 (x, y) 为中心的 $(2M+1)(2M+1)$ 大小的矩形子区作为参考子区, 在变形图像中, 通过一定的搜索方法, 并按照某一相关函数进行相关计算, 寻找与参考子区相似度最大的、以 (x', y') 为中心的目标子区, 则点 (x', y') 即为点 (x, y) 在变形图像中的匹配点. (x_i, y_i) 为参考子区内的任意一点, (x'_i, y'_i) 为其在变形图像上的对应点, 在进行相关匹配时, 图 1 中的图像需按照某一映射函数进行计算, 本文采用常用的一阶映射函数

$$\begin{cases} x'_i = x + d_x + u + u_x d_x + u_y d_y \\ y'_i = y + d_y + v + v_x d_x + v_y d_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: u, v 是点 (x, y) 在 x, y 方向的位移; d_x, d_y 为点 (x_i, y_i) 与点 (x, y) 在 x, y 方向上的距离; u_x, u_y, v_x, v_y 表示参考子区的位移梯度.

f, g 分别为点 (x_i, y_i) 和点 (x'_i, y'_i) 的灰度值, 二者存在如下关系

$$f(x_i, y_i) - e(x_i, y_i) = r_0 + r_1 g(x'_i, y'_i) \quad (2)$$

式中: e 为噪声部分; r_0, r_1 为补偿光照引起的灰度

差异的变量. 由于 (x'_i, y'_i) 为非整数像素, 因此需要利用插值算法^[9]来计算它的灰度值.

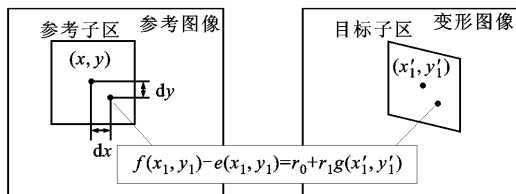


图1 数字图像相关方法的原理图

设参考子区中共有 n 个像素, 且像素的灰度值受理想的随机分布噪声影响, 通过求取相关系数的最小值, 可以在变形图像中找到与参考子区具有最大相似度的目标子区, 即

$$c_s(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i) - r_0 - r_1 g(x'_i, y'_i)]^2 \quad (3)$$

相关参数向量

$$\mathbf{p} = [u, u_x, u_y, v, v_x, v_y, r_0, r_1]$$

式(3)是一个非线性优化问题, 可以通过 ILS 算法来求解.

2 数字图像的种子点匹配方法

为了求取 ILS 算法的相关参数初值, 通常是利用整像素搜索方法得到参考子区的位移初值, 并将 $\mathbf{p}$ 的初值设置为 $[u, 0, 0, v, 0, 0, 0, 1]$, 但整像素搜索不适用于较大旋转和大变形的情况.

2.1 改进的整像素搜索方法

传统的整像素搜索方法是假设参考子区的形状保持不变, 仅发生刚体平移, 通过在指定的搜索区域内逐像素地移动参考子区并计算相关系数, 而相关系数最大的位置即为所寻找的目标子区. 图 2 为被测物发生刚体旋转时的匹配示意图, 图 2a 为参考子区, 当参考子区旋转角度较小, 例如将图像旋转 8° 时(图 2b), 通过整像素搜索就可以找到较准确的位移初值. 当参考子区旋转角度较大, 例如将图像旋转 16° 时(图 2c), 变形前、后图像子区的相似度急剧下降, 以至于通过相关计算得到的相关系数矩阵没有明显的峰值(见图 3a), 因此求取位移初值失败.

通常, 在变形测量过程中会得到变形量不断增大的一系列图像, 以第 1 幅图像作为参考图像, 第 N 幅图像与参考图像的相似度较低, 但与第 $N-1$ 幅图像的相似度较高. 本文根据相邻状态变形的连续性, 提出了一种改进的整像素搜索方法, 与传统整像素搜索方法的不同处是, 该方法不再假设参考子区

的形状保持不变. 对于存在较大旋转(图像旋转 16°)的情况,见图 2d,利用相邻的前一状态(图像旋转 8°)的相关参数按照式(1)对参考子区进行变形计算,然后再通过在搜索区域内逐像素地移动变形后的参考子区,并进行相关计算,得到搜索区域内的相关系数矩阵,该矩阵会存在一个明显的峰值(见图 3b),因此搜索成功. 同理,该方法同样适用于拉伸大变形或者各种变形同时存在的情况.

上的距离,通过式(1)得到邻近点在变形图像上的位置初值,利用该中心点位置与其在参考图像上的中心位置相减作为 u,v 的初值,其余相关参数取与种子点相同的数值,以此作为 ILS 算法的初值对邻近点进行优化匹配. 当邻近点匹配成功后,又可以作为种子点为其他点提供相关参数的初值,如此不断向外扩散,直至所有的点匹配完毕,如图 4b 所示. 由于同一状态相邻点之间存在变形连续性,因此利用该方法不仅可以提供非常可靠的非线性优化初值,而且还因为种子点的数量较少,可使整像素搜索的计算量几乎可以忽略不计,因此具有较高的匹配效率.

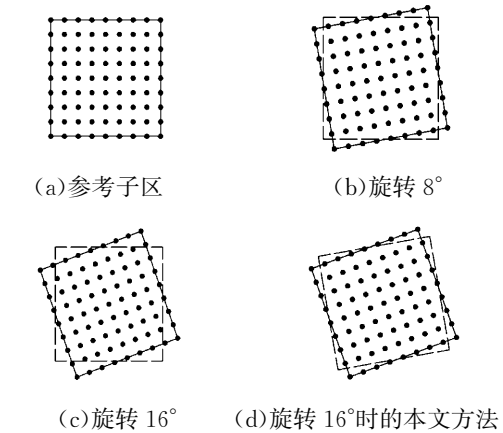
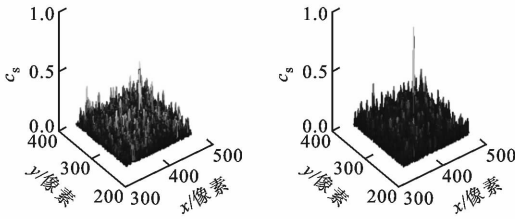


图 2 参考子区发生旋转时的整像素搜索示意图



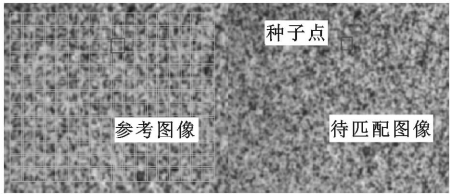
(a)整像素搜索方法 (b)改进的整像素搜索方法

图 3 搜索区域内的相关系数分布

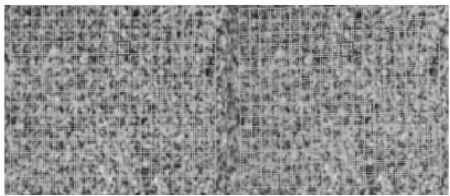
2.2 数字图像的种子点匹配方法

如图 4a 所示,在进行相关计算前,通常需要在参考图像中选取计算区域并划分图像子区. 整像素搜索计算量比较大,且该方法只考虑了位移参数的初值,得到的相关参数的初值精度较差,因此直接影响了后续 ILS 算法的收敛速度. 如果对于每一个待匹配点均使用整像素搜索方法来求取其相关参数的初值,则整个匹配过程的效率就会很低.

当计算区域划分完毕后,在参考图像上选取其中任一图像子区作为种子点,并先对种子点进行相关匹配,即采用改进的整像素搜索方法求取种子点的相关参数的初值,然后用 ILS 算法对其进行精确匹配. 改进的整像素搜索方法可保证种子点在较大旋转或大变形的情况下仍然可以匹配成功. 当种子点匹配完成后,利用相邻点变形的连续性,根据种子点的邻近点(上、下、左、右点)与种子点在参考图像



(a)种子点匹配成功



(b)所有的点匹配成功

图 4 利用种子点进行相关匹配的图像

3 实验及分析

用 2 个实验实例来验证本文方法的有效性,在计算过程中,划分的图像子区大小均为 15×15 像素,步长均为 13 像素.

3.1 刚体旋转实验

将参考图像(见图 5)围绕其中心逆时针依次旋转 8° 、 16° 、 24° 、 32° 和 40° ,共生成连续变形的 5 张图像,在参考图像上划分图像子区完毕后,选取任意一个图像子区作为种子点并对其进行匹配. 若采用传统的整像素搜索方法,只有旋转角为 8° 的图像才能匹配成功,其余 4 张图像均匹配失败,而利用改进的整像素搜索方法则所有 5 张图片的种子点均匹配成功. 在种子点匹配完成后,按照文中第 2.2 节的方法最终完成所有点的匹配,旋转角为 40° 的图像及其匹配结果见图 5b. 从计算得到的位移色谱图中可以看出,位移绕旋转中心呈环形分布,与预先施加的旋转变形场相符合.

由于施加的旋转量已知,因此所有点的理论位

移值均为已知. 从表 1 中可以看到, 所有 5 个变形状态的偏差分布基本一致, 说明与旋转角度的大小没有关系. 整个测量的最大偏差 $\delta_{\max}$ 约为 0.007 mm, 平均测量偏差 δ_a 为 0.002 mm, 具有较高的测量精度.

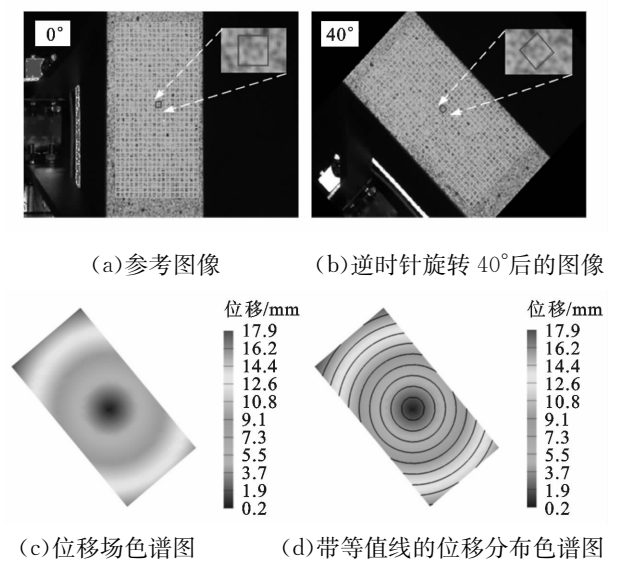


图 5 图像匹配结果及位移场色谱图

表 1 各个状态的位移测量偏差

旋转角 /(°)	测量 点数	$\delta_{\max}$ /mm	$\delta_{\min}$ /nm	δ_a /mm	标准差 /mm
8	630	0.007 4	72.145	0.002 0	0.001 1
16	630	0.006 4	41.374	0.002 3	0.001 2
24	630	0.006 8	1 982.200	0.002 7	0.001 2
32	630	0.006 4	41.374	0.002 0	0.001 1
40	630	0.007 8	2 027.200	0.003 2	0.001 3
平均值	630	0.007 0	0.001 110 1	0.002 4	0.001 2

3.2 单向拉伸实验

实验在瑞格尔公司制造的 RGM4100 型电子万能实验机上进行, 试件材料为 45 号钢, 试件的长为 152 mm、宽为 20 mm、厚度为 2 mm. 使用一个 CCD 摄像机(1 280×960 像素, 8 位)进行图像采集. 为了保证图像的清晰, 使用 LED 灯提供照明. 测量过程中, 同时用引伸计进行应变测量, 其最大应变量程为 50%, 应变测量精度为 0.5%.

在拉伸实验过程中, 设置拉伸速度为 10 mm/min, 像机采集速度为 1 帧/s, 共获得了 102 幅图像. 由于 45 号钢的韧性比较好, 因此在拉伸过程的最后时刻, 会出现颈缩现象, 颈缩处的变形会非常大, 而且会同时包含旋转和拉伸. 如图 6 所示, 在基础图像

(状态 1)上划分图像子区后, 选取其中一个作为种子点并进行匹配, 从状态 102 中可以看到该点的变形非常大, 若采用传统的整像素匹配, 则只有前 30 个状态可以匹配成功, 而采用改进的整像素匹配方法, 则 102 个状态可全部匹配成功.

三维重建后, 采用文献[10]提出的应变计算方法得到不同状态的主应变分布如图 7 所示. 在拉伸过程的前半部分, 试件各处的应变几乎为均匀应变, 但当试件发生颈缩时, 颈缩处的应变明显高于其他位置的应变, 状态在 102 颈缩处的最大主应变高达 113%.

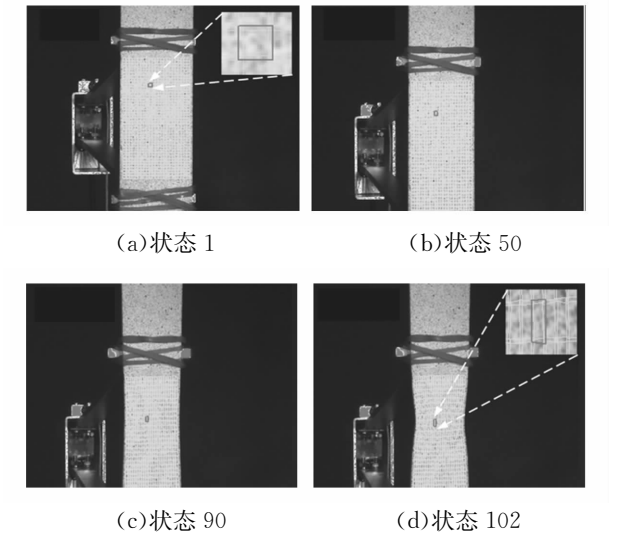


图 6 不同状态的图像及匹配结果

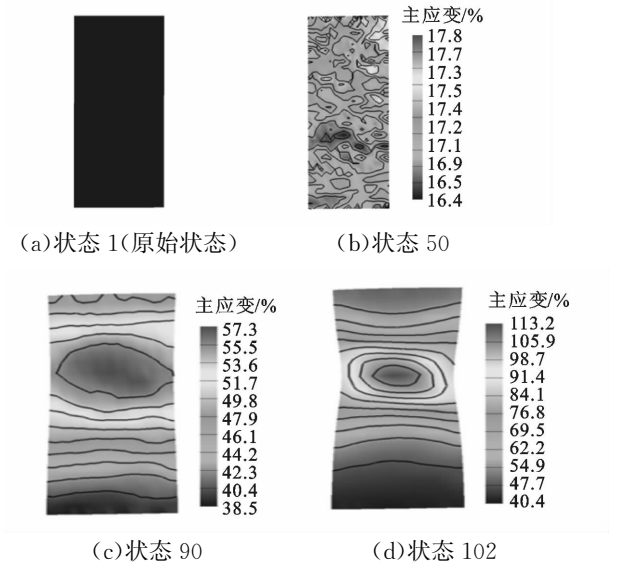


图 7 不同状态的主应变分布图

引伸计只能得到其标距内的平均应变, 而本文方法得到的是全场的应变分布, 为了便于对比, 取发生均匀应变的前 30 个状态与本文方法测得的全场

应变(取平均值)进行了对比. 如图 8 所示,本文方法与引伸计的测量结果曲线具有较高的一致性. 由表 2 可以看到,30 个状态中二者的最大偏差 $\sigma_{\max}$ 为 0.082,平均偏差 σ_a 约 0.053,证明本文方法具有较高的应变测量精度.

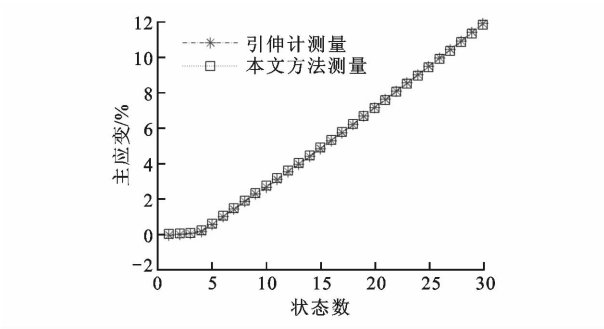


图 8 本文方法与引伸计测量结果的对比

表 2 本文方法与引伸计测量结果之间的偏差

状态数	$\sigma_{\max}/\%$	$\sigma_{\min}/\%$	$\sigma_a/\%$	标准差/ $\%$
30	0.082	0.008	0.053	0.018

4 结 论

针对数字图像相关方法在大变形测量中存在的问题,本文提出了一种数字图像的种子点匹配方法. 该方法利用系列变形图像相邻状态变形的连续性以及同一状态相邻点的变形连续性,不仅克服了传统的方法在较大刚体旋转或大变形情况下容易失效的问题,而且整个匹配过程不需要人工交互,因此具有较高的计算效率. 将本文方法应用于图像刚体旋转实验以及钢试件单向拉伸实验中,对于 40° 的图像旋转位移场和钢试件颈缩时产生的高达 113% 的大变形的测量结果均良好,具有较高的测量精度,因此证明了本文方法的有效性.

参考文献:

[1] SUTTON M A, MCNEIL S R, HELM J, et al. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision [J]. Photomechanics, 2000,77: 323-372.

[2] PAN Bing, QIAN Kemao, XIE Huimin, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. Measurement Science & Technology, 2009,20(6):17-33.

[3] TIWARI V, SUTTON M A, MCNEIL S R, et al. Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(6):862-874.

[4] PAN Bing, ASUNDI A, XIE Huimin, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009,47(7/8):865-874.

[5] 陈华, 叶东, 陈刚, 等. 遗传算法的数字图像相关搜索法 [J]. 光学精密工程, 2007(10):1633-1637.

CHEN Hua, YE Dong, CHEN Gang, et al. Digital image correlation search method based on genetic algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2007(10):1633-1637.

[6] 潘兵, 谢惠民. 基于差分进化的数字图像相关方法 [J]. 光电子激光, 2007,18(1):100-103.

PAN Bing, XIE Huimin. Digital image correlation method with differential evolution [J]. J Optoelectron Laser, 2007,18(1):100-103.

[7] ZHANG Zhifeng, KANG Yilan, WANG Huaiwen, et al. A novel coarse-fine search scheme for digital image correlation method [J]. Measurement, 2006, 39 (8): 710-718.

[8] 潘兵, 谢惠民, 夏勇, 等. 数字图像相关中基于可靠变形初值估计的大变形测量 [J]. 光学学报, 2009(2): 400-406.

PAN Bing, XIE Huimin, XIA Yong, et al. Large deformation measurement based on reliable initial guess in digital image correlation method [J]. Acta Optica Sinica, 2009(2):400-406.

[9] SCHREIER H W, BRAASCH J R, SUTTON M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation [J]. Optical Engineering, 2000, 39(11): 2915-2921.

[10] ORTEU J J. 3-D computer vision in experimental mechanics [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 47(3/4):282-291.

(编辑 管咏梅)