

文章编号: 1001-4888(2011)03-0247-07

基于数字图像体相关的物体内部三维位移场分析^{*}

牛永强^{1,2}, 胡秋实¹, 闫德莹², 刘贵全², 胡小方¹, 许峰¹, 缪泓¹, 张忠³

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学技术大学 计算机学院, 安徽合肥 230027; 3. 国家纳米科学中心, 北京 100080)

摘要: 在二维数字图像相关算法的基础上, 推导了三维数字图像体相关算法, 并应用于物体内部的三维位移场分析。用计算机模拟方法对 SR-CT 重建的物体内部三维图像施加已知变形, 对变形前后三维数字图像进行体相关运算, 获得三维位移场。在计算亚像素位移时, 本文提出了一种三维的基于灰度梯度的算法, 给出了梯度函数, 阐述了数字模拟三维体相关的计算过程, 通过数字模拟实验证明了算法的正确性和可靠性。

关键词: 数字图像相关; 三维数字图像体相关; 三维位移场; 灰度梯度算法

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

光测方法中的数字图像相关法^[1,2] DIC(Digital Image Correlation), 利用被测物体或试件表面的散斑或细节为标记, 通过相关运算, 可以计算物表面的位移场和变形场。目前该方法的应用大都是对被测物体表面进行检测, 属于二维的表面检测。同步辐射计算机重建技术(SR-CT), 可以获得物体在不同加载条件下的内部微结构演化三维图像, 并试图进一步利用这些重建图像来分析物体内部的演化规律和机理, 这样就使得如何从这些物质内部微结构重建图像中提取信息成为新的研究问题。因此, 探索如何计算物体内部结构的位移场和变形场有着重要的意义。

为了检测物体内部结构的三维位移场及变形场, 文献[3]讨论了数字图像三维相关法的思想和基本原理, 给出了三维相关法的计算窗口、相关函数, 并使用曲面拟合的方法计算了亚像素位移, 其位移精度为 0.02 像素。文献[4]中提到在二维数字图像相关的亚像素计算过程中, 基于梯度的算法精度最高, 求解效率最高。因此, 本文在计算三维亚像素位移时, 采用灰度梯度法, 计算精度达到 0.015 像素, 使得物体内部三维位移场测量更加精确。

1 三维数字图像体相关原理

1.1 三维体相关整像素搜索

与二维数字图像相关运算过程类似, 三维数字图像体相关同样分为整像素搜索和亚像素计算两个过程。不同的是, 前者是对被测物体变形前后的两幅二维数字图像进行相关运算, 而后者则是对被测物体变形前后的两个三维体图像进行体相关运算。因此, 在进行三维数字图像体相关运算时, 将计算模板设置为一正方体结构的窗口, 其大小为 $(2N+1) \times (2N+1) \times (2N+1)$, 中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 见图 1 所示。

^{*} 收稿日期: 2010-05-07; 修回日期: 2010-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(10772171, 10732080), 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB936803)

通讯作者: 缪泓(1968—), 男, 教授。主要从事光测力学、数字图像等领域的研究。E-mail: miaohong@ustc.edu.cn

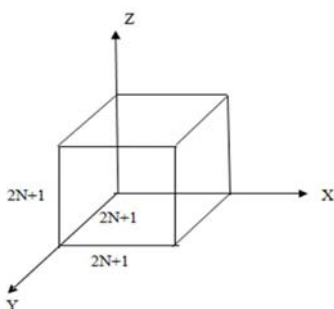


图 1 计算模板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation template

同时将相关函数扩展为如下形式^[3]:

$$C(u, v, w) = \frac{\sum_{x=-N}^N \sum_{y=-N}^N \sum_{z=-N}^N [f(x, y, z) - \bar{f}][g(x+u, y+v, z+w) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=-N}^N \sum_{y=-N}^N \sum_{z=-N}^N [f(x, y, z) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{x=-N}^N \sum_{y=-N}^N \sum_{z=-N}^N [g(x+u, y+v, z+w) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

$C(x, y, z)$ 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。式中 $f(x, y, z)$, $g(x+u, y+v, z+w)$ 分别为变形前后数字图像中各像素点灰度; $\bar{f}, \bar{g}$ 分别为计算窗口和目标搜索子区的平均灰度值; u, v, w 为模板中心的整像素位移。

确定好三维体相关计算模板和相关函数之后,在变形前的三维体图像中,取以 (x_0, y_0, z_0) 为中心的体计算窗口,在变形后的三维体图像中按照公式(1)进行搜索计算,寻找出与计算模板相关系数最大的以 (x'_0, y'_0, z'_0) 为中心的三维图像子区,以确定子区的整像素位移,即 $u = x'_0 - x_0$, $v = y'_0 - y_0$, $w = z'_0 - z_0$ 。此时得到的是整像素位移。

1.2 三维体相关亚像素运算

通过上一小节的三维整像素相关搜索,可以得到变形前以 (x_0, y_0, z_0) 为中心的三维图像子区 $f(x, y, z)$ 与变形后以 (x'_0, y'_0, z'_0) 为中心的三维图像子区 $g(x', y', z')$ 的整像素位移。下面开始计算三维图像子区的亚像素位移。

该算法的基本思想为: $f(x, y, z)$, $g(x', y', z')$ 分别表示变形前和变形后的子区图像。根据变形及数字图像基本假设,当图像子区足够小且物体做微小位移时,则该子区可看成做近似刚体运动,此时有:

$$f(x, y, z) = g(x', y', z') \quad (2)$$

这里:

$$x' = x + u + \Delta x, y' = y + v + \Delta y, z' = z + w + \Delta z \quad (3)$$

其中: u, v, w 分别为原图像中所求位移点的整像素位移; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为与 x, y, z 方向整像素位移对应的亚像素位移。

对于真实的微小位移 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, 应使下面的最小平方距离相关函数取驻值^[5,6]:

$$C(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \sum_{x=-N}^N \sum_{y=-N}^N \sum_{z=-N}^N [f(x, y, z) - g(x+u+\Delta x, y+v+\Delta y, z+w+\Delta z)]^2 \quad (4)$$

$$\text{即: } \frac{\partial C}{\partial(\Delta x)} = 0, \frac{\partial C}{\partial(\Delta y)} = 0, \frac{\partial C}{\partial(\Delta z)} = 0 \quad (5)$$

经推导可得:

$$\begin{bmatrix} \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \\ \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \\ \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) & \sum \sum \sum \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \sum \sum (f - g) \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \\ \sum \sum \sum (f - g) \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \\ \sum \sum \sum (f - g) \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

要计算上面这个式子,需要用到 $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}, \frac{\partial g}{\partial z}$ 这几个灰度梯度值,在此将二维相关亚像素计算的

Barron 算子^[7-10]拓展到三维：

$$\begin{cases} \frac{\partial g}{\partial x} = \frac{1}{12}g(x-2, y, z) - \frac{8}{12}g(x-1, y, z) + \frac{8}{12}g(x+1, y, z) - \frac{1}{12}g(x+2, y, z) \\ \frac{\partial g}{\partial y} = \frac{1}{12}g(x, y-2, z) - \frac{8}{12}g(x, y-1, z) + \frac{8}{12}g(x, y+1, z) - \frac{1}{12}g(x, y+2, z) \\ \frac{\partial g}{\partial z} = \frac{1}{12}g(x, y, z-2) - \frac{8}{12}g(x, y, z-1) + \frac{8}{12}g(x, y, z+1) - \frac{1}{12}g(x, y, z+2) \end{cases} \quad (7)$$

由公式(6)可得到三维相关的亚像素位移 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,将此结果与 1.1 节所得到的整像素位移结合可以得到物体的三维内部结构位移 (u', v', w') ,即 $u' = u + \Delta x, v' = v + \Delta y, w' = w + \Delta z$ 。

2 数字模拟实验

2.1 刚体平动

基于以上三维相关理论,本文进行了刚体位移、单向均匀拉伸、自重、纯扭转模拟实验来验证算法的可行性。实验变形前原图采用 SR-CT 技术重建获得的泡沫铝结构图像^[3],图像大小为 $244 \times 244 \times 188$ 像素(见图 2)。重建的变形前原图内部任一点的灰度值都是已知的,且灰度值的大小代表不同的物质,如图 2 中的灰度值为 255 时,其表示的物质为空气;灰度值为 0 时,其表示的是泡沫铝。正是这些分布在物体内部灰度值不等的物质构成了数字图像相关所必须的特征信息,使得它适用于本文所述的数字图像三维体相关法。变形后图像由计算机模拟插值生成,对模拟插值的图像在 z 方向做亚像素平移(本文所采用坐标系均同图 1 所示)。

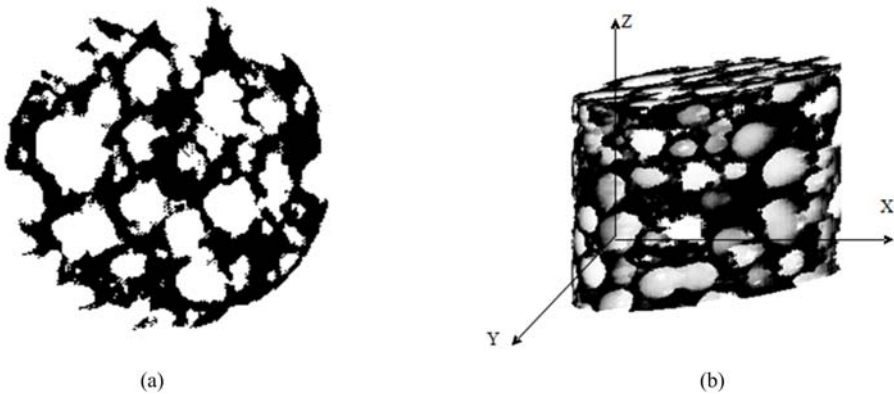


图 2 (a)泡沫铝的切片图 (b)由泡沫铝切片图重建的三维图像

Fig. 2 (a) Slice of aluminum foam (b) 3D image reconstructed from slices of aluminum foam

根据重建图像中气孔的尺寸,选用大小为 $31 \times 31 \times 31$ 像素的计算窗口,将插值过后的图像与原图做三维相关运算。在模拟计算过程中,分别沿 z 正方向插值平移 0.8, 1.1, 2.5, 3.2, 4.9 个像素。统计数据如表 1 所示。

表 1 三维相关模拟计算统计

Tab. 1 Computational statistics of 3D correlation simulation

刚体位移 (像素)	最大值 (像素)	最小值 (像素)	均值 (像素)	均值绝对 误差(像素)	相对误差	标准差
0.8	0.824	0.770	0.785	0.015	1.908%	0.005
1.1	1.113	1.087	1.095	0.005	0.493%	0.002
2.5	2.665	2.323	2.450	0.002	0.087%	0.155
3.2	3.250	3.200	3.215	0.015	0.479%	0.004
4.9	4.925	4.898	4.905	0.005	0.111%	0.002

由表 1 的数据分析可得,当三维体图像做平移之后与原图做三维相关运算,计算结果与实际平移量的大小是非常一致的,且计算结果与实际平移量的均值绝对误差最大约为 0.015 像素,这表明三维亚像素梯度法是正确可靠的,且精度较高,可以满足实际检测的需要。

2.2 单向拉伸

采用与 2.1 节同样的图像,对原始图像进行插值,模拟对物体在 z 轴正方向进行拉伸,其中模拟拉伸插值最大位移为 5.2 像素,计算窗口依然为 $31 \times 31 \times 31$ 像素,设置好计算边界之后, x, y, z 三个方向各五个计算子区。下面是从计算结果中选取的拉伸位移(表 2、表 3)以及位移矢量(图 3)。

表 2 $x=3$ 时 yz 切面 z 方向切面拉伸位移

Tab. 2 z -displacement of slice yz when $x=3$

列 行	1	2	3	4	5	理论值
5	4.405	4.353	4.462	4.384	4.451	4.287
4	3.796	3.487	3.59296	3.45625	3.432	3.430
3	2.575	2.609	2.5551	2.47423	2.642	2.570
2	1.720	1.695	1.64789	1.65273	1.641	1.715
1	0.887	0.831	0.849	0.801	0.825	0.857

表 3 $y=3$ 时 xz 切面 z 方向切面拉伸位移

Tab. 3 z -displacement of slice xz when $y=3$

列 行	1	2	3	4	5	理论值
5	4.405	4.387	4.462	4.465	4.602	4.287
4	3.511	3.519	3.593	3.449	3.438	3.430
3	2.521	2.694	2.555	2.582	2.478	2.570
2	1.713	1.694	1.648	1.880	1.813	1.715
1	0.720	0.826	0.849	0.764	0.824	0.857

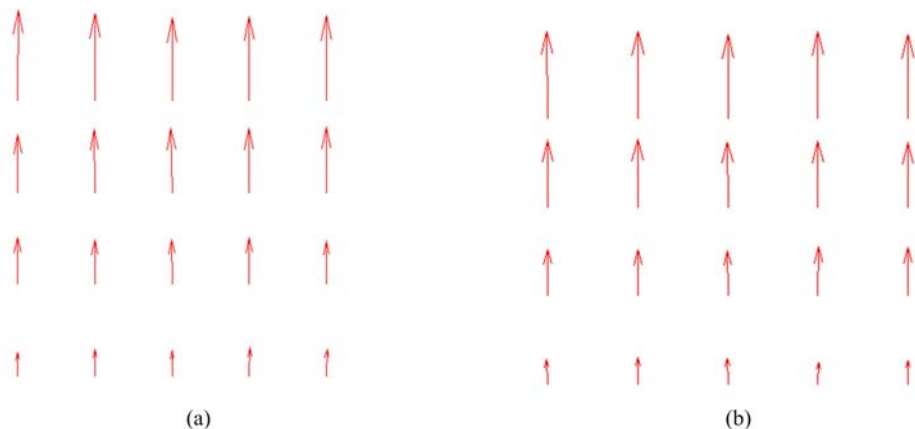


图 3 (a) $x=3$ 时 yz 切面 z 方向拉伸位移矢量图 (b) $y=3$ 时 xz 切面 z 方向拉伸位移矢量图

Fig. 3 (a) z -displacement vector of slice yz when $x=3$ (b) z -displacement vector of slice xz when $y=3$

2.3 柱体在自重影响下的变形

采用与 2.1 节同样的图像,模拟物体在自重下的变形。根据弹性力学理论,密度为 ρ ,弹性模量为 E ,泊松比为 ν 的柱体在自重影响下的三维位移场为:

$$\begin{cases} u = -\frac{\nu \rho g}{E} xz \\ v = -\frac{\nu \rho g}{E} yz \\ w = \frac{\rho g}{2E} [z^2 - L^2 + \nu(x^2 + y^2)] \end{cases} \quad (8)$$

根据(8)式,对原始图像进行插值,模拟物体在自重下的变形图(见图4)。对这些变形图进行三维相关计算,计算窗口依然为 $31 \times 31 \times 31$ 像素,设置好计算边界之后, x, y, z 三个方向各五个计算子区。图5是计算结果的位移矢量图。

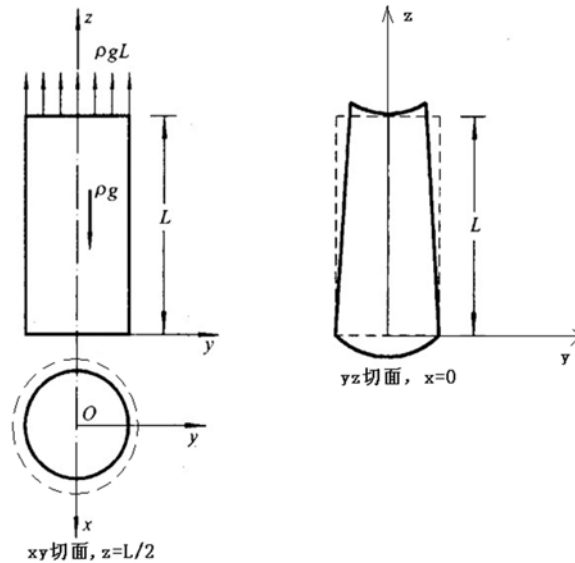


图4 物体在自重下的理论变形图

Fig. 4 Theoretical deformation diagram of self-weight of object

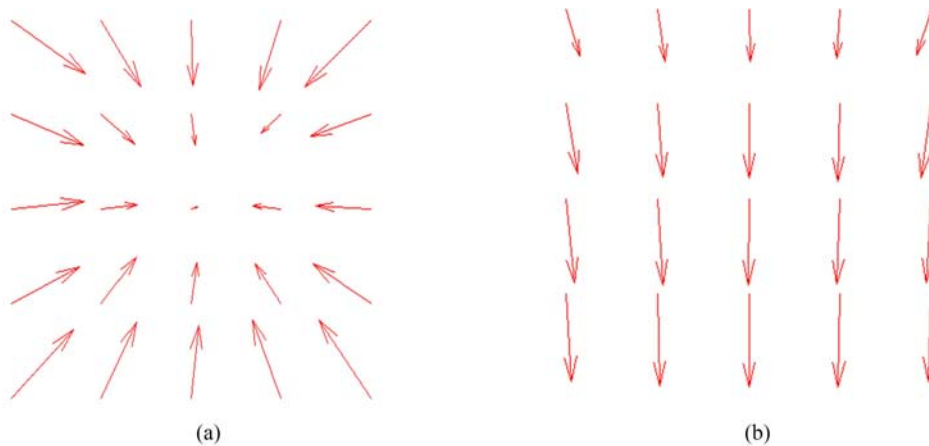


图5 (a) $z=L/2$ 时, xy 切面位移矢量图 (b) $x=0$ 时, yz 切面位移矢量图

Fig. 5 (a) Displacement vector of xy slice when $z=L/2$ (b) Displacement vector of yz slice when $x=0$

从图5的计算结果和图4的理论结果来看(图4中虚线代表变形前物体的位置,实线表示在自重影响下物体变形后的位置),两者符合较好。

2.4 柱体的扭转变形

采用与2.1节同样的图像,模拟物体的扭转变形。根据弹性力学理论,极惯性矩为 I_p ,剪切模量为 G 的物体在扭矩 M 影响下的三维位移场为:

$$\begin{cases} u = -ayz \\ v = axz \\ w = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $a = \frac{M}{GI_p}$ 。根据(9)式,对原始图像进行插值,模拟物体的扭转变形图(图 6)。对变形前后的三维体图进行三维相关计算,计算窗口依然为 $31 \times 31 \times 31$ 像素,设置好计算边界之后, x, y, z 三个方向各五个计算子区。图 7 是计算结果的位移矢量图。

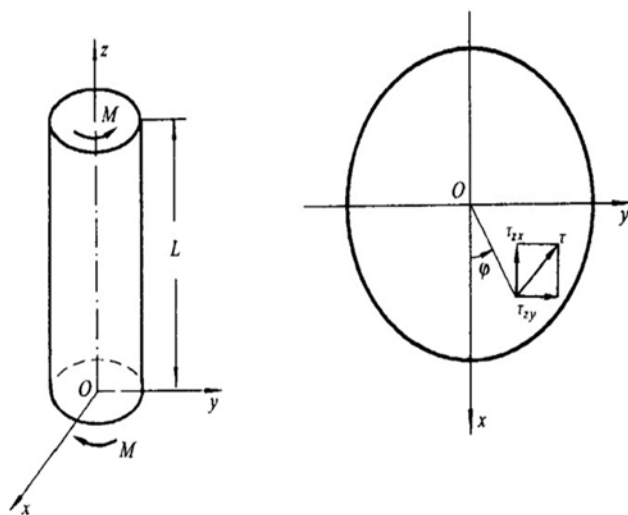


图 6 物体扭转示意图

Fig. 6 Reverse schematic diagram of object

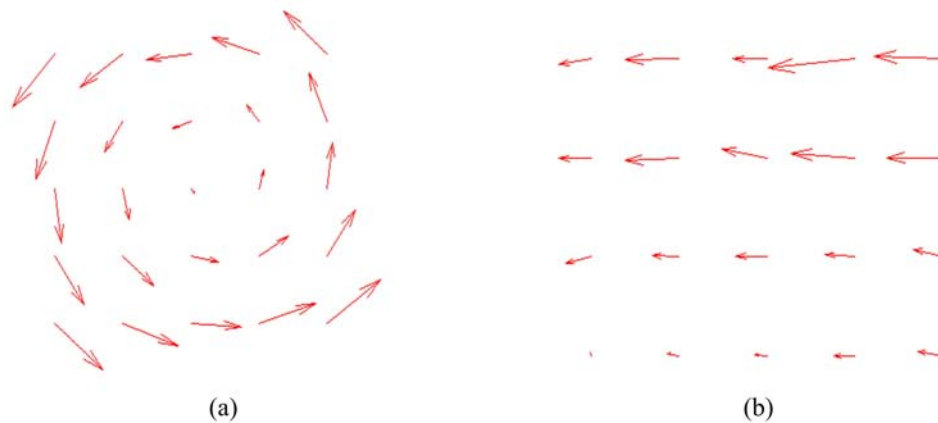


图 7 (a) $z=L/2$ 时, xy 切面位移矢量图 (b) $x=0$ 时, yz 切面位移矢量图

Fig. 7 (a) Displacement vector of xy slice when $z=L/2$ (b) Displacement vector of yz slice when $x=0$

3 结论

本文提出了一种新的三维亚像素计算方法,分析研究了三维体相关的整像素及亚像素算法,并对三维体相关运算方法进行了数字模拟计算,其结果证实了该亚像素计算方法的正确性和可靠性,说明本文提出的三维亚像素计算方法适用于物体内部结构三维位移及变形场的计算。然而,实验中所采用图像的质量,计算窗口大小的设置,以及亚像素求解算子的选择都会影响到三维体相关的计算结果,因此,如何解决这些问题将成为进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics(E), 1981, 14(5): 1270—1273.
- [2] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21: 427—431.
- [3] 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 (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(in Chinese))
- [4] 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 Precision Measurement and Motion Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002(in Chinese))
- [5] 潘兵, 续伯钦等. 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 (PAN Bin, XU Boqin, et al. Sub-pixel Registration Using Quadratic Surface Fitting in Digital Image Correlation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 128—134(in Chinese))
- [6] Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. Performance of optical flow techniques[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1): 43—77.
- [7] Davis C Q, Freeman D M. Statistics of subpixel registration algorithms based on spatiotemporal gradients or block matching[J]. Opt Eng, 1998, 37(4): 1290—1298.
- [8] Zhou P, Kenneth E, Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. Opt Eng, 2001, 40(8): 1613—1620.
- [9] Zhang J, Jin G C. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35: 533—542.
- [10] 潘兵, 续伯钦, 李克景. 梯度算子选择对基于梯度的亚像素位移算法的影响[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 26—31 (PAN Bin, XU Boqin, LI Kejing. Performance of gradient operators in algorithm of gradient-based subpixel registration[J]. Optical Technique, 2005, 31(1): 26—31(in Chinese))

Internal 3D Displacement Analysis using Digital Image Volumn Correlation Method

NIU Yong-qiang^{1,2}, HU Qiu-shi¹, YAN De-ying², LIU Gui-quan²,
HU Xiao-fang¹, XU Feng¹, MIAO Hong¹, ZHANG Zhong³

(1. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Department of Computer Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 3. National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100080, China)

Abstract: 3D digital image volumn correlation algorithm was improved based on traditional 2D DIC method, and applied to calculate the internal 3D displacement of an object. Original 3D image was a reconstructed image obtained from SR-CT experiment, and the deformed 3D images were computer simulated images subjected to known deformations. A special 3D sub-pixel algorithm based on gray-level gradient was proposed to determine the sub-pixel displacement, and the 3D gray-level gradient function was presented. The process of 3D DIVC is described in this paper, and the validity of the algorithm is verified.

Keywords: digital image correlation; 3D digital image volumn correlation; 3D displacement; gray-level gradient algorithm