

基于梯度的数字体图像相关方法测量物体内部变形

潘 兵¹ 吴大方¹ 谢惠民² 胡振兴²

(¹ 北京航空航天大学固体力学所, 北京 100191; ² 清华大学航空航天学院, 北京 100083)

摘要 数字体图像相关方法通过分析两幅以体素为单位的三维体图像获得物体内部的三维变形信息。在利用数字体图像相关方法测量物体内部变形的过程中, 整体素的位移场可以通过简单的空域搜索获得, 因此如何计算亚体素位移是提高该方法位移测量精度的关键。介绍了一种基于空间灰度梯度的亚体素位移测量算法, 并用计算机模拟生成的可精确控制位移的三维散斑体图像和真实的激光扫描共焦显微镜三维体图像测试了该算法的计算精度和计算效率。结果表明, 基于梯度的亚体素位移测量算法原理简单, 计算效率高, 可用于实际物体内部变形的高精度测量。

关键词 测量; 图像处理; 数字体图像相关; 亚体素; 位移; 变形

中图分类号 O348.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0612005

Spatial-Gradient-Based Digital Volume Correlation Technique for Internal Deformation Measurement

Pan Bing¹ Wu Dafang¹ Xie Huimin² Hu Zhenxing²

(¹ Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)
² School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract Digital volume correlation (DVC) measures the internal deformation of an object by analyzing two volumetric images in unit of voxel. In the practical implementation of DVC, integer-voxel displacement can be readily acquired by use of a simple searching scheme performed in spatial domain. How to achieve sub-voxel accuracy has been considered as the key to improve the accuracy of DVC measurements. A spatial-gradient based sub-voxel algorithm is proposed, and the principle of the algorithm is described in detail. The sub-voxel algorithm is investigated in terms of accuracy and computational efficiency using computer generated volume data and actual volume images recorded using laser scanning confocal microscope. Results show that the proposed algorithm can be used as a simple yet effective technique for accurate internal deformation measurement.

Key words measurement; image processing; digital volume correlation; sub-voxel; displacement; deformation

OCIS codes 120.0120; 120.3940; 100.2000; 100.4999

1 引 言

数字图像相关(DIC)方法最初由 Peters 等^[1]在 20 世纪 80 年代提出。与传统的基于相干光波干涉的光学测量方法不同, 该方法直接利用被测物体表面变形前后数字图像中细微的灰度变化来测量被测试件表面的位移和应变场。因具有非接触全场测量、实验设备和测量过程简单以及适用测量范围广

泛等优点, DIC 方法受到了普遍重视并在科学研究和工程技术的诸多领域得到广泛应用, 可以说是当前实验力学领域最活跃也最受欢迎的光测方法之一^[2]。

在过去的近 30 年里, DIC 方法得到了充分的研究, 在其测量精度、适用测量范围等许多方面得到不断改进和完善^[2~6]。例如, 使用一个摄像机的二维

收稿日期: 2010-11-12; 收到修改稿日期: 2011-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(11002012)、汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF10041)、高等学校博士学科点专项科研基金(20101102120015)、教育部留学回国人员科研启动基金和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 潘 兵(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光测力学方法和应用等方面的研究。

E-mail: panb04@mails.tsinghua.edu.cn

(2D)DIC方法仅可用于平面物体表面的面内变形测量。为了测量平面或曲面物体表面三维(3D)形貌和变形,Luo等^[7]提出了基于双目立体视觉原理的3D DIC方法。但无论是2D(或3D)数字图像方法都是依靠1个(或2个)摄像机拍摄的不同状态下的物体表面图像(或图像对)来提取物体表面的变形信息,而在通常情况下材料受载后其内部变形信息与其表面的变形信息有很大不同。因此,如何获得材料内部的真实变形情况就成为力学和材料研究领域许多学者都非常关心的问题。

关于物体内部变形测量的研究由B. K. Bay等^[8]在1999年率先开展。他们用显微计算机层析摄影(CT)重建了圆柱形松质骨试样变形前后的数字体图像,随后通过跟踪变形前后体图像中的相同点来计算各点的3D位移矢量,对位移矢量场进行差分获得3D应变场。他们称这种物体内部3D变形测量方法为数字体图像相关(DVC)方法。作为一种崭新和有效的物体内部变形测量手段,DVC方法在多孔材料(如松质骨^[8]、金属泡沫^[9]和木材^[10]等)、透明生物组织(如细胞^[11]等)的内部变形场测量和力学行为表征上都有着重要的应用。

DVC方法通过分析变形前后的3D体图像获得变形信息,体图像是以体素(voxel)为基本单位。在利用DVC方法测量物体内部变形的具体实现过程中,整体素的位移场可以很容易地通过简单的空域搜索获得(这与DIC方法类似)。但实际的位移值一般不恰好为体素,如何提高DVC方法的位移测量精度,成为是物体内部变形高精度测量中最关键的问题^[12]。已有的各种亚体素位移算法都需要通过迭代算法(如Gauss-Newton方法^[8])和3D空间

插值算法(如三元三次样条插值算法)相结合来实现,具体的编程实现相当复杂,而且计算非常耗时。由于DVC方法是采用一个3D立方体子体块代替DIC方法中的2D图像子区,计算区域也通常是3D立方体内的离散分布点。例如,在DIC方法中用 $(2M+1) \times (2M+1)$ 大小的图像子区计算 $K \times K$ 个点,在DVC方法中用 $(2M+1) \times (2M+1) \times (2M+1)$ 大小的立方体子块计算 $K \times K \times K$ 个点,DVC的计算量将是DIC的 $(2M+1) \times K$ 倍。如选择一个较小的子体块 $M=10$ 和一个较小的计算区域 $K=100$,则DVC方法的计算量是DIC方法的2100倍。由此可见,一种实现简单、计算效率和测量精度高的DVC方法对于该方法的发展和和使用而言非常重要。本文就此进行了研究,将2D DIC方法中基于梯度的亚像素位移算法^[13~17]推广到3D,实现了一种原理简单、计算效率高的基于空间灰度梯度的亚体素位移测量算法。该算法可直接计算亚体素位移,无需迭代计算和3D灰度插值。对计算机模拟生成的3D散斑图像对的计算显示,在无噪声的理想情况下用一个尺寸为 $21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel}$ 的子体块,该亚体素位移测量算法的精度优于 0.02 voxel 。

2 DVC方法中基于梯度的亚体素位移算法

2.1 DVC方法的基本原理

DVC方法处理的是体成像设备(如显微CT,激光扫描共焦显微镜等)所获得的同一物体内部在变形前后的两幅体图像,如图1所示。其中作为基准的变形前体图像通常称之为参考体图像,用 $f(x, y, z)$ 表

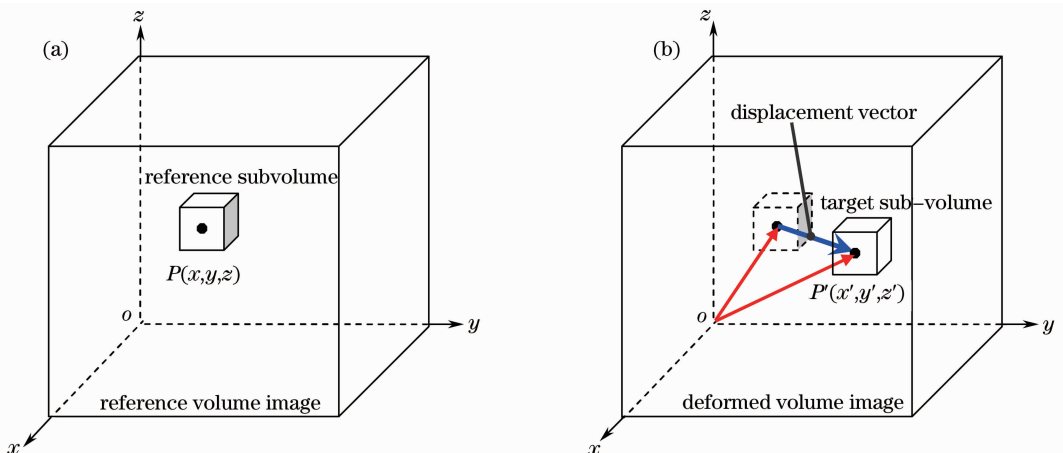


图1 DVC方法基本原理示意图

Fig. 1 Schematic of basic principle of DVC

示。变形后获得的体图像称为变形后(或目标)体图像,用 $g(x', y', z')$ 表示。DVC 方法通过精确跟踪参考体图像 $f(x, y, z)$ 内各离散点在变形后体图像中的位置来计算各点的 3D 位移矢量。在实际计算中,为准确跟踪某一点 $P(x, y, z)$ 的 3D 位移,需以该点为中心取一立方体小方块(sub-volume, 本文称之为子体块),通过跟踪参考图像中选定的参考子体块在变形后体图像中的精确位置 $P'(x', y', z')$ 来确定该

子体块中心点的位移分量 u, v, w 。

对于一个包括 $n=(2M+1) \times (2M+1) \times (2M+1)$ 体素的参考子体块,可通过在变形后体图像中逐体素移动位置,寻找与其灰度相似程度最大的目标子体块来确定其整体素位移 u_0, v_0, w_0 。变形前后子体块的相似程度可用常用的零均值归一化互相关函数(ZNCC)^[18]来定量评价:

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m][g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [f(x_i, y_i, z_i) - f_m]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) - g_m]^2}}, \quad (1)$$

式中 $f(x_i, y_i, z_i)$ 和 $g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0)$ 分别为变形前后的参考子体块中第 $i(i = 1, 2, \dots, n)$ 点的灰度, f_m, g_m 为参考和目标子体块的平均灰度值, u_0, v_0, w_0 为参考子体块中心点的位移。(1) 式所列的 ZNCC 函数对 $f(x_i, y_i, z_i)$ 和 $g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0)$ 的协方差进行了归一化处理,因此对目标子体块灰度的线性变化不敏感,具有很强的抗干扰能力。当参考子体块的灰度与目标子体块灰度有线性关系时, $C_{ZNCC} = 1$; 两者不相关时, $C_{ZNCC} = 0$ 。

由于数字体图像记录的是离散灰度信息,利用(1)式的相关函数来进行搜索时子体块的平移只能以体素为单位来进行,因此相关搜索获得的位移 u_0, v_0, w_0 只能是体素的整数倍,还需要通过其它方法来提高位移测量精度。

2.2 基于梯度的亚体素位移测量算法

在实际的变形测量中,当子体块尺寸足够小且物体做微小位移时,该子区可看成做近似刚体运动,且变形前后同一点的灰度保持不变,此时有

$$f(x_i, y_i, z_i) = g(x'_i, y'_i, z'_i), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} x'_i = x_i + u_0 + \Delta u \\ y'_i = y_i + v_0 + \Delta v \\ z'_i = z_i + w_0 + \Delta w \end{cases}, \quad (3)$$

式中 u_0, v_0, w_0 分别为已通过整体素相关搜索获得的参考子体块中心点的整体素位移, $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 分别为与 x, y, z 方向对应的亚体素位移。将(2)式对 $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 进行一阶泰勒展开并舍去高阶小量,可得

$$\begin{aligned} & g(x_i + u_0 + \Delta u, y_i + v_0 + \Delta v, z_i + w_0 + \Delta w) = \\ & g(x_i + u_0, y_i + v_0, z_i + w_0) + \\ & \Delta u \times g_{x_i} + \Delta v \times g_{y_i} + \Delta w \times g_{z_i}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $g_{x_i}, g_{y_i}, g_{z_i}$ 为图像点 $(x + u_0, y + v_0, z + w_0)$ 沿 x, y 和 z 方向的一阶灰度梯度。

真实的微小亚体素位移 $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 应使下面的最小平方距离相关函数(SSD)取驻值:

$$C_{SSD}(\Delta u, \Delta v, \Delta w) = \sum_{i=1}^n [f(x, y, z) - g(x + u_0 + \Delta u, y + v_0 + \Delta v, z + w_0 + \Delta w)]^2, \quad (5)$$

即

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{SSD}}{\partial(\Delta u)} &= 0, & \frac{\partial C_{SSD}}{\partial(\Delta v)} &= 0, \\ \frac{\partial C_{SSD}}{\partial(\Delta w)} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

整理可得

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y & \sum g_x g_z \\ \sum g_y g_x & \sum g_y^2 & \sum g_y g_z \\ \sum g_z g_x & \sum g_z g_y & \sum g_z^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum (f - g) g_x \\ \sum (f - g) g_y \\ \sum (f - g) g_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix}. \quad (8)$$

显然(7)式的矩阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 仅与各点的灰度和灰度梯度有关,由于体图像中各点的灰度为固定值,因此不同的灰度梯度算法对亚像素位移测量精度有重要影响。根据文献[17]的研究选择精度最高的 Barron 算子计算灰度梯度。对于图像坐标为 (x, y, z) 的点, Barron 算子计算灰度梯度的具体方法为

$$\begin{cases} g_x = \frac{1}{12}g(x-2,y,z) - \frac{8}{12}g(x-1,y,z) + \frac{8}{12}g(x+1,y,z) - \frac{1}{12}g(x+2,y,z) \\ g_y = \frac{1}{12}g(x,y-2,z) - \frac{8}{12}g(x,y-1,z) + \frac{8}{12}g(x,y+1,z) - \frac{1}{12}g(x,y+2,z), \\ g_z = \frac{1}{12}g(x,y,z-2) - \frac{8}{12}g(x,y,z-1) + \frac{8}{12}g(x,y,z+1) - \frac{1}{12}g(x,y,z+2) \end{cases} \quad (9)$$

3 计算机模拟实验验证

3.1 计算机仿真 3D 散斑体图像的生成

首先用可精确控制位移和应变的计算机仿真 3D 散斑体图像来验证本课题组提出的亚体素算法的计算精度和计算效率。仿真 3D 散斑体图像由多个位置随机的空间散斑颗粒的叠加形成,变形前后的仿真 3D 散斑体图像中各点的灰度值(假设为 8 bit 的灰度)可用如下的数学函数表示:

$$\begin{cases} I_r(x,y,z) = \text{int} \left\{ \sum_{k=1}^s I_k^0 \left[-\frac{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2 + (z-z_k)^2}{R^2} \right] \right\} \\ I_d(x,y,z) = \text{int} \left\{ \sum_{k=1}^s I_k^0 \left[-\frac{(x-x'_k)^2 + (y-y'_k)^2 + (z-z'_k)^2}{R^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (10)$$

式中 int 为取整函数, s 为空间散斑颗粒的数目, R 为空间散斑颗粒的大小, I_k^0 为第 k 个散斑颗粒中心的随机分布光强。3D 随机变量 (x_k, y_k, z_k) 是变形前第 k 个空间散斑颗粒的中心位置, (x'_k, y'_k, z'_k) 为变形后该散斑颗粒的中心位置。模拟过程中对参考体图像施加任意的平移、转动、拉压或剪切变形为

$$\begin{cases} x'_k = x_k + u + u_x x_k + u_y y_k + u_z z_k \\ y'_k = y_k + v + v_x x_k + v_y y_k + v_z z_k \\ z'_k = z_k + w + w_x x_k + w_y y_k + w_z z_k \end{cases}, \quad (11)$$

式中 u, v, w 为预先设定的 x, y 和 z 方向位移分量, $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$ 为预先设定的位移梯度分量。

下面用模拟刚体平移和单向拉伸实验来验证基于梯度的亚像素位移算法的性能。具体的模拟参数

如下:模拟散斑颗粒数目 $s=12000$,模拟散斑大小 $R=2$ pixel,散斑图像大小 $100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel}$ 。对于刚体平移实验,设定 x 方向的平移量为 $u=5.28 \text{ voxel}$, y 方向的平移量为 $v=1.89 \text{ voxel}$, z 方向的平移量为 $w=3.50 \text{ voxel}$,其它变形参数设为 0。利用 Matlab 程序生成的平移前后的 3D 散斑体图像如图 2 所示。对于模拟 z 方向单向拉伸实验,设定 $w_z=0.02$,其它参数为 0。设置较大的 z 方向位移梯度是为了能较直接地从图像中看出结果。将上述基于梯度的 DVC 算法用常用科学计算语言 Matlab 编制成图像分析处理软件。变形分析所用的计算机配置了 Intel Pentium 4 CPU 3.2 GHz 处理器,1 GB 内存,计算是在 Windows7 操作系统下完成的。需要说明的是,以下所给出的计算时间仅可做相对参

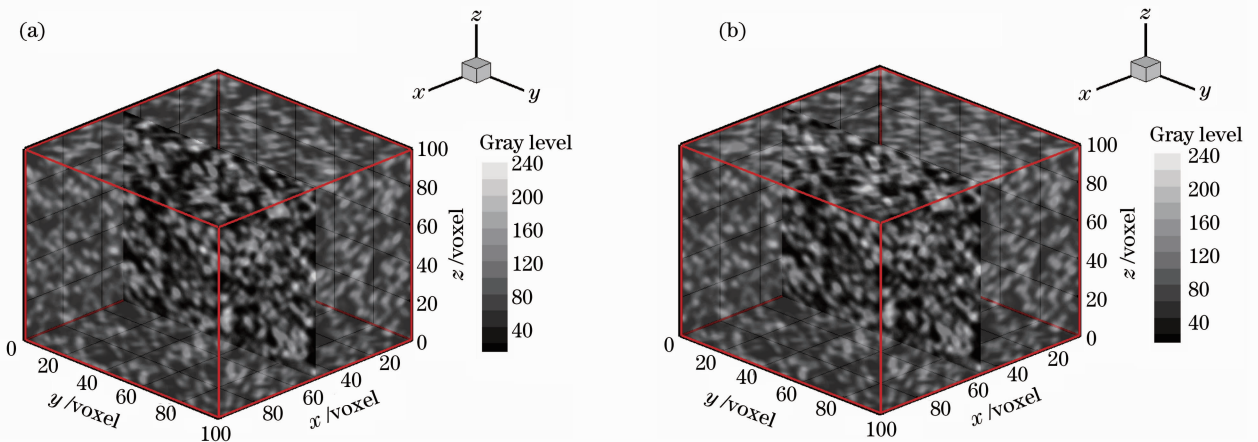


图 2 计算机模拟生成的 3D 散斑图。(a)参考体图像,(b)变形后体图像

Fig. 2 Computer-simulated 3D speckle patterns. (a) Reference volume image, (b) deformed volume image

考,因为实际计算时间取决于使用者的编程语言、编程效率和计算机性能等多种因素。

3.2 计算结果

3.2.1 平移模拟实验

利用基于梯度的亚体素位移测量算法编制的程序分析模拟刚体平移前后的两幅 3D 散斑体图像,可得到选定计算区域内各点的离散位移分量,如图 3 所示。为了研究子体块大小选择对位移测量精度和计算效率的影响,子体块大小分别选择为 $11 \text{ voxel} \times 11 \text{ voxel} \times 11 \text{ voxel}$, $21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel}$ 和 $31 \text{ voxel} \times 31 \text{ voxel} \times 31 \text{ voxel}$,计算区域为体图像内

表 1 不同大小子体块的计算精度和计算效率

Table 1 Calculation accuracy and computational efficiency for various sub-volumes

Sub-volume size/voxel	Mean bias error/voxel			Standard deviation/voxel			Average computation time /s
	x	y	z	x	y	z	
$11 \times 11 \times 11$	0.0055	0.0017	0.0009	0.0115	0.0117	0.0129	0.16
$21 \times 21 \times 21$	0.0048	0.0014	0.0019	0.0037	0.0036	0.0073	0.39
$31 \times 31 \times 31$	0.0043	0.0016	0.0036	0.0014	0.0016	0.0062	2.68

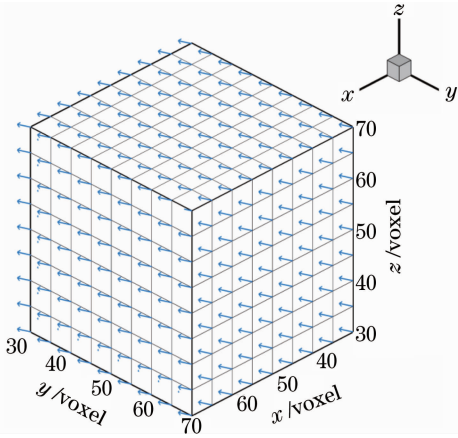


图 3 刚体平移模拟实验中各计算点的离散位移矢量

Fig. 3 Calculated discrete 3D displacement vector of each point for simulated rigid body translation

3.2.2 单向拉伸模拟实验

对于模拟 z 方向单向拉伸实验的两幅计算机模拟 3D 散斑体图像,用 $21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel}$ 计算了图像中间相同的区域,其计算的结果如图 4 所示。从其位移场的计算结果可以看出,其位移场沿 z 方向线性分布,变化范围从 0.6 voxel (对应 z 坐标为 30 voxel)到 1.4 voxel (对应 z 坐标为 70 voxel),这与预加的线性变形完全一致,最大误差小于 0.02 voxel ,进一步证实了本文方法的正确性和有效性。计算效率与前面的刚体平移实验相近,每一个点平均时间约为 0.39 s 。

一边长为 $40 \text{ voxel} \times 40 \text{ voxel} \times 40 \text{ voxel}$ 的立方体区域,相邻计算点间的距离为 5 voxel ,总共计算了 729 个点。表 1 给出了用 3 种不同大小的子体块计算位移的均值误差和标准差,同时给出了每个点所用的计算时间。可以看出,随着子体块尺寸的增加,计算精度有所提高,但每个点所需的计算时间也成倍增加。图 3 给出了用 $21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel} \times 21 \text{ voxel}$ 大小的子体块计算得到的计算区域表面各点的位移矢量,从该图可以更直观地看到本文方法的正确性和有效性。

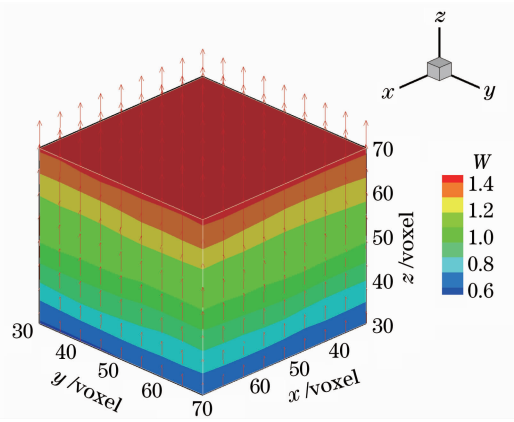


图 4 z 方向单向拉伸模拟实验计算结果

Fig. 4 Calculated results for simulated uniaxial tensile test in z direction

4 实验验证

本文还用真实实验来验证基于梯度的 DVC 方法的可行性。实验所采用的试样由无色透明的环氧树脂液体、固化剂和黑色碳粉搅拌均匀后放置在立方体模型中固化 24 h 而成,在环氧树脂中随机悬浮的碳粉微粒可作为 DVC 方法的变形信息载体。将试样放置在 Leica Tcs Sp5 共焦显微镜下的观察平台上扫描成像,其中 x, y 方向的扫描分辨率为 $512 \text{ voxel} \times 512 \text{ voxel}$,扫描的范围为 $775.0 \mu\text{m} \times 775.0 \mu\text{m}$ 。 z 方向扫描了 101 幅图片,扫描的整个范围约为 $100.7 \mu\text{m}$ 。在扫描完参考图之后,可利用该显微镜中

的自带功能,将 z 方向的扫描起点位置沿 z 轴正方向平移 $2.0\ \mu\text{m}$,这相当于将整个试件沿 z 轴负方向平移 $2\ \mu\text{m}$ 后再次扫描体图像。由激光共焦显微镜扫描得到的两幅体图像如图5所示,其3D体图片的大小为 $512\ \text{voxel}\times 512\ \text{voxel}\times 101\ \text{voxel}$ 。选择的体图像内部的计算区域为 $[200,300]\times [200,300]\times [20,80]$,选择的子区的大小为 $31\ \text{voxel}\times 31\ \text{voxel}\times 31\ \text{voxel}$,各

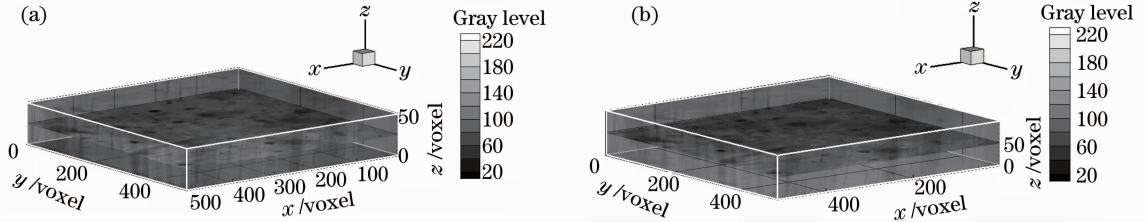


图5 (a)参考体图像,(b)平移体图像

Fig. 5 (a) Reference volume image, (b) deformed volume image

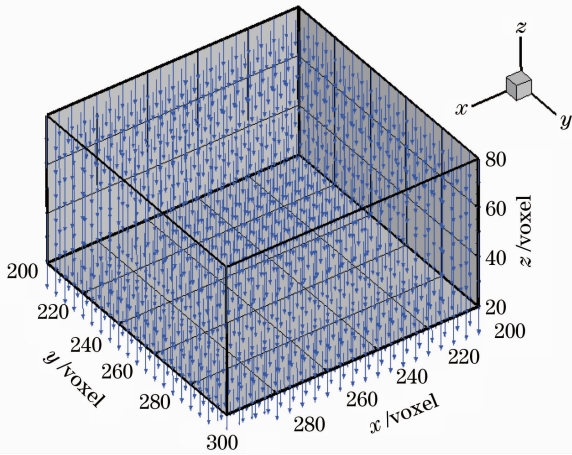


图6 真实实验计算结果

Fig. 6 Calculated result of a practical experiment

5 结 论

介绍了一种基于灰度梯度的DVC方法用于物体内部变形的高精度测量。该亚体素位移测量算法的基本原理简单、计算效率高,测量结果仅与图像内部各点的灰度梯度有关,无需3D灰度插值和迭代计算。对无噪声的计算机仿真3D散斑体图像的分析显示,利用大小为 $21\ \text{voxel}\times 21\ \text{voxel}\times 21\ \text{voxel}$ 的子体块,该亚体素位移测量算法的精度优于 $0.02\ \text{voxel}$ 。该方法可与显微CT、激光共焦显微镜等高分辨率的体成像设备结合用于实际多孔固体材料和细胞等生物体在外力作用下的内部3D变形场的高精度定量测量。

参 考 文 献

1 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital imaging techniques in

计算点的位移矢量如图6所示。 x, y 和 z 三个方向位移分量计算结果的均值分别为 $-0.0856, -0.1012$ 和 $-1.9920\ \text{voxel}$,换算成实际的位移量分别为 $-0.1296, -0.1532$ 和 $-1.9861\ \mu\text{m}$ 。显然,各方向所测量的位移量与实际位移量相符,证明本文所介绍的DVC方法可用于真实固体材料内部的变形测量。

- experimental stress-analysis [J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~431
- 2 B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measure. Sci. & Technol.*, 2009, **20**(6): 062001
- 3 Pan Bing, Xie Huimin, Dai Fulong. An investigation of subpixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Chinese J. Theoret & Appl. Mech.*, 2007, **29**(2): 245~252
- 潘 兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关方法中的亚像素位移测量算法研究 [J]. *力学学报*, 2007, **29**(2): 245~252
- 4 Pan Bing, Xie Huimin, Li Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. *J. Exp. Mech.*, 2007, **22**(6): 556~567
- 潘 兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法 [J]. *实验力学*, 2007, **22**(6): 556~567
- 5 Wang Wei, He Xiaoyuan. Application of optical extensometer on the real-strain measurement of low-dimensional materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1662~1666
- 王 伟, 何小元. 光学引伸计在低维材料实时应变测量中的应用 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1662~1666
- 6 Pan Bing, Wu Dafang. High-temperature digital image correlation based on optical band-pass filter imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0212001
- 潘 兵, 吴大方. 基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0212001
- 7 P. Luo, Y. Chao, M. A. Sutton *et al.*. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision [J]. *Exp. Mech.*, 1993, **33**(2): 123~132
- 8 B. K. Bay, T. S. Smith, D. P. Fyhrie *et al.*. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography [J]. *Exp. Mech.*, 1999, **39**(3): 217~226
- 9 S. Roux, F. Hild, P. Viot *et al.*. Three-dimensional image correlation from X-ray computed tomography of solid foam [J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2008, **39**(8): 1253~1265
- 10 F. Forsberg, R. Mooser, M. Arnold *et al.*. 3D micro-scale deformations of wood in bending: synchrotron radiation mu CT data analyzed with digital volume correlation [J]. *J. Structural Biology*, 2008, **164**(3): 255~262
- 11 C. Franck, S. Hong, S. A. Maskarinec *et al.*. Three-dimensional full-field measurements of large deformations in soft

- materials using confocal microscopy and digital volume correlation [J]. *Exp. Mech.*, 2007, **47**(3): 427~438
- 12 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
汪 敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的三维数字图像相关方法 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5135~5139
- 13 C. G. Davis, D. M. Freeman. Statistics of subpixel registration algorithms based on spatiotemporal gradients or block matching [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(4): 1290~1298
- 14 P. Zhou, K. E. Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(8): 1613~1620
- 15 J. Zhang, G. C. Jin. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2003, **35**(7): 533~542
- 16 Pan Bing, Xu Boqin, Xie Huimin *et al.*. In-plane displacement measurement by gradient-based digital image correlation [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 643~647
潘 兵, 续伯钦, 谢惠民等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法 [J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 643~647
- 17 Pan Bing, Xu Boqin, Li Kejin. Performance of gradient operators in algorithm of gradient-based subpixel registration [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1): 26~31
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
- 18 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on local least-square fitting for digital image correlation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1980~1986
潘 兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1980~1986