

# 高斯预滤波对数字体图像相关测量的影响

邹翔<sup>1</sup>, 潘兵<sup>1\*</sup>, 王延珺<sup>2</sup>, 刘晨<sup>2</sup>, 许蔚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100191;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;

<sup>3</sup>昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 图像噪声会严重影响数字体图像相关(DVC)方法的测量精度,因此,通过数值模拟平移实验、真实重扫描实验和压缩实验研究了图像噪声及高斯预滤波对 DVC 位移测量结果的影响。实验结果表明,高斯预滤波能显著降低图像的噪声水平,从而减小由噪声引起的系统误差,但对插值误差的影响较小,原因是高斯预滤波会降低图像的灰度梯度。因此,高斯预滤波可以显著提高经典前向累加牛顿-拉弗森算法的精度,但对反向组合高斯-牛顿算法的精度影响不大。此外,高斯预滤波处理可提升 2 种算法中各计算点的相关系数,得到匹配度更高的子体块。

**关键词** 图像处理; 数字体图像相关方法; 图像噪声; 高斯预滤波; 位移测量

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1512002

## Effect of Gaussian Prefiltering on Digital Volume Correlation Measurement

Zou Xiang<sup>1</sup>, Pan Bing<sup>1\*</sup>, Wang Yanjun<sup>2</sup>, Liu Chen<sup>2</sup>, Xu Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup>Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;

<sup>3</sup>School of Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** Image noise will seriously affect the measurement accuracy of the digital volume correlation (DVC) method. Therefore, this paper studies the effect of image noise and Gaussian prefiltering on the DVC displacements measurement results through numerical simulation translation experiments, real rescan and compression experiments. The experimental results show that, Gaussian prefiltering can significantly reduce the noise level of the images, and thus mitigates the noise-induced bias error, but has little effect on the interpolation error. The reason is that the Gaussian prefiltering will reduce the gray gradient of the image. Therefore, Gaussian prefiltering can significantly improve the accuracy of the classic forward additive Newton-Raphson algorithm. But it has little effect on the accuracy of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm. Further, the Gaussian prefiltering is used to reduce image noise, which can improve the correlation coefficient of each calculation point in the 2 algorithms, and obtain a sub-volume with a higher degree of matching.

**Key words** image processing; digital volume correlation method; image noise; Gaussian prefiltering; displacement measurement

**OCIS codes** 100.2000; 030.4280; 100.4997

## 1 引言

数字体图像相关(DVC)方法是数字图像相关(DIC)方法在三维(3D)体图像上的拓展。通过分析

先进体成像设备获取的试样在不同状态下的数字体图像,DVC可测量不透明固体材料和半透明生物材料内部的 3D 全场变形<sup>[1]</sup>。DVC 方法的基本原理是在试样变形前的体图像中围绕感兴趣的体素点(计

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-20; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(11925202,11872009,11762009)、北京航空航天大学博士研究生卓越学术基金

通信作者: \*panb@buaa.edu.cn

算点)选择一个立方体区域(参考图像子体块),通过准确跟踪参考图像子体块在变形后体图像中的位置获得各计算点的 3D 位移矢量,再对 3D 位移场进行数值差分,计算得到 3D 应变场信息<sup>[2]</sup>。数字体图像的获取是整个 DVC 分析的基础,为了获得高质量的体图像,人们根据测量对象的物理和光学性质,尝试将多种不同的体成像设备,如 X 射线计算机断层扫描(CT)<sup>[3]</sup>、核磁共振成像<sup>[4]</sup>、激光共聚焦显微镜<sup>[5]</sup>、光学相干断层成像<sup>[6]</sup>和 DVC 结合用于物体内部位移和应变的测量。这种方法具有扫描速度快、成像分辨率可调范围大、适用材料类型广等优势,因此,在 X 射线 CT(包括工业 CT、显微 CT、同步辐射 CT)领域中得到了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>。

X 射线 CT 图像是由一系列体现 X 射线吸收程度的黑白像素构成的灰度图,像素值越小,表明吸收程度越低;像素值越大,表明吸收程度越高。在获取 CT 图像的过程中,图像噪声是影响图像质量的重要因素。已有研究表明,CT 图像噪声是由多种综合因素产生的,其与机械装置机电噪声、模拟电路和数字电路参数的变化、模数转换过程中的量子化噪声、CT 图像的重建算法、层厚、扫描时长及 X 射线球管的剂量、性能等因素相关<sup>[9]</sup>。为了降低 CT 图像的噪声,人们提出了多种噪声抑制策略,这些策略大致可分为投影域噪声抑制策略、统计迭代重建策略以及图像域噪声抑制策略。其中,图像域噪声抑制策略不依赖于投影数据,直接对现有 CT 图像进行去噪处理,不用改进或更换现有设备,且当前大部分商用 CT 扫描设备仅提供重建后的体图像数据,因此,该方法具有较强的移植性。在众多图像域噪声抑制方法中,高斯预滤波以其适用范围广、计算效率高等优点在多个领域中得到了广泛应用<sup>[10-13]</sup>。

利用 DVC 方法测量物体内部变形时一般需要两个步骤,即整体素位移搜索或初值估计和亚体素位移测量<sup>[14]</sup>。对于任意一个计算点,首先,通过简单的整体素搜索(种子点)或变形初值传递策略(非种子点)<sup>[15]</sup>快速确定其位移估计值。然后,用亚体素配准算法获得具有亚体素精度的位移测量结果,进一步提高测量精度,该过程也是提高 DVC 测量精度的关键。在亚体素位移算法中,前向累加牛顿-拉弗森(FA-NR)算法<sup>[4]</sup>和反向组合高斯-牛顿(IC-GN)算法<sup>[16]</sup>具有计算精度高、计算效率高等优点,得到了广泛应用。FA-NR 算法最早由 Bay<sup>[17]</sup>应用于松质骨内部变形场的测量,是 DVC 领域应用最广泛的一种亚体素匹配算法。IC-GN 算法是 Pan

等<sup>[16]</sup>提出的新一代亚像(体)素配准算法。相比经典的 FA-NR 算法,IC-GN 算法具有更高的计算效率和更强的抗噪性能,被认为是 DIC/DVC 中的标准算法。此外,在亚体素配准算法迭代优化计算过程中,还需对图像的亚体素位置进行灰度插值处理,因此,插值方法的选择也会影响 DVC 的测量精度。早期的 DVC 方法中多采用简单的三次插值(Cubic interpolation)方法<sup>[17]</sup>,近年来 DVC 方法则多采用计算精度更高、内存消耗更少的三次 B 样条插值(Cubic B-spline interpolation)方法<sup>[16]</sup>。

已有研究表明<sup>[18]</sup>,图像噪声(主要指高斯噪声)会显著降低 DIC 位移测量的精度。为了降低图像噪声对 DIC 位移测量的影响,Pan<sup>[19]</sup>提出在 DIC 计算前对散斑图像进行高斯低通预滤波处理,以抑制图像噪声,并通过仿真和实验验证了该方法的准确性和有效性。但高斯预滤波也会导致图像细节丢失,从而降低图像的灰度梯度,且不同的亚体素配准算法和插值方法也会影响滤波效果。因此,需对高斯低通预滤波在 DVC 方法中的必要性和有效性进行细致的研究。

针对上述问题,本文系统地研究了体图像高斯低通预滤波对 DVC 位移测量结果的影响。首先,对 X 射线 CT 体成像设备获得的不同材料的噪声水平进行了评估;然后,通过模拟平移实验研究了高斯滤波对不同噪声水平下 DVC 测量结果的影响;最后,通过颗粒增强树脂材料的重扫描实验和高聚物材料的压缩实验分析了实际条件下高斯滤波的效果。需要说明的是,由于实际应用中高斯噪声是常见的 CT 图像噪声类型,主要来自 CT 设备电子元器件受电流电压影响时电子随机热运动产生的电子噪声,而其他类型的噪声,如机械噪声与实验设备有关,因此,在模拟实验中主要围绕高斯噪声这一类型进行分析。

## 2 体图像噪声的预测与高斯滤波去噪

对 CT 图像噪声水平的准确估计是进行噪声消除的基础。为了准确估计 X 射线 CT 获得的试样体图像中的噪声水平,选用基于滤波的拉普拉斯变换图像噪声估计方法<sup>[20]</sup>。该方法的原理是在估计噪声水平之前,先对噪声图像进行平滑处理,即用低通滤波器滤除图像噪声,从而抑制图像结构,然后利用噪声图像和滤波后的图像灰度差估计噪声标准差。具体计算步骤:1)通过拉普拉斯算子 $[1, -2, 1]$ 在三个方向上对原始图像  $I_0$  进行一维卷积,以抑制图像结构,得到图像  $I_1$ ;2)对处理后的图像  $I_1$  取均值,

以估计图像的噪声标准差,可表示为

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{6\sqrt{6}(H_1-2)(H_2-2)(H_3-2)} \sum |I_1|, \quad (1)$$

式中,  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  分别为体图像在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的尺寸。

为了验证该图像噪声估计方法的有效性,选取一张尺寸为  $100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel}$  的无

噪声体图像(256 位),如图 1(a)所示。首先,在原始图像中依次加入均值为 0, 灰度标准差为 1~10(增量为 1)的高斯白噪声;然后,采用基于拉普拉斯变换的图像噪声估计方法估计图像噪声。图 1(b)为噪声标准差的估计值和设定值的对比情况及两者的差值,可以发现,图像灰度噪声预测误差的最大值为 0.43,这表明采用的噪声水平估计方法精度较高。

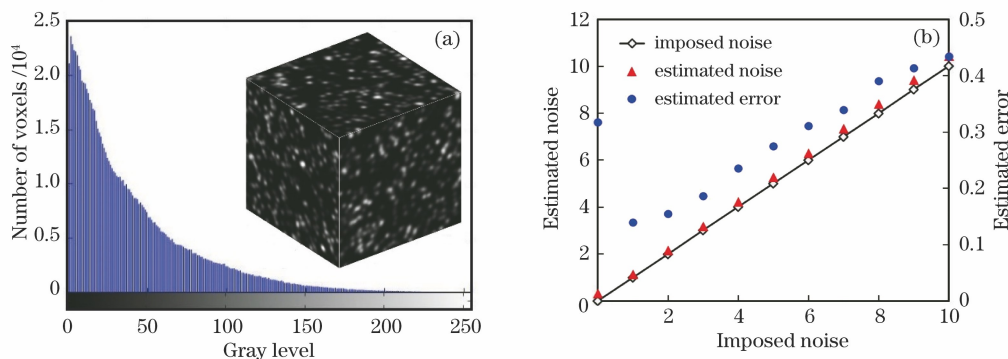


图 1 体图像噪声的标准差预测。(a)模拟的 3D 散斑图及其灰度直方图;(b)噪声预测值及其误差

Fig. 1 Standard deviation prediction of the volume image noise. (a) Simulated 3D speckle image and its gray scale histogram; (b) noise prediction value and its error

由于不同试样的材料密度不同,因此在同一 X 射线 CT 装置下获得的体图像噪声水平也存在差异。为了分析 X 射线 CT 装置获得的不同材料体图像的噪声水平,选取了三种不同材料(颗粒增强树脂材料、气凝胶材料和竹材)试件进行研究。实验设备为 X 射线 CT 系统(YXLON CT modular, 德国),如图 2(a)所示。图 2(b)为三种试样体图像的噪声标准差,图 2(c)为三种试样的实物图及其 CT 切片图。可以发现,颗粒增强树脂材料、气凝胶材料和竹材体图像的噪声标准差均较大,分

别为 6.08、7.85 和 7.39。从经高斯滤波(滤波器尺寸为  $5 \times 5 \times 5$ , 标准差  $\sigma$  为 1)后的体图像噪声标准差预测值可以发现,滤波后各体图像的噪声标准差均有大幅下降,这表明高斯滤波具有良好的图像降噪效果。

### 3 体图像高斯滤波对 DVC 测量的影响

#### 3.1 体图像噪声对 DVC 测量的影响

DVC 的位移测量误差可分为系统误差和随机误差。系统误差按误差来源可分为形函数欠匹配误

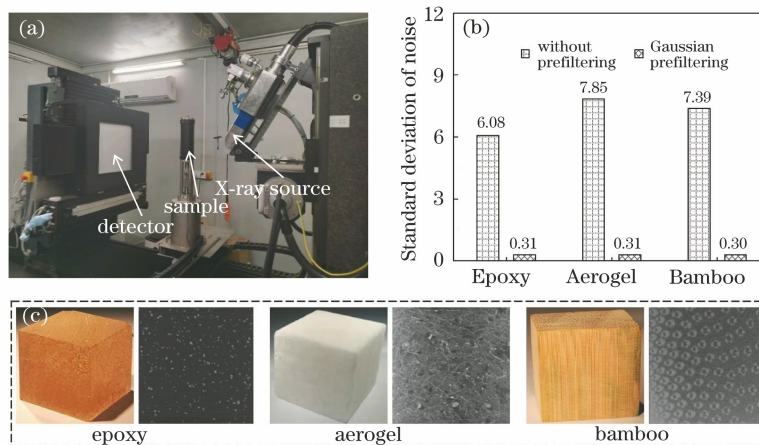


图 2 CT 体图像噪声的预测。(a)实验设备;(b)滤波前后体图像噪声的标准差;(c)试件实物图及其 CT 切片图

Fig. 2 Prediction of the CT volume image noise. (a) Experimental equipment; (b) standard deviation of the volume image noise before and after filtering; (c) physical image of the specimen and its CT slice image



差、插值误差和噪声引起的系统误差<sup>[21]</sup>。形函数欠匹配误差与试样的局部变形相关,受图像噪声的影响较小,因此实验主要研究了噪声对位移测量结果插值误差、噪声引起的系统误差及随机误差的影响。为了排除实际 X 射线 CT 成像过程中其他误差因素的干扰,首先,采用数值模拟平移实验分析了不同噪声水平下位移测量结果的变化情况。在模拟实验中,参考体图像  $I_r(x, y, z)$  和变形体图像  $I_d(x, y, z)$  可分别用函数表示为<sup>[2]</sup>

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

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,  $(x_k, y_k, z_k)$  为变形前第  $k$  个空间散斑颗粒的中心位置,  $(x'_k, y'_k, z'_k)$  为变形后该空间散斑颗粒的中心位置。进行模拟刚体平移实验时,沿  $x$  方向的平移量  $u = 0.3$  voxel, 其他模拟参数:  $s = 12000$ 、 $R = 3$  voxel, 图像的尺寸为  $100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel} \times 100 \text{ voxel}$ 。在获得的参考体图像和变形体图像中依次加入均值为 0, 标准差为 0.2% (灰

度值为 5.1)、4% (灰度值为 10.2) 的高斯白噪声。

为研究采用不同亚体素算法和插值方法情况下高斯预滤波的效果,在 DVC 计算时选用了 3 种不同的组合:方法 1 为 FA-NR+三次插值(FA-NR+cubic);方法 2 为 IC-GN+三次插值(IC-GN+cubic);方法 3 为 IC-GN+三次 B 样条插值(IC-GN+B-spline)。形函数均采用一阶形函数,子体块尺寸为  $31 \text{ voxel} \times 31 \text{ voxel} \times 31 \text{ voxel}$ , 计算步长为 10 voxel。为了评价位移测量结果的精度,采用位移测量结果的均值误差 (MBE)、标准差 (SD) 和均方根误差 (RMSE) 分析位移测量结果的精度,可表示为

$$\begin{aligned} X_{\text{MBE}} &= u_{\text{mean}} - u_{\text{imp}} \\ X_{\text{SD}} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_{\text{mean}} - u_i)^2}, \\ R_{\text{MSE}} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_{\text{imp}} - u_i)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $u_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$  为  $N$  个计算点的位移 ( $u_i$ ) 均值,  $u_{\text{imp}}$  为位移设定值。

已有研究表明, IC-GN 算法可采用 Barron 算子消除噪声引起的系统误差,而 FA-NR 算法无法消除该误差<sup>[22]</sup>。因此,方法 1 测量结果中的系统误差既有插值误差也有噪声引起的系统误差,而方法 2 和方法 3 中只有插值误差。图 3 为滤波前不同噪声水平下位移测量结果的变化情况,由图 3(a)可知,当

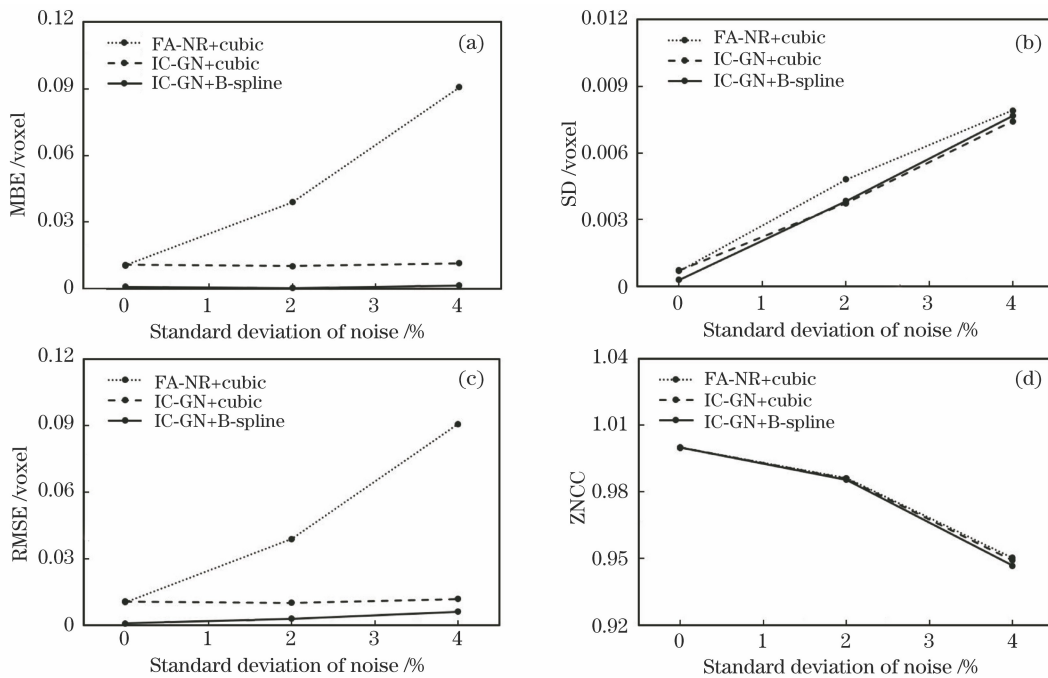


图 3 滤波前图像的噪声分析。(a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

Fig. 3 Noise analysis of the image before filtering. (a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

图像不包含噪声时,系统误差只有插值误差,方法 1 和方法 2 的均值误差相同,且远大于采用三次 B 样条插值的方法 3。随着噪声的增加,方法 2 和方法 3 的均值误差没有太大变化,这表明采用 IC-GN 算法时图像噪声对插值误差的影响较小。此外,方法 1 的均值误差随噪声的增大线性增加,这表明采用 FA-NR 算法时噪声引起的系统误差与噪声水平正相关。由图 3(b)可知,3 种方法的位移测量结果标准差基本相同,且随着噪声的增加呈线性增加,这表明噪声水平是影响 DVC 测量结果随机误差的主要因素,亚体素配准算法和插值方法的选择对其影响较小。图 3(c)为 3 种方法总误差(RMSE)的变化情况,可以发现,方法 1 和方法 2 中的均值误差远大于标准差,其总误差变化趋势与均值误差基本一致,而

方法 3 的总误差随噪声的增加略有增加,但幅度较小。图 3(d)为 3 种方法计算结果的零均值归一化互相关(ZNCC)系数均值随噪声的变化情况,可以发现,随着噪声的增加,3 种方法计算结果的 ZNCC 系数均值均呈急速下降趋势。

### 3.2 高斯预滤波对 DVC 测量的影响

由上述分析可知,高斯预滤波能显著降低体图像的噪声水平,但也会导致体图像模糊。为了研究高斯预滤波对 DVC 测量结果的影响,对比了模拟平移实验在滤波前后的测量结果。本课题组前期的研究结果表明<sup>[21]</sup>,滤波器尺寸为  $5 \times 5 \times 5$  时的滤波效果最好,因此,实验均选择尺寸为  $5 \times 5 \times 5$ ,标准差  $\sigma$  为 1 的高斯滤波器。

图 4 为滤波前后不同方法的测量结果变化情况,

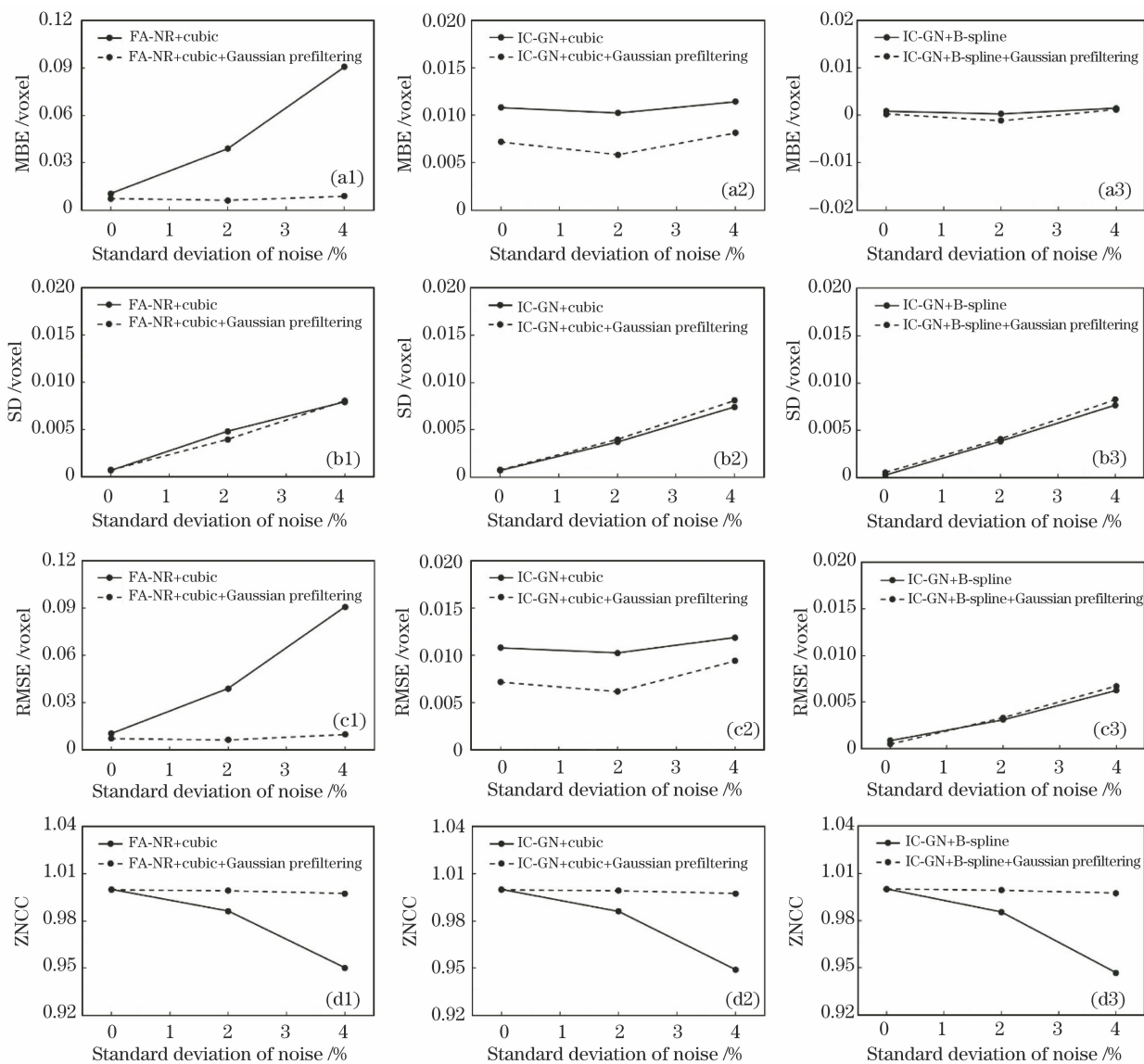


图 4 高斯滤波对 3 种方法的影响。(a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

Fig. 4 Effect of Gaussian filtering on 3 methods. (a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

可以发现,滤波后 3 种方法的均值误差均有一定程度的下降,且方法 1 的下降最明显,原因是高斯滤波降低了图像噪声,进而降低了噪声引起的系统误差。而方法 2 和方法 3 均值误差中没有噪声引起的系统误差,仅有插值误差。尽管滤波后图像的噪声水平有明显降低,但 3 种方法的随机误差并没有明显变化,原因是 DVC 中位移测量误差  $\Delta u$  的方差为  $V(\Delta u)$ ,与图像噪声方差( $\sigma_n^2$ )成正比,与图像的灰度梯度平方和( $\sum \sum \sum (f_x)^2$ )成反比,可表示为

$$V(\Delta u) \approx \frac{2\sigma_n^2}{\sum \sum \sum (f_x)^2}, \quad (4)$$

式中,  $\sum$  为子体块内所有体素点的累加,  $f_x$  为图像的灰度梯度。可以发现,高斯预滤波在降低图像噪声水平的同时也降低了图像的灰度梯度  $f_x$ ,从而无法有效降低 DVC 位移测量的随机误差。值得注意的是,对于不同的材料,滤波后图像灰度梯度  $f_x$  的下降幅度存在一定差异,可能会降低,也可能会增加,但变化幅度均较小。图 4 还给出了滤波前后不同方法的总误差,可以发现,滤波后方法 1 的总误差

有明显降低,方法 2 也有小幅度降低,而方法 3 没有明显变化。原因是方法 3 采用 IC-GN 算法消除了噪声引起的系统误差,采用的三次 B 样条插值方法也保证了其插值误差在较小的水平,因此简单的低通滤波对其的降噪效果有限。此外,从 3 种方法在滤波前后 ZNCC 系数的变化情况可以发现,随着噪声的增加,采用高斯预滤波时,3 种方法计算结果的 ZNCC 系数均值均能保持在较高的水平。

图 5 为滤波后不同水平噪声下位移测量结果的变化情况,由图 5(a)可以发现,在不同噪声水平下,滤波后方法 1 和方法 2 的均值误差基本相同,这表明滤波能完全消除 FA-NR 算法位移测量结果中噪声引起的系统误差,2 种方法位移结果中的误差主要为插值误差,且 2 种方法的均值误差基本相同。而方法 3 由于采用了三次 B 样条插值方法,在同一噪声水平下,其均值误差小于方法 1 和方法 2。从图 5(b)和图 5(d)可以发现,3 种方法的随机误差和 ZNCC 系数均值基本一致;由图 5(c)可以发现,方法 1 和方法 2 的总误差基本一致,且大于方法 3 的总误差。

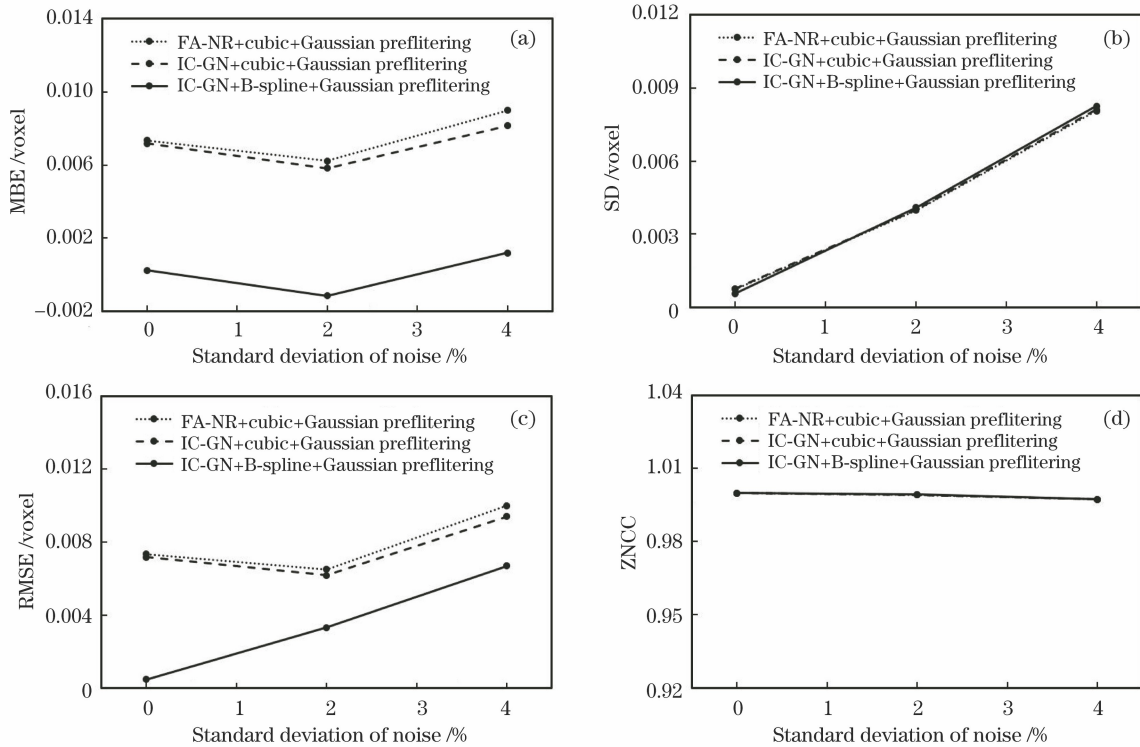


图 5 滤波后噪声的影响分析。(a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

Fig. 5 Analysis of the influence of noise after filtering. (a) MBE; (b) SD; (c) RMSE; (d) ZNCC

上述结果表明,高斯滤波能完全消除亚体素配准算法中噪声引起的系统误差,而对插值误差的影响较小。因此,当使用 FA-NR 算法(方法 1)时,用

高斯滤波能显著提升其测量精准度。尽管高斯滤波对 IC-GN 算法(方法 2 和方法 3)位移测量误差的影响较小,但能显著提高位移测量结果的 ZNCC 系数。



在实际实验中,ZNCC 系数(变化范围为 $[-1,1]$ )可用来判断 DVC 的匹配程度,当计算点的 ZNCC 系数低于某一设定值(如 0.7)时,表明该点匹配失败或不可靠。当体图像噪声较大时,不使用高斯预滤波也能进行准确匹配,但 ZNCC 系数却很低,从而影响对计算结果的评估。因此,建议在使用 IC-GN 算法进行 DVC 计算前对体图像进行高斯预滤波处理。

### 4 实际实验

为了进一步验证高斯预滤波在实际 DVC 实验中的效果,将其应用于颗粒增强树脂材料的重扫描实验和高聚物材料压缩实验获取的数字体图像 DVC 分析中。

#### 4.1 颗粒增强树脂材料的重扫描实验

实验过程中,将颗粒填充树脂材料试件放置在载物台上,且不施加任何载荷。连续进行 2 次扫描获得 2 组体图像,在 CT 扫描过程中,X 射线源(225 kV 微焦点 CT)的电压和电流分别为 140 kV

和 0.62 mA,分辨率为  $55.3 \mu\text{m}$ ,单次扫描时长为 23 min。通过分析 2 组体图像可以检验图像噪声对 DVC 测量结果的影响,进行 DVC 分析时,感兴趣区域(VOD)的尺寸为  $280 \text{ voxel} \times 280 \text{ voxel} \times 280 \text{ voxel}$ ,采用的子体块尺寸为  $51 \text{ voxel} \times 51 \text{ voxel} \times 51 \text{ voxel}$ ,计算步长为 10 voxel,共有 10648( $22 \times 22 \times 22$ )个均匀分布的计算点。

图 6 为方法 1 和方法 3 在滤波前后的位移  $u$  和 ZNCC 系数,可以发现,滤波前方法 1 和方法 3 测量误差绝对值的最大值分别为 0.6390 voxel 和 0.0967 voxel,滤波后变为 0.0999 voxel 和 0.0958 voxel,分别下降了 84.366% 和 0.931%, $x$ 、 $y$  方向的位移  $v$  和  $w$  与此类似,不再进行分析。由 ZNCC 系数的变化情况可知,滤波前方法 1 和方法 3 的 ZNCC 系数最小值分别为 0.6810 和 0.6733,均小于 0.7;滤波后方法 1 和方法 3 的 ZNCC 系数最小值分别为 0.9466 和 0.9465。表 1 和表 2 分别为滤波前后 2 种方法对位移  $u$ 、 $v$ 、 $w$  的测量结果,可以发现,方法 1 测量的位移在滤波后的均值误差有大幅度降低,方

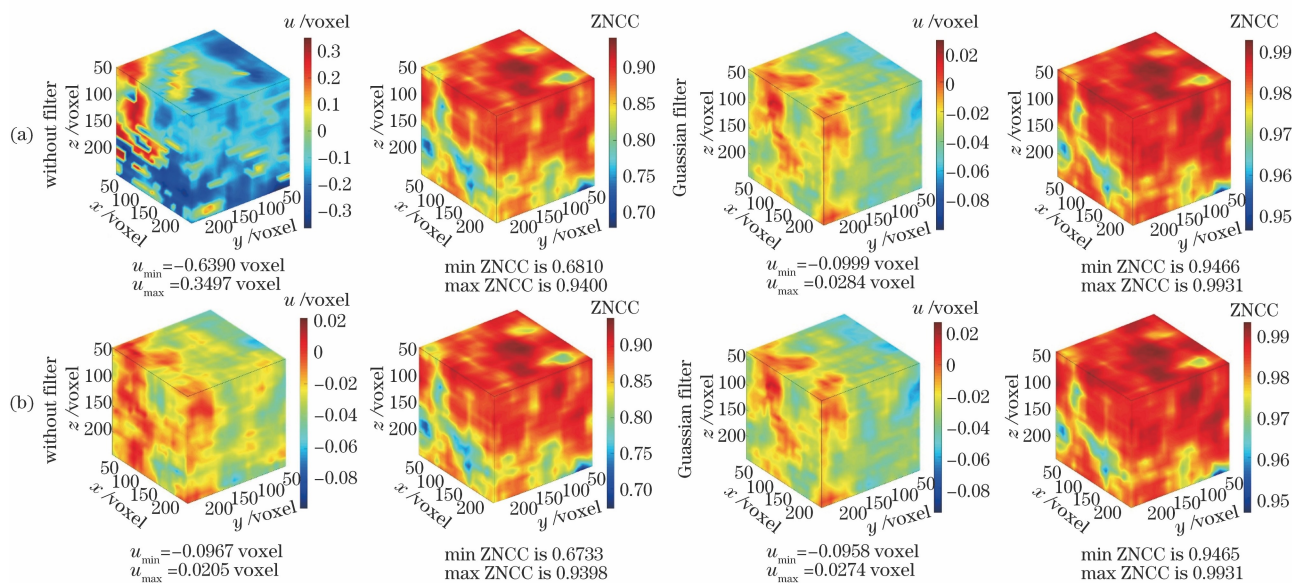


图 6 重扫描实验的位移  $u$  和 ZNCC 系数。(a)方法 1;(b)方法 3

Fig. 6 Displacement  $u$  and ZNCC coefficient of the rescanning experiment. (a) Method 1; (b) method 3

表 1 方法 1 重扫描实验的结果

Table 1 Results of method 1 rescanning experiment

unit: voxel

Displacement	MBE		SD		RMSE	
	Without filter	Gaussian filter	Without filter	Gaussian filter	Without filter	Gaussian filter
$u$	-0.1188	-0.0339	0.1330	0.0139	0.1783	0.0367
$v$	0.1493	0.0393	0.1153	0.0141	0.1886	0.0417
$w$	0.1489	0.0493	0.0451	0.0071	0.1556	0.0498

表 2 方法 3 重扫描实验的结果

Table 2 Results of method 3 rescanning experiment

unit: voxel

Displacement	MBE		SD		RMSE	
	Without filter	Gaussian filter	Without filter	Gaussian filter	Without filter	Gaussian filter
$u$	-0.0299	-0.0333	0.0129	0.0135	0.0326	0.0359
$v$	0.0329	0.0384	0.0138	0.0137	0.0357	0.0408
$w$	0.0445	0.0488	0.0075	0.0070	0.0451	0.0493

法 3 测量的位移在滤波前后没有明显变化。

#### 4.2 高聚物材料的压缩实验

压缩实验的研究对象是一种高聚物材料,其主要成分为硝酸钡和黏结剂,实验选取了一个尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的高聚物材料立方块<sup>[23]</sup>。实验过程中,将试件一端固定,另一端施加  $0.56\text{ mm}$  的位移载荷。加载前后分别用 X 射线 CT 采集尺寸为  $570\text{ voxel} \times 570\text{ voxel} \times 621\text{ voxel}$  的体图像,并用 DVC 分析获得的体图像。在 DVC 计算中,设置体图像的 VOI 尺寸为  $200\text{ voxel} \times 200\text{ voxel} \times 200\text{ voxel}$ ,子体块的尺寸为  $41\text{ voxel} \times 41\text{ voxel} \times 41\text{ voxel}$ ,计算

步长为  $10\text{ voxel}$ ,共生成  $9261(21 \times 21 \times 21)$  个计算点,其他参数和模拟实验相同。图 7 为 VOI 的 3D 图及其灰度分布直方图,图 8 为用方法 3 滤波前后体图像的计算结果及两者之间的差异。可以发现,位移  $u$  在滤波前后的变化范围较小,分别为  $[6.1105\text{ voxel}, 16.0512\text{ voxel}]$ 、 $[6.0965\text{ voxel}, 16.0367\text{ voxel}]$ ,这表明方法 3 中滤波前后的位移计算结果没有明显变化,位移  $v$  和  $w$  的情况与此类似。此外,滤波前后的 ZNCC 系数变化范围分别为  $[0.9381, 0.9890]$ 、 $[0.9620, 0.9940]$ ,这表明高斯滤波能明显提升计算结果的 ZNCC 系数。

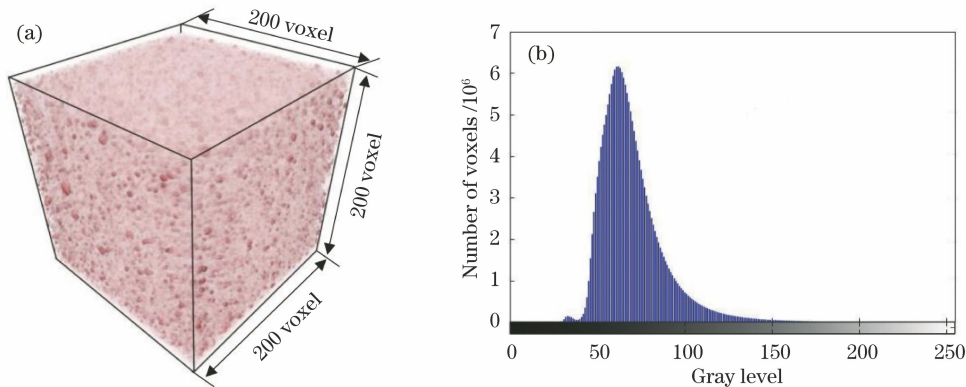


图 7 高聚物材料的单轴压缩实验。(a) VOI; (b) VOI 的灰度分布直方图

Fig. 7 Uniaxial compression experiment of the polymer material. (a) VOI;

(b) gray level distribution histogram of the VOI

## 5 结 论

通过数值模拟平移实验和实际实验研究了高斯预滤波对数字体图像相关方法测量误差的影响,研究表明,在 DVC 分析中,相比经典的 FA-NR 算法,IC-GN 算法能通过 Barron 梯度算子消除噪声引起的系统误差,抗噪性能更强,且三次 B 样条插值方法的插值误差远小于三次插值方法。因此,在实际 DVC 分析中,建议采用 IC-GN 亚体素配准算法和三次 B 样条插值方法。高斯滤波能显著降低

CT 图像中的噪声水平,进而消除 DVC 位移测量结果中噪声引起的系统误差,但其对插值误差的影响较小。此外,高斯预滤波能显著提升测量结果的 ZNCC 系数。因此,在实际 DVC 分析中,需要对参考体图像和变形体图像进行高斯预滤波。本研究主要围绕高斯滤波进行了分析,为了降低 CT 体图像的噪声,已有研究还发展了许多新的降噪方法,如改进的非局部平均算法<sup>[24]</sup>和 3D 块匹配滤波算法<sup>[25]</sup>,下一步还需分析这些降噪算法对 DVC 分析测量误差的影响。



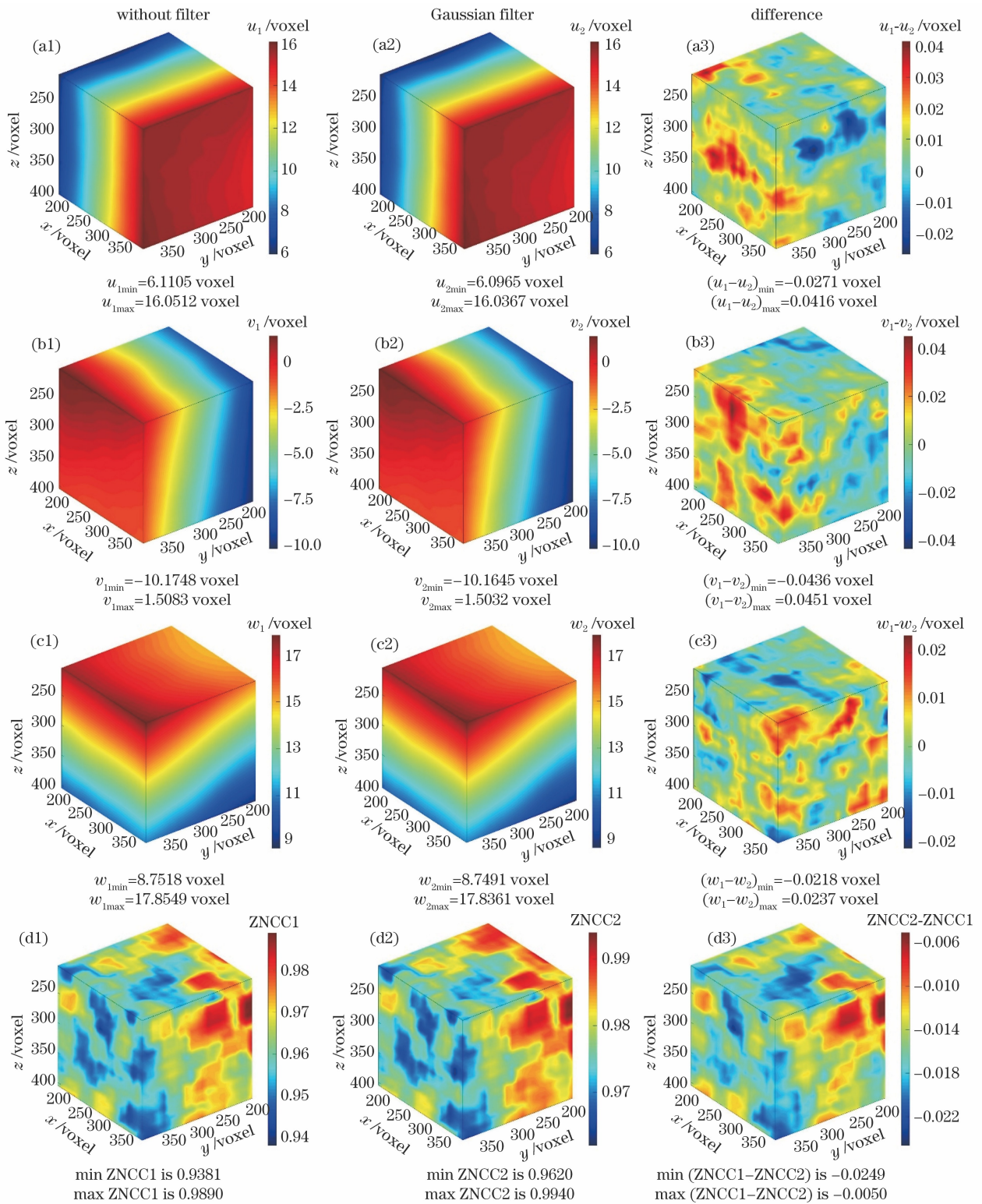


图 8 高聚物压缩实验的结果。(a)位移  $u$  ;(b)位移  $v$  ;(c)位移  $w$  ;(d) ZNCC 系数

Fig. 8 Results of polymer compression experiments. (a) Displacement  $u$  ; (b) displacement  $v$  ; (c) displacement  $w$  ; (d) ZNCC coefficient

参 考 文 献

[1] Pan B, Wang B. Research progress in digital volume correlation method [J]. Chinese Science Bulletin,

2017, 62(16): 1671-1681.

潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(16): 1671-1681.

[2] Pan B, Wu D F, Wang Z Y. Internal displacement and

- strain measurement using digital volume correlation: a least-squares framework[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4): 045002.
- [3] Wang B, Pan B. Self-adaptive digital volume correlation for unknown deformation fields [J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(2): 149-162.
- [4] Lee S, Ji W. DVC analysis of a polymer material subjected to tensile loading with synchrotron radiation tomography[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106204.
- [5] Franck C, Hong S, Maskarinec S A, et al. Three-dimensional full-field measurements of large deformations in soft materials using confocal microscopy and digital volume correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2007, 47(3): 427-438.
- [6] Jiang P, Wang W X, Zhang N, et al. Preliminary study on determining the sequence of intersecting lines using optical coherence tomography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221101.  
蒋鹏, 王蔚昕, 张宁, 等. 光学相干层析技术在朱墨时序检验中的初步研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221101.
- [7] Yuan Z X, Mao L T, Peng R D, et al. Digital experimental on internal three dimensional deformation field measurement of porous rock based on computer tomography [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2014, 33(8): 1080-1085.  
袁则循, 毛灵涛, 彭瑞东, 等. CT 孔隙岩石内部三维变形场数字实验[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(8): 1080-1085.
- [8] Yang P, Wan K S, Qin T Y. Digital volume correlation algorithm evaluation under X-CT noise condition[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(5): 589-600.  
杨鹏, 万克树, 秦天畅. X-CT 噪音条件下数字体积相关算法评测[J]. *实验力学*, 2014, 29(5): 589-600.
- [9] Zhao L L, Sun D L, Wang L L, et al. Ray-tracing program for grazing incident X-ray microscope system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0401002.  
赵玲玲, 孙德林, 王丽丽, 等. 掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0401002.
- [10] Zhang Y G, Yi B S, Wu C Y, et al. Low-dose CT image denoising method based on convolutional neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0410003.  
章云港, 易本顺, 吴晨玥, 等. 基于卷积神经网络的低剂量 CT 图像去噪方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0410003.
- [11] Cai Y F, Chen T Y, Wang J, et al. Image noise reduction in computed tomography with non-local means algorithm based on adaptive filtering coefficients[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0710001.  
蔡玉芳, 陈桃艳, 王珏, 等. 基于自适应滤波系数的非局部均值计算机层析成像的图像降噪方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0710001.
- [12] Xu H Y, Cai T T, Ye L K, et al. The practical application of watershed algorithm in CT image[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2014, 31(6): 5272-5274, 5300.  
许红玉, 蔡坦坦, 叶良凯, 等. 分水岭算法在 CT 图像分割中的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2014, 31(6): 5272-5274, 5300.
- [13] Lin Q, Yang M, Zhang X M, et al. Improved image artifacts suppression method for neutron external CT [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2210001.  
林强, 杨民, 张晓敏, 等. 一种改进的中子外部 CT 图像伪影抑制方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2210001.
- [14] Pan B, Wu D F, Guo B Q. Digital volume image correlation by using iterative least-squares for internal deformation measurement of an object[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(6): 665-673.  
潘兵, 吴大方, 郭保桥. 数字体图像相关方法中基于迭代最小二乘法的物体内部变形测量[J]. *实验力学*, 2011, 26(6): 665-673.
- [15] Pan B, Wang B, Wu D F, et al. An efficient and accurate 3D displacements tracking strategy for digital volume correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 58: 126-135.
- [16] Pan B, Wang B. A flexible and accurate digital volume correlation method applicable to high-resolution volumetric images[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105007.
- [17] Bay B K. Methods and applications of digital volume correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, 43(8): 745-760.
- [18] Schreier H W. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(11): 2915-2921.
- [19] Pan B. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(10): 1161-1167.
- [20] Tai S C, Yang S M. A fast method for image noise estimation using Laplacian operator and adaptive edge detection[C]//2008 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, March 12-14, 2008, Saint Julian's, Malta. New York: IEEE Press, 2008: 1077-1081.

- [21] Zou X, Li K, Pan B. The effect of low-pass pre-filtering on subvoxel registration algorithms in digital volume correlation: a revisited study[J]. *Measurement Science Review*, 2020, 20(5): 202-209.
- [22] Shao X X, Dai X J, He X Y. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 71: 9-19.
- [23] Xu P P, Chen H, Xie S J, et al. Damage evolution behavior of PBX substitute material using in situ CT [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(10): 888-895.
- 许盼盼, 陈华, 解社娟, 等. PBX 代用材料损伤演化原位 CT 研究 [J]. *含能材料*, 2018, 26(10): 888-895.
- [24] Xing X X, Wang H L, Li J, et al. Asymptotic non-local means image denoising algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(9): 1952-1960.
- 邢笑笑, 王海龙, 李健, 等. 渐近非局部平均图像去噪算法 [J]. *自动化学报*, 2020, 46(9): 1952-1960.
- [25] Yahya A A, Tan J Q, Su B Y, et al. BM3D image denoising algorithm based on an adaptive filtering [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79 (27/28): 20391-20427.