

文章编号 1004-924X(2015)06-1800-07

对椒盐噪声稳健的数字图像斯皮尔曼秩次相关法

黄旺华, 王钦若*, 徐维超*, 胡 忠, 周延周
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:应用传统数字图像相关方法进行变形场分布测量时,很难精确处理带有椒盐噪声的数字图像。本文利用斯皮尔曼秩次(SR)相关系数对于椒盐噪声鲁棒的特点,提出了一种基于 SR 的数字图像相关算法。根据 SR 均值统计特征,当椒盐噪声密度足够小时,二元高斯混合模型数据的 SR 相关系数主要由散斑图像母体之间的相关系数决定。为了验证 SR 在椒盐脉冲噪声情况下的稳健性,采用可精确控制的模拟散斑图像进行了仿真,然后在三维扫描系统中使用 SR 相关技术计算出扫描数据的偏差。可控压缩散斑变形仿真表明,当椒盐噪声密度小于 25%,计算子块大小为 41 pixel×41 pixel 时,SR 数字图像相关仍可计算出精确的变形。将该算法应用于计算激光扫描纹理数据之间的偏差,结果显示,整体变形为 4 μm 时,相关系数为 0.996 6,表明 SR 相关系数具有较强的稳健性,在椒盐噪声下可用数字图像相关方法进行变形场分布测量。

关键词:数字图像相关;椒盐噪声;斯皮尔曼秩次相关系数;变形场分布

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1800

Robust digital imaging Spearman's Rho correlation for pepper and salt noise

HUANG Wang-hua, WANG Qin-ruo*, XU Wei-chao*, HU Zhong, ZHOU Yan-zhou

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: wangqr2006@gdut.edu.cn; wcxu@gdut.edu.cn

Abstract: When traditional digital image correlation technique is used to measure the deformation displacement, the digital image with very small amount of pepper and salt noise is difficult to be processed precisely. Therefore, this paper proposes a new digital image correlation method based on Spearman's rho (SR) correlation coefficient robust to pepper and salt noise. According to the SR's average statistic characteristics, the SR coefficient of bivariate Gaussian mixture model is mainly decided by the clean speckle image when the density of pepper and salt noise is small enough. To verify the robustness of the SR to pepper and salt noise, the controllable simulation speckle image is used in a simulation, and the SR correlation technology is used to calculate the scanning errors. The results indicate that it can still get the accurate displacement vector by the SR digital image correlation when the density of pepper and salt noise is less than 25% and the block size is 41 pixel×41 pixel. The algorithm is used to calculate the laser-scanning texture data, and the sampling offset calculated is

收稿日期:2014-12-25; **修订日期:**2015-02-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11072063);广州市科技计划资助项目(No. 2014J4100203);广东省自然科学基金资助项目(No. 1414050002003)

4 μm with the correlation coefficient of 0.996 6. The result shows that the SR digital image correlation technique has strong robustness, and is suitable for calculating the deformation displacement vector under the pepper and salt noise.

Key words: digital image correlation; pepper and salt noise; Spearman's rho correlation coefficient; deformation field distribution

1 引言

20世纪80年代,Yamaguchi^[1]和Peters^[2]等学者相继提出数字图像相关(Digital Image Correlation,DIC)技术,该技术可应用于计算散斑物件的表面变形,具有非接触、全场测量等特点。其基本原理是在变形前的参考图像中选取一点为中心的 $M \times M$ 的子块,然后在变形后的目标图像中寻找出与该子块最相关的区域,并依此中心点作为应变后的相应点。

在获取和传输数字图像的过程中,受拍摄环境和图像传感器质量等因素的影响,图像中会产生大量不同形式的噪声,比如电子热震动引起的热噪声,光电二极管之间参数的偏差产生的固定模式噪声,载体密度变化引起的散粒噪声和量子噪声引起的椒盐噪声等^[3]。前两种噪声主要有两种处理方法:一是图像平滑处理法^[4]。潘兵等采用高斯滤波进行预平滑处理^[5],使用SG(Savitzky-Golay)算法对散斑数据进行卷积平滑^[6],Sutton等采用GCV(Generalized Cross Validation)和有限元相结合的平滑算法^[7]来减少噪声对数据的影响,但该方法在平滑噪声的同时也对散斑图像进行了模糊化。二是子块增大法^[8-11],SUN等^[11]通过计算子块的熵,潘兵等^[8]通过计算SSSIG(Sum of Square of Subset Intensity Gradients)来选择合适的子块大小,减少了噪声对计算精度的影响。此外,姚学锋等采用小波分析技术进行去噪^[12],但该方法精度不高^[4]。

椒盐噪声是图像拍摄时没有采集足够光子所致,在DIC设备上非常常见。散斑图像受到椒盐噪声污染时,即便数据预先经过中值滤波,传统的DIC技术仍将得到错误的结果。本文将对椒盐噪声稳健的斯皮尔曼秩次相关系数(Spearman's rho,SR)作为相关评判标准。根据该相关系数的统计特征^[13-16],当噪声密度在一定范围内时,SR能很好地查找出最相关的对应点,而不受噪声干扰。

2 斯皮尔曼秩次相关系数

2.1 斯皮尔曼秩次相关系数

令 $\{(F_i, G_i)\}_{i=1}^n$ 表示为 n 对独立同分布的数据,其母体为二元连续分布。对 $\{(F_i)\}_{i=1}^n$ 按升序排列,记 P_i 为 F_i 在升序序列中的位置,即为秩次。同理记 Q_i 为 G_i 的秩次。则相关系数 C_{sr} 的定义为:

$$C_{sr} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)}. \quad (1)$$

将变形前后的两幅图像当作二元高斯模型,即独立同分布样本 $\{(F, G)\}$ 的母体为二元高斯分布,其密度函数为:

$$\phi(F, G) = \frac{1}{2\pi\sigma_f\sigma_g\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{z}{2(1-\rho^2)}\right], \quad (2)$$

其中:

$$z = \frac{(f-\mu_f)^2}{\sigma_f^2} - \frac{2\rho(f-\mu_f)(g-\mu_g)}{\sigma_f\sigma_g} + \frac{(g-\mu_g)^2}{\sigma_g^2}, \quad (3)$$

ρ 为 F 与 G 之间的相关系数。用符号表示为:

$$(F, G) \sim N(\mu_f, \mu_g, \sigma_f^2, \sigma_g^2, \rho). \quad (4)$$

当图像受到少量方差巨大的异常值影响时,通常采用高斯混合模型进行描述,即有:

$$CN(\rho, \rho') = (1-\epsilon)N(\mu_f, \mu_g, \sigma_f^2, \sigma_g^2, \rho) + \epsilon N(\mu_f, \mu_g, \lambda_f^2\sigma_f^2, \lambda_g^2\sigma_g^2, \rho'), \quad (5)$$

其中: $0 \leq \epsilon \leq 1$, λ 为噪声的高斯方差与正常值高斯方差的比; λ_f, λ_g 均趋于无穷; ρ' 是噪声母体的相关系数,即为求取正常相关系数时的干扰值。

2.2 SR的均值特征

徐维超等^[14]研究了在二元高斯模型数据受到脉冲噪声污染时数据间的相关性,并针对公式(5)证明了当 ϵ 足够小时,SR相关系数均值为:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \lambda_f \rightarrow \infty \\ \lambda_g \rightarrow \infty}} E(C_{sr}) \approx \frac{6}{\pi} \left[(1-3\epsilon) \arcsin \frac{\rho}{2} + \epsilon \arcsin \rho' \right], \quad (6)$$

其中： ρ 为干净散斑图母体之间的相关系数，而 ρ' 是两幅散斑图上椒盐脉冲噪声母体之间的相关系数， $\rho, \rho' \in [-1, 1]$ ， n 为样本中的元素个数， λ_r, λ_g 是指两散斑图中椒盐噪声的方差与正常散斑图方差的比。

3 压缩散斑变形仿真

3.1 散斑图像数据及仿真原理

为了验证上述理论的正确性，本文采用了可以精确控制变形的仿真散斑图像。为了减少局部区域的相似度，增加散斑子块间的差异性，在文献[17-18]生成散斑的基础上。除了采用常见的随机散斑颗粒叠加外，还考虑了颗粒尺寸和自旋转角度的随机性。

本文采用的散斑图大小为 500 pixel \times 500 pixel，散斑个数 $N=1\ 800$ ，散斑半径 $(R_x, R_y) \in [3, 6]$ ，随机逆时针旋转角度 $\theta \in [0^\circ, 45^\circ]$ ，在垂直方向压缩 5%。为了验证 RS 相关系数算法的稳健性，向参考散斑和目标散斑图添加一定密度的椒盐脉冲噪声。在散斑图基础上添加密度为 10% 的椒盐噪声，得到的噪声散斑图如图 1 所示。

在仿真中首先生成 13 组带椒盐噪声的随机散斑数据，其密度分别为 0%，5%，10%，15%，...，55%，60%。然后分别使用中值滤波+皮尔逊积距相关系数(PPMCC)和 RS 相关系数，从目标图像中求取参考图像一点的对应点。求取过程中选取子块大小为 41×41 ，即从 500 pixel \times 500 pixel 的参考图像中选取的子块数量为 $12 \times$

12，通过逐点查找的方式从目标图像中寻找最相关的点，并使用梯度算法求取亚像素。最后，根据计算出的位移分别求取误差的最大值、最小值、平均值、方差和变形矢量。

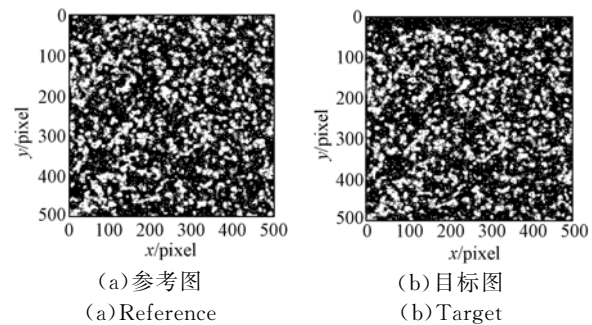


图 1 带有 10% 椒盐噪声的散斑图

Fig. 1 Speckles with 10% pepper and salt noise

3.2 仿真结果及分析

在不同椒盐噪声密度的情况下求取绝对误差的最大值、最小值、平均值和方差，结果如表 1、表 2 所示。表 1 首先对数据进行中值滤波，然后使用传统的皮尔逊积距相关系数(PPMCC)数字图像相关算法求取偏移对应点。当椒盐噪声密度大于等于 5% 时，其 X 轴和 Y 轴的绝对误差的方差较大。由表 2 可知，直接使用 SR 相关系数对数据进行计算，当椒盐噪声密度小于 10% 时，所求出的 X 轴和 Y 轴的最大误差在 1 pixel 之内。当椒盐噪声密度达到 30% 时，虽平均误差还在可以接受的范围内，但最大值和方差激增。

表 1 中值滤波+PPMCC 的绝对误差

Tab. 1 Absolute errors by using median filter & PPMCC

(pixel)

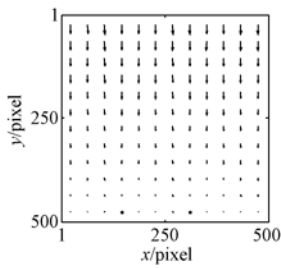
椒盐噪声 密度/%	X 轴绝对误差				Y 轴绝对误差			
	最大值	最小值	平均值	方差	最大值	最小值	平均值	方差
0	0.462 323	0.001 135	0.156 326	0.007 934	0.586 212	0.005 822	0.271 363	0.020 576
5	74.715 18	0.001 672	1.073 378	62.085 13	217.271 3	0.001 541	2.270 363	360.068 1
10	310.696 7	0.000 350	10.560 66	2 040.302	407.285 0	0.001 019	12.433 64	3 190.632
15	388.048 4	0.000 509	44.022 25	7 816.582	445.289 2	0.004 633	49.216 91	9 765.526
20	444.191 0	0.010 939	140.215 1	17 455.53	426.121 9	0.064 516	123.025 9	14 159.85
25	419.176 0	0.102 059	148.866 2	12 055.83	412.316 2	1.718 905	152.737 5	10 641.96
30	402.366 9	5.763 263	139.899 9	9 405.065	443.974 1	0.452 43	172.618 7	11 996.18
35	432.139 1	0.165 822	162.252 5	12 984.13	452.153 8	0.303 919	150.166 2	11 421.08
40	441.083 9	7.153 622	166.798 1	11 648.18	417.362 9	3.343 223	149.960 8	11 862.25
45	430.263 2	4.288 566	151.162 5	11 827.11	398.007 8	0.480 561	139.454 0	10 223.58
50	454.217 6	1.866 818	159.410 4	11 238.98	452.091 5	0.727 633	142.533 3	12 034.38
55	435.699 4	2.698 126	151.887 6	10 556.92	445.130 6	1.888 946	166.440 5	12 032.38
60	448.250 7	4.149 263	162.350 2	12 898.3	431.313 2	1.229 242	173.138 5	14 102.07

表 2 SR 绝对误差

Tab. 2 Absolute error by using SR

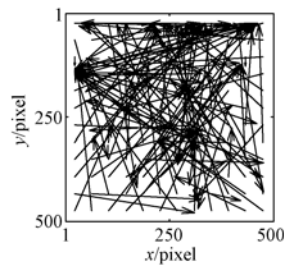
(pixel)

椒盐噪声 密度/%	X 轴绝对误差				Y 轴绝对误差			
	最大值	最小值	平均值	方差	最大值	最小值	平均值	方差
0	0.668 866	0.111 485	0.349 589	0.018 482	0.130 233	0.019 932	0.071 348	0.000 323
5	0.819 580	0.168 016	0.423 042	0.026 898	1.210 231	0.054 657	0.286 557	0.012 852
10	0.856 002	0.183 075	0.470 357	0.030 054	1.387 074	0.120 005	0.378 595	0.084 284
15	1.614 793	0.157 125	0.534 635	0.088 709	2.470 694	0.130 106	0.576 882	0.185 442
20	2.537 943	0.144 468	0.598 644	0.138 289	2.382 883	0.183 002	0.692 231	0.235 787
25	2.423 639	0.122 603	0.725 229	0.248 574	3.336 46	0.197 272	0.769 339	0.369 502
30	393.030 1	0.166 040	4.126 477	1 115.364	193.415 9	0.222 515	3.149 934	394.574 4
35	294.123 2	0.155 420	17.899 18	3 548.538	337.566 5	0.220 447	16.346 24	3 278.190
40	405.188 2	0.138 763	73.753 26	10 944.77	444.581 3	0.194 642	73.389 8	11 652.99
45	448.121 1	0.190 760	116.223 4	17 194.56	446.397 8	0.245 781	84.000 38	11 642.26
50	452.118 5	0.288 249	165.869 2	17 147.02	445.409 2	0.275 428	141.337	13 939.82
55	452.103 7	0.205 371	173.345 7	16 786.8	441.673 5	0.277 717	155.777 8	14 973.22
60	451.141 2	0.670 484	162.393 8	13 251.81	448.667 1	0.273 230	167.380 5	14 521.64



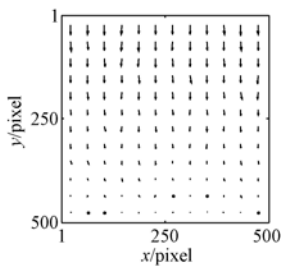
(a) 椒盐噪声密度为 5%

(a) Pepper and salt noise density of 5%



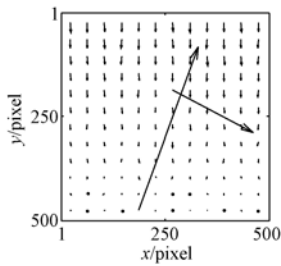
(d) 椒盐噪声密度为 60%

(d) Pepper and salt noise density of 60%



(b) 椒盐噪声密度为 25%

(b) Pepper and salt noise density of 25%



(c) 椒盐噪声密度为 30%

(c) Pepper and salt noise density of 30%

图 2 在不同椒盐噪声密度下 SR 计算的变形矢量
Fig. 2 Displacement vectors calculated by using SR under different densities of salt and pepper noises

图 2 是散斑图在不同比例的椒盐脉冲噪声下,用 SR 求得的压缩变形情况。从仿真结果可以发现,对数字图像进行相关性计算时,使用传统的 PPMCC 相关法,即便对数据进行预先中值滤波,所得到的结果误差仍比较大,稳健性比较弱。而采用 SR 相关法,稳健性会有比较大的提升,当椒盐噪声密度小于 30%时,X 和 Y 方向绝对误差的平均值都在 1 个像素之内,同时方差也小于 0.4 pixel。但是当椒盐噪声密度等于 30%的时候,SR 计算出的偏移量大部分在正常范围内,但个别偏移量误差比较大,随着椒盐噪声密度的增加,大误差的偏移量越来越多。

4 实验系统

图 3 是用于测量高精度三维数据的扫描平台,系统主要由计算机、运动控制平台、相机和线激光器组成。扫描对象为皮革,扫描过程中相机循环拍摄,间隔时间为 5 ms,每次拍摄一行数据为 1 536 pixel,相邻像素间距 15 μm。

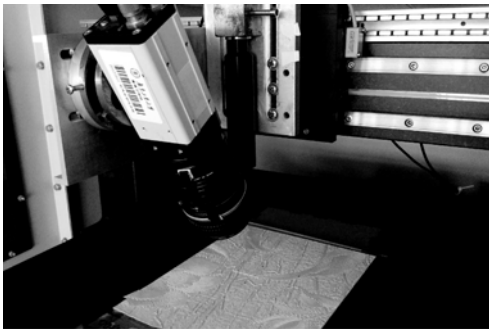


图 3 高精度三维数据扫描平台实验系统

Fig. 3 Experiment system of high precision three-dimensional scanning platform

由于相机视场在横向方向的扫描宽度只有 23 mm,需要通过局部复合拼接得到完整的三维数据。但机械误差的存在会导致每次扫描起点不在同一水平线上,存在一定的偏差。图 4 为扫描数据的二维图像及 Z 方向距离的直方图,从图中可以发现,由于扫描物体表面、激光线条和遮掩等原因,数据中存在一定的椒盐噪声。在实验中采用 SR 相关系数计算上述的扫描位置偏差。

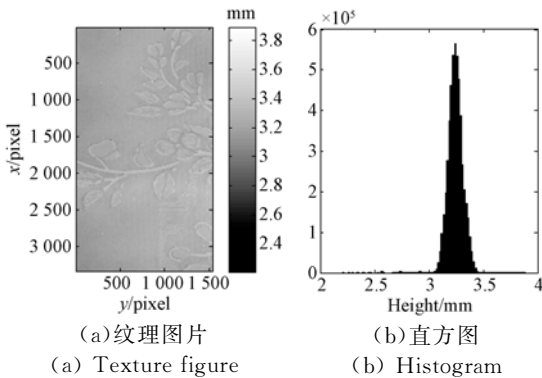
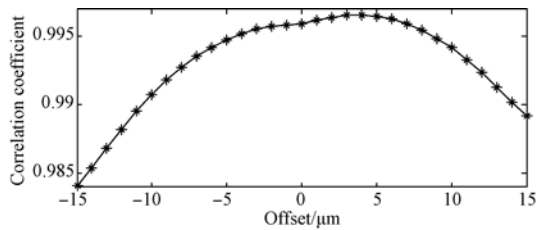


图 4 扫描实验的测试数据

Fig. 4 Data of scanning test

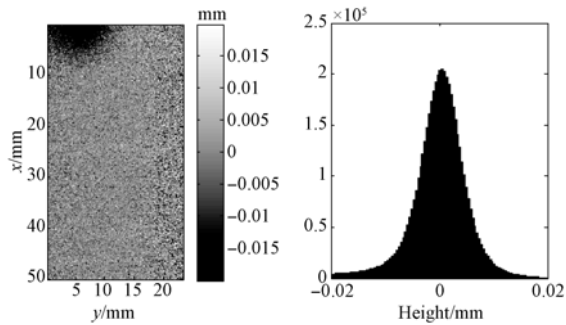
5 实验结果及分析

为了计算不同批次同一区域扫描的两个数据 A, B 之间的偏移量,将其中一组数据 A 沿 Y 轴方向依次偏移 -15, -14, -13, ..., 14, 15 μm, 所得到的数据与另一组数据 B 进行相关系数计算。图 5(a)为偏移值与相关系数的曲线图,当偏移值为 4 μm 时,两组数据的相关系数达到最大值(0.996 6)。然后对 A 组数据补偿 4 μm,再与 A 组数据相减,在理想状态下,所求取的差值都为 0。图 5(b)为在实验中求取的差值图像,5(c)为所对应的差值直方图。



(a) 相关系数

(a) Correlation coefficient



(b) 差值图

(b) Difference figure

(c) 直方图

(c) Histogram

图 5 测量结果

Fig. 5 Measurement results

从实验结果可以发现,对同一区域的纹理表面进行扫描时,所获得的采样数据存在一定的偏差,同时有小部分数据偏离群体。对一组数据进行微小的偏移,然后根据与另一组的 SR 数字图像的相关系数选择最合适的偏移值,得到的差值图及直方图显示 2 次数据的差值主要分布在 -8~8 μm, 满足测量精度的要求。

6 结 论

椒盐噪声是数字图像中不可避免的一种噪声,传统的皮尔逊积距相关系数(PPMCC)数字图像相关算法对此类噪声相当敏感,即便预先进行中值滤波,计算误差仍较大。因此本文在研究相关系数的统计特征的基础上,采用SR作为相关系数,充分利用SR对椒盐脉冲噪声的稳健性特点。首先采用可精确控制的模拟散斑图像进行仿真,然后在三维扫描系统中使用SR相关技术计算出扫描数据的偏差。仿真时为了提高散斑图的

复杂性,在传统散斑图的基础上增加了散斑大小随机性,使用非对称径向基进行扩散和散斑随机旋转,在参考散斑的基础上进行线性挤压得到目标散斑,然后给所生成的散斑图对添加幅度为4.095和一定密度的椒盐脉冲噪声,仿真结果表明SR能承受25%左右的椒盐脉冲噪声。在扫描皮革纹理三维数据偏差的计算中,数据中带有一定的椒盐噪声,计算偏差为4 μm 。差值直方图表明计算精度满足要求。

SR作为典型的统计相关系数之一,具有完善丰富的统计特征,它在数字图像相关技术方面的应用还有待进一步研究和挖掘。

参考文献:

- [1] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [2] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 213427-213427.
- [3] DAVIS C Q, FREEMAN D M. Statistics of subpixel registration algorithms based on spatiotemporal gradients or block matching [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1290-1298.
- [4] ZHAO J, ZENG P, PAN B, *et al.*. Improved Hermite finite element smoothing method for full-field strain measurement over arbitrary region of interest in digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(11): 1662-1671.
- [5] PAN B. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(10): 1161-1167.
- [6] PAN B, XIE H, GUO Z, *et al.*. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 033601-033601-10.
- [7] 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.
- [8] PAN B, XIE H, WANG Z, *et al.*. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [9] PAN B, ASUNDI A, XIE H, *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.
- [10] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [11] SUN Y, PANG J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 967-974.
- [12] YAO X, WU Z, JIN G. Wavelet denoising using the digital speckle correlation method [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2001, 41(4/5): 108-111.
- [13] SHEVLYAKOV G L, VILCHEVSKI N O. *Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods* [M]. Walter de Gruyter, 2002.
- [14] XU W, HOU Y, HUNG Y S, *et al.*. A comparative analysis of Spearman's rho and Kendall's tau in normal and contaminated normal models [J]. *Signal Processing*, 2013, 93(1): 261-276.
- [15] MA R, XU W, WANG Q, *et al.*. Robustness analysis of three classical correlation coefficients under contaminated Gaussian model [J]. *Signal Processing*, 2014, 104: 51-58.
- [16] 徐维超. 相关系数研究综述 [J]. *广东工业大学学报*, 2012, 29(3): 12-17.

XU W CH. A review on correlation coefficients [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2012, 29(3): 12-17. (in Chinese)

- [17] ZHOU Y Z, CHEN Y Q. Propagation function for accurate initialization and efficiency enhancement of digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1789-1797.

[18] 周延周, 刘运红, 刘羽飞, 等. 干涉法测量双层树脂材料内部的压缩位移场分布[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(11): 2923-2929.

ZHOU Y ZH, LIU Y H, LIU Y F, *et al.*. Measurement of compression displacement fields in dual layer epoxy composites by interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2923-2929. (in Chinese)

作者简介:



黄旺华(1981—),男,广东梅州人,博士研究生,2008年于广东工业大学获得学士学位,主要从事数字图像相关技术的研究。E-mail: hwhgdcn@gmail.com

通讯作者:



王钦若(1958—),男,海南儋县人,教授,博士生导师,广东工业大学自动化学院院长,主要从事自动检测与诊断技术、大型重载装备的检测技术与控制技术的研究。E-mail: wangqr2006@gdut.edu.cn

通讯作者:



徐维超(1970—),男,山东青岛人,教授,1993年,1996年于中国科学技术大学分别获得学士和硕士学位,2001年于香港大学获得博士学位,主要从事统计信号处理、统计模式识别、优化理论、快速算法等方向的研究。E-mail: wxu@gdut.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)