

文章编号:1002-2082(2019)05-0847-06

应用数字散斑投影测量纸页厚度

吴凡,吴思进,李伟仙,张雨蒙,祝俊怡,沙迪,董明利

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

摘要:传统的纸张厚度测量方法只能测量纸页某一点厚度,该类方法会因为纸张厚度全场分布不均匀带来测量误差。针对该问题,提出利用数字散斑投影的纸页厚度检测方法,向待测纸页投射散斑图案,并构建散斑投影的实验测量系统,通过三维数字图像相关的算法处理,得到纸页的形貌以及厚度。实验表明,对纸张厚度名义值为0.180 mm的实验样品进行测量,结果为0.177 mm,对该方法进行重复实验,测得的相对误差小于4%,而且该方法能够直观地显示纸页的全场分布。此外,提出的纸页厚度测量方法具有结构简单、非接触式测量、全场测量等优点,为纸页生产中的厚度检测提供了新思路。

关键词:数字图像相关;散斑投影;纸页厚度;散斑质量

中图分类号:TP278;O348

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0503002

Apply of digital speckle projection in measurement of paper sheet thickness

WU Fan, WU Sijin, LI Weixian, ZHANG Yumeng, ZHU Junyi, SHA Di, DONG Mingli

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Traditional measurement methods of paper sheet thickness can only measure the thickness of paper sheet at a certain single point, leading to the measurement error due to the uneven distribution of the paper sheet thickness. A new approach of paper sheet thickness measurement using digital speckle projection was proposed to address the problem of single-point measurement. The thickness and contour of paper sheet could be determined by executing the three-dimensional digital image correlation algorithm, after the speckle pattern was projected to the tested paper sheet and a speckle projection experimental system was built. The experimental result is 0.177 mm for measuring the paper which nominal value of thickness is 0.180 mm, and the repetitive experimental results show that the relative difference is less than 4%. Moreover, the full-field distribution of the paper sheet thickness is shown intuitively. In addition, the proposed method of paper sheet thickness measurement has the advantages of simple structure, non-contact full-field measurement, etc., which make the proposed means a promising approach for the measurement of paper sheet thickness during the paper production.

Key words: digital image correlation; speckle projection; paper sheet thickness; speckle quality

收稿日期:2019-01-21; 修回日期:2019-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFF0101801);北京信息科技大学2018年人才培养质量提高经费(5111823205);北京信息科技大学“勤信人才”培育计划(QXTCP B201702)

作者简介:吴凡(1995—),男,硕士研究生,主要从事散斑干涉及数字图像相关的研究。E-mail: 943195299@qq.com

通信作者:吴思进(1979—),男,副教授,主要从事全场光学测试的研究。E-mail: swu@bistu.edu.cn

引言

纸页厚度是表征纸产品质量的重要指标。因此,现代造纸工业迫切需要精确、快速可靠的在线检测技术。传统测量方法采用了电磁、红外、超声、 β 射线、太赫兹时域光谱以及光学三角法等一系列技术^[1]。其中, β 射线法存在电离辐射,会对人体造成危害。空气耦合超声传感器是一种安全、非接触的方法,但它需要很强的脉冲激励才能完成^[2]。传统光学测量方法则主要采用光学三角法来实现,但它只能实现单点的测量,会给测量带来一定的随机误差^[3]。此外,太赫兹时域光谱是一种相干探测技术,可以同时获得太赫兹脉冲的振幅、相位信息^[4]。各项测量指标都较为优秀,但现有的太赫兹波产生与检测装置体积较大、结构复杂并且价格昂贵。所以,快速、非接触、全场、安全可靠的纸页厚度检测,依然是一个有待解决的问题。

基于结构光投影的光学探测方法已广泛应用于各个领域,涉及到姿态控制、行业质量检测、医疗部件外形测量等多个方向^[5]。由于该类方法具有全场性、非接触性以及精度高等特点,有着广阔的应用空间。其中,散斑投影技术逐渐成为研究热点。与传统的数字散斑相关技术^[6-7]相比,散斑投影技术无需利用喷涂等技术在被测物体表面制作散斑,因此具有更好的适应性。本文提出了一种基于数字投影散斑相关的纸页厚度测量方法,能够实现纸页厚度的全场精确测量,光路简单,可靠性高,能够应用于工业现场测试。

1 基本原理

1.1 3D 数字图像相关(3D-DIC)方法

基于 3D-DIC 方法的测量结合了双目立体视觉和 2D 数字图像相关理论。利用相机拍摄被测物前后的数字散斑图像,再通过匹配其变化前后数字散斑图像中的对应图像子区。在获得图像子区的对应信息后,通过校准相机的内外参数,在三角测量关系中计算对象的 3D 位移信息。

双目立体视觉的原理图如图 1 所示,左右两个相机从不同角度观测被测物,经图像计算获得被测物的三维数据。

在 3D-DIC 中,对应准则采用标准差的和(SSD),相关系数由(1)式获得:

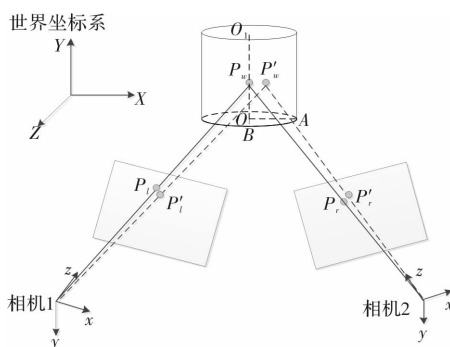


图1 双目视觉成像原理

Fig. 1 Imaging principle of binocular vision

$$C_{ssd} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i) - g(x_i, y_i, \vec{p})]^2 \quad (1)$$

式中:子区的大小为 $(2M+1)^2$ 个像素; $f(x_i, y_i)$ 是双目立体视觉中左相机得到的子区图像; $g(x_i, y_i)$ 是右相机得到的子区图像; $\vec{p}$ 是形函数中的参数,采用一阶形函数表达式,子区图像的位移可表达成(2)、(3)式:

$$u(x, y) = p_1 + p_3(x - x_0) + p_5(y - y_0) \quad (2)$$

$$v(x, y) = p_2 + p_4(x - x_0) + p_6(y - y_0) \quad (3)$$

即 $\vec{p} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$ 。再通过立体视觉理论建立起相机坐标与世界坐标的关系,计算物体任意点的位移。计算公式如下:

$$p_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: P_c 表示相机坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 表示世界坐标; M_1 为相机内参数矩阵,由相机焦距 f 、像素尺寸 dx, dy 及初始像素坐标 u_0, v_0 决定; M_2 为相机外参数矩阵,由旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 等相机在世界坐标中的位置参数决定。

1.2 散斑图案选取

散斑图案质量优化是提升 DIC 算法精度和效率的关键,而高质量的散斑生成依赖可靠的客观评价标准,由于散斑生成的复杂性,众多研究者进行了该方面的研究^[8-13]。通常,散斑图案是由空间位置完全随机分布的散斑基元组成,可表示为:

$$h(x, y) = \sum_{k=1}^N \phi(x - x_k, y - y_k) \quad (5)$$

式中: $h(x, y)$ 为生成散斑的亮度分布; $\phi(x, y)$ 为散斑基元的亮度分布; (x_k, y_k) 表示第 k 个散斑的中心位置。其统计特性由随机度、占空比等参数表征。散斑生成是一个随机的过程, 即使散斑统计特性完全相同(即采用相同的参数生成散斑), 每次生成的散斑也会因散斑的空间位置不一致而不同。

空间随机性使系统误差和随机误差为随机变量, 给散斑图像的评价带来困难。其中, 采用亚像素位置的均方根误差^[12] (root mean squared error, RMSE) 评价散斑质量综合考虑了数字图像相关中的系统误差和随机误差, 是一个优越的散斑评价标准。它表示了真实值与测量值之间的差异, 定义公式为:

$$RMSE^2 = E(u_e)^2 + Var(u_e) \quad (6)$$

式中: u_e 表示 DIC 的计算误差; 其标准差 $Var(u_e)$ 表示随机误差的大小; $E(u_e)^2$ 则表示了系统误差大小, 主要依赖于散斑基元本身的大小、形状等性质以及 DIC 算法类型, 对于常用的反向算法, 系统误差即为插值偏差。

随着散斑半径的增大, 系统误差减小, 随机误差增大。可通过调整散斑半径, 使得均方根误差达到最小。最优散斑半径满足(7)式:

$$E\{A_b\} \frac{dE\{A_b\}}{dR} - \frac{\sigma^2}{M^2 q^2} \left(1 + \frac{4}{M^2 q}\right) \frac{dq}{dR} = 0 \quad (7)$$

式中: $E\{A_b\}$ 是系统误差的期望; R 是散斑半径; q 表示单个散斑的灰度梯度平方和。

1.3 散斑投影系统设计

本文的散斑投影系统包括了两个相机和一个用于投射散斑图案的 LCD 投影仪, 使用计算机模拟出散斑图案, 通过投影仪投射到物体上, 被照射的部分成像到两个同步的黑白相机上。通过 DIC 算法得到纸页的全场形貌分布。若要测得纸页厚度, 通过求出纸页的变化量即可获得。

散斑图案是系统设计的重要影响因素。通常可以通过喷涂、印刷、蚀刻、光刻等方法制作随机分布的黑白斑点, 形成散斑场。但上述制斑方法工序较复杂, 且有些会对结构表面造成损伤。对于纸页厚度测量, 上述制斑方法也不太恰当, 故本文采用了一种投影散斑的方法, 对纸页厚度进行测量, 同时, 因为该方法产生的散斑图案是用计算

机模拟出来的, 具有散斑图案尺寸, 散斑颗粒数目, 半径大小, 密度可调的特点。具体测量原理的流程图如图 2 所示。

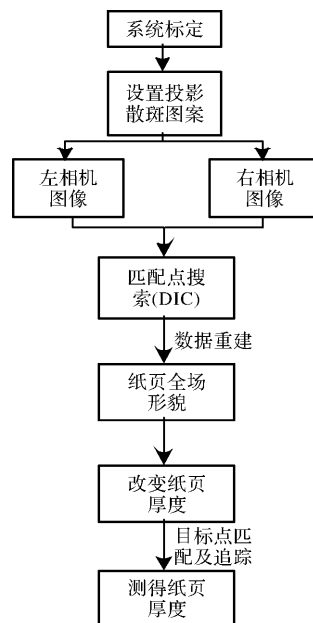


图 2 测量流程图

Fig. 2 Flow chart of measurement

在测量过程中, 位移场的准确测量是 DIC 技术中的关键, 因为形貌和厚度的测量均基于位移数据; 准确确定各点在发生位移变化后图像中的位置, 是准确获得纸页厚度的基础。为解决镜头畸变等因素在不同点引起附加图像位移, 进而影响纸页的形貌恢复和厚度测量的问题。系统标定^[14]至关重要, 采用张氏标定法^[15]对相机进行标定, 得到两台相机的内外部参数和畸变参数。然后, 将设置好参数的散斑图案通过投影仪投射到一叠崭新平整的被测纸张表面, 使用左右相机连续进行图像同步采集作为基准, 并进行匹配点搜索, 得到纸页全场形貌分布, 其中, 左右相机采集时调整好相机拍摄角度、焦距及照明光强, 以免匹配点搜索误差影响纸页形貌恢复结果。最后从这叠纸中抽出最上层一张, 产生纸页厚度变化, 进行图像采集并进行目标点的匹配及追踪。得到其变化量即得到纸页厚度。

2 实验及结果

2.1 散斑图案影响

实验通过调整散斑图案的参数来获得最佳的纸页全场分布及纸页厚度。如上文所述, 散斑质

量的好坏主要与散斑的统计特性及散斑基元本身的性质决定。散斑基元的形状可以是三角形、正方形、多边形和圆形等,考虑到各向同性,选用圆形散斑颗粒进行研究。

散斑占空比选取 50%,再通过调整散斑的直径大小达到理想的实验效果,图 3 给出散斑图案质量对 200 g 的双铜纸纸页形貌全场空间分布的影响。

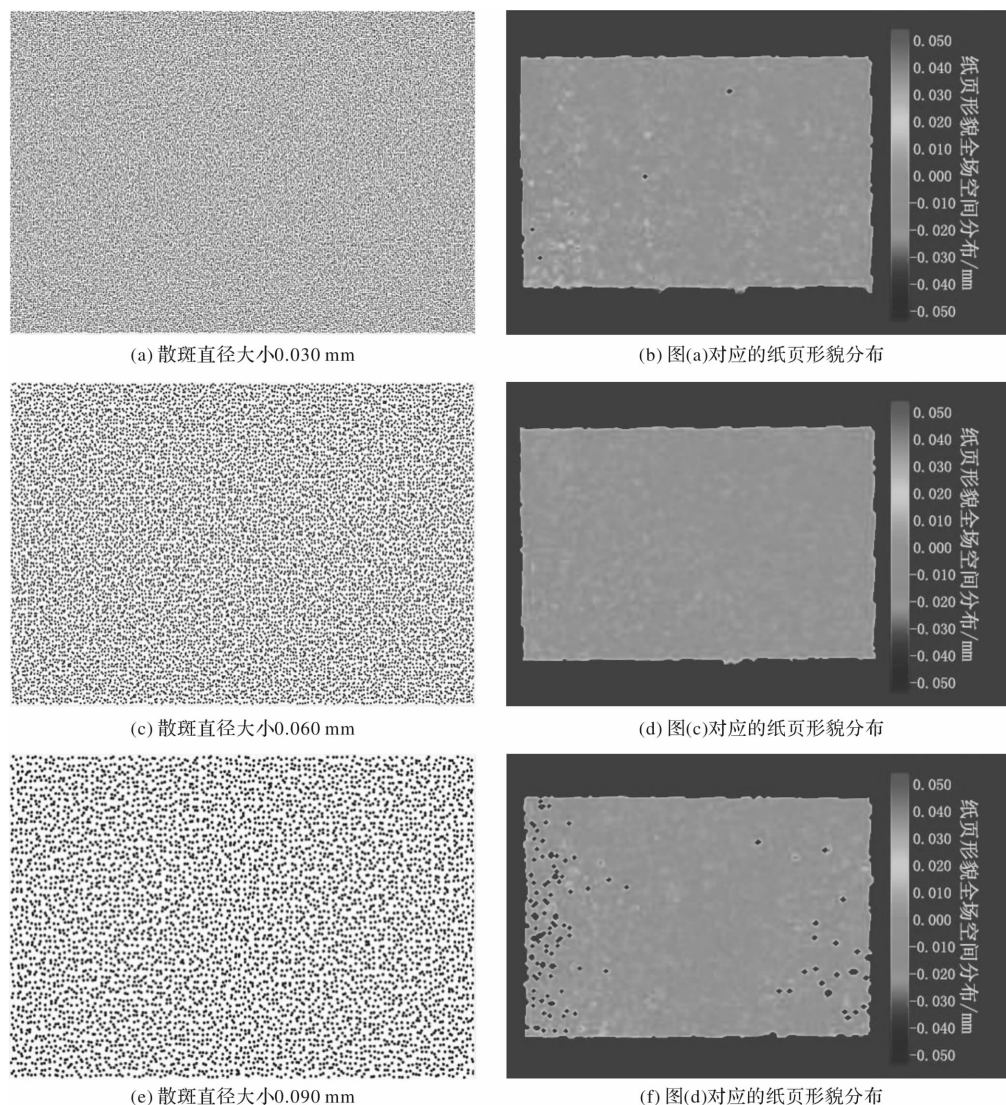


图 3 散斑图案质量影响

Fig. 3 Effect of speckle pattern quality

通过投射图 3(a)所示的散斑图案,得到的纸页全场形貌分布为图 3(b),可以看出,得到的全场形貌图中部分区域没有数据,呈现空洞的现象。实际上,是因为太过细密的散斑导致插值偏差过大,系统误差过大,造成纸页的全场形貌分布结果出现误差。因此,我们增大散斑图案的直径到 0.060 mm,投射如图 3(c)所示的图案,得到的纸页全场形貌分布图如图 3(d)所示。除去图像边缘有一定噪声影响外,能得到较好的纸页形貌的全场分布。若继续增大散斑图案的直径如图 3(e),

会导致图像噪声变大,随机误差变大,以致于 DIC 算法匹配效果不好,得到如图 3(f)中较差的纸页形貌分布。

可以看到,纸页各点的形貌分布有些许差异,为得到更加直观精确的纸页全场分布信息,沿图 4 中所示黑线方向得到纸页沿该线段的空间分布。

从曲线图可看出,纸页的全场分布存在一定的不均匀性,但最大误差不超过 0.01 mm。这是由于实验条件及造纸工艺本身存在误差,使得纸页存在一定的不平整性。同时,系统标定及匹配

点搜索也会对其造成影响,但总体来说,本系统能够基本达到传统的纸页厚度测试仪 0.01 mm 的分辨率。并且该方法能对纸页的全场分布进行直观的评估。

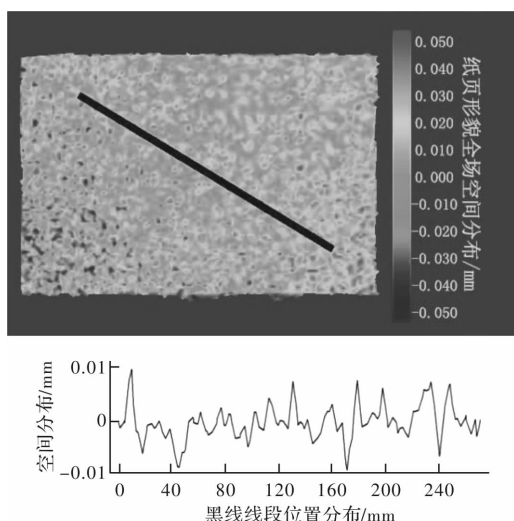


图4 纸页形貌空间分布

Fig. 4 Full-field spatial distribution of paper sheet's contour

2.2 纸页厚度测量实验

我们采用 200 g 的双铜纸进行厚度测量,其名义厚度为 18 丝,即 0.180 mm。调整好实验系统后开始测量,首先使用一对相机连续进行一叠纸页图像同步采集作为基准,得到的纸页全场形貌分布如图 5(a),从该叠纸页中减少一张后,再进行图像采集,得到全场形貌分布如图 5(b)所示。结果表明,测得该叠纸页由 0 变为 -0.177 mm,变化量为 0.177 mm,即纸页的厚度为 0.177 mm,同时,本方法得到了较好的纸页的全场形貌分布结果。

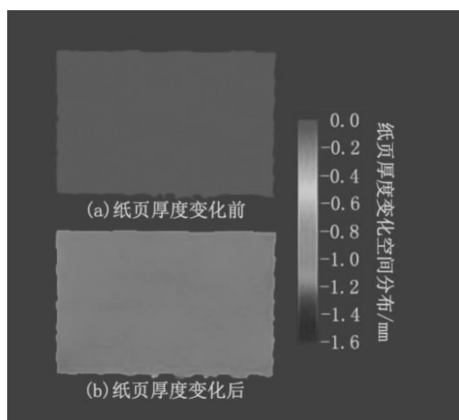


图5 纸页厚度变化分布图

Fig. 5 Variation of paper sheet thickness

为验证实验的准确性,重复以上操作 8 次,每次减少一张纸,得到的纸页厚度变化及全场分布

如图 6 所示。除了纸页的四周有一些噪声外,较好地得到了纸页全场性的厚度变化。

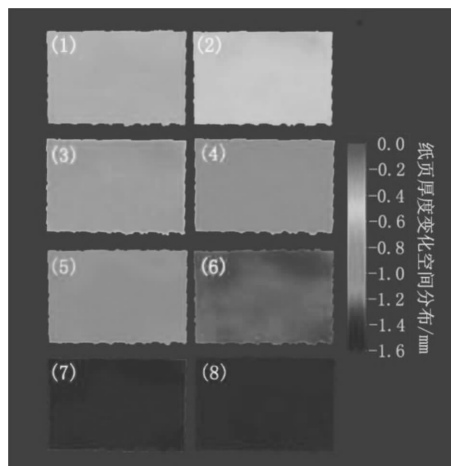


图6 纸页厚度变化连续测量

Fig. 6 Continuous measurement of changes of paper sheet thickness

为获得更精确的数据,在保持光学系统及散斑图案参数不变的情况下,重复上述操作 3 次。并计算纸页厚度测量值和名义厚度值的相对误差,得到的结果如图 7 所示。

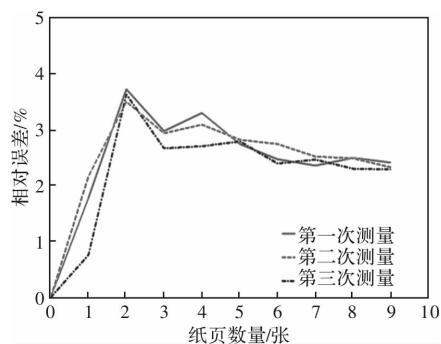


图7 实验测量误差

Fig. 7 Experimental measurement error

可以看出,3 次实验结果有较好的一致性,其相对误差值在 4% 以内。其中,误差来源主要包括名义值与真实值的差别,人为操作及实验条件限制。同时,实验中人为地抽掉一叠纸页中的一张,会使这叠纸的平整度受到影响,为后续的纸页厚度测量带来误差,但总体上来说,本方法是一种有效的纸页厚度测量方法,能够精确测定纸页的厚度及全场分布。

3 结论

本文提出了一种纸页厚度在线检测的新方法,该方法利用投影散斑相关的理论,对纸页厚度

进行了有效的测量,解决传统纸页厚度检测只能测量纸页某一点的不足。实验结果表明,本文所介绍的方法结构简单,操作方便,测量相对误差在 4%以内,并具有能测出纸页的全场形貌的优点,丰富了纸页测量的方法。

参考文献:

- [1] ZHAO Shulei, DING Xiaotian, LIU Guifang. The development and trend of online measurement techniques for paper caliper [J]. China Pulp & Paper Industry, 2011, 32 (14): 6-10.
赵树雷,丁笑天,刘桂芳. 纸页厚度在线检测技术的发展与趋势[J]. 中华纸业, 2011, 32(14): 6-10.
- [2] MATTLA P, STOR-PELLINEN J, IGNATIUS J. Capacitive ultrasonic transducer with net backplate [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11 (8): 1119-1125.
- [3] LIU Jin, YANG Haima, ZHANG Jing. Study on online thickness measurement method based on CCD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1217-1218.
刘瑾,杨海马,张菁. 基于 CCD 的在线厚度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1217-1218
- [4] MOUSAVI P, HARAN F, JEZ D, et al. Simultaneous composition and thickness measurement of paper using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Applied Optics, 2009, 48(33): 6541-6546.
- [5] SU X, ZHANG Q. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48: 191-204.
- [6] WANG Yonghong, DAN Xizuo, LI Junrui, et al. Multi-perspective digital image correlation method using a single color camera [J]. Science China-Technological Sciences, 2018, 61(01): 61-67.
- [7] YANG Jing, WU Sijin, ZHENG Weiwei, et al. Full-field measurement of micro strain of printed circuit board assembly using digital image correlation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11): 41-48.
杨靖,吴思进,郑伟巍,等. 数字图像相关用于印刷电路板全场微应变的测量[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 41-48.
- [8] LECOMPTE D, SOL H, VANTOMME J, et al. Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6341: E1-E6.
- [9] PAN B, XIE H M, WANG Z Y, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. Optics Express, 2008, 46 (3): 033601.
- [10] CHEN Z, SHAO X, XU X, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency [J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 884-893.
- [11] HUA T, XIE H, WANG S, et al. Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuate-on [J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43: 9-13.
- [12] SU Y, ZHANG Q, XU X, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 132-142.
- [13] SHAO X, DAI X, HE X. 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
- [14] CHEN Zhenning, LIU Cong, HE Xiaoyuan. Effect of calibration on 3D shape and deformation measurement in digital image correlation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 1050-1054.
陈振宁,刘聪,何小元. 数字图像相关方法中的标定对三维形貌和变形测量的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 1050-1054.
- [15] ZHANG Zhengyou, A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.