

文章编号: 0253-2239(2006)02-0197-5

高精度数字图像相关测量系统及其技术研究

杨 勇 王琰蕾 李 明 陈大庆 顾济华 姜锦虎

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘要: 研制双 CCD 长距显微数字图像相关测量系统, 它融合光电子、数字图像相关方法和散斑技术于一体, 具有非接触式、高精度、宽量程、准实时、测试方法简便等优点, 它可用于材料力学性能(特别是柔性高分子材料力学性能)测量、低膨胀系数新型材料线胀系数等的测量。若将其用于应变测量, 灵敏度优于 $1 \mu\epsilon$, 而传统数字图像相关方法测量应变的理论灵敏度为 $20 \mu\epsilon$ 。利用列阵光学元件解决了 0.05 mm 高衬比度微小标记的方便设置; 提出消除了数字图像灰度噪声的时间平均法, 使相关测量精度稳定地达到 0.01 pixel 。还给出金属材料拉应变的测量结果, 实验结果与经典理论值相当接近。此外, 还阐述数字图像相关测量技术是一种超光学系统衍射极限分辨力的测量技术。

关键词: 光学测量; 双 CCD 长距显微镜; 数字图像相关; 应变测量

中图分类号: TH741 文献标识码: A

Research of High-Accuracy Digital Image Correlation Measurement System

Yang Yong Wang Yanlei Li Ming Chen Daqing Gu Jihua Jiang Jinhu

(Physics Department, Soochow University, Suzhou 215006)

Abstract: A new high-accuracy digital image correlation measurement system based on double long-focus CCD microscope is presented. Combining photoelectric, digital image correlation and speckle technology, it has advantages of non-contact measurement, high accuracy, wide range, quasi real time, convenient operation, and can be used to measure mechanical property of materials (especially flexible high molecular synthetic materials) and linear expansibility of novel low expansibility material. Sensitivity is less than $1 \mu\epsilon$ when the system is used in strain measurement, while the theoretical sensitivity of conventional digital image correlation technology is $20 \mu\epsilon$. Array optical element is used to set the micro high contrast mark of 0.05 mm . Time-average method is used to eliminate the gray noise of digital image and makes the correlation measurement accuracy achieve 0.01 pixel stably. Experimental result of the tension stress measurement for metal material is listed, and the result shows the accordance with the theoretical value. Moreover, digital image correlation measurement method is described as a measurement technique which has better resolution than Rayleigh criterion.

Key words: optical measurement; double CCD long-focus microscope; digital image correlation; strain measurement

1 引 言

1982 年, Yamaguchi^[1] 和 Peters^[2] 各自提出了数字图像相关测量技术。Gong Maohan^[3] 在对激光散斑相关性和位移的关系研究的基础上指出白光比激光更适合数字图像相关运算。此后为提高测量精度, 就亚像素技术提出了双线性插值法、样条函数法、

多项式法以及形心法等多种方法。理论上相关插值精度达到 0.01 pixel , 有的甚至达到 0.001 pixel , 但实际上在实测中很难达到 0.01 pixel , 其原因主要来自数字图像灰度噪声。在对数字散斑相关测量中的噪声进行实验研究的基础上提出了数字散斑相关测量系统抗噪声干扰能力的判据^[4], 从理论上给出了降低噪声影响提高相关测量精度的途径并为实验证

作者简介: 杨 勇(1974~), 男, 江苏无锡人, 实验师, 硕士研究生, 主要从事数字散斑相关测量、实验力学的研究。

E-mail: yangy@suda.edu.cn

收稿日期: 2005-04-04; 收到修改稿日期: 2005-06-08

实^[5],加上本文提出的消除时间灰度噪声的技术,使相关测量精度稳定地达到 0.01 pixel。数字图像相关测量方法获得了较广泛的应用^[6~10]。

将数字图像相关测量技术应用于高精度的应变测量需解决下述三方面的困难:1) 数字图像相关测量的理论精度为 $20 \mu\epsilon$ 左右,即应变测试标识成像在 CCD 靶面上如果占 500 pixel,那理论插值精度为 0.01 pixel,可计算出其应变测量精度为 $20 \mu\epsilon$,实际测量为 $100 \mu\epsilon$ ^[11]。2) 方便地在被测件上设置微小的标记,标记的线度为 0.05 mm 左右,且标记的数字图像要有较好的衬比度,衬比度差将影响相关测量精度,标记若大,将增加相关运算时间。3) 消除噪声影响,使相关测量精度达到 0.01 pixel。

本文采用双镜头长距显微数字图像相关测量系统,使应变测量灵敏度可优于 $1 \mu\epsilon$ 。用列阵光学元件使微小标记可方便设置,且图像有较好的衬比度。用时间平均法采集图像有效地消除了数字图像灰度噪声的影响,大幅度地提高了相关系数和相关测量精度,从而实现测量灵敏度 $1 \mu\epsilon$,应变测量范围为 $1 \sim 10000 \mu\epsilon$ 。

2 系统装置

高精度数字图像相关应变测量系统的配置如图 1 所示,用两只环形 LED 光源分别均匀照对被测件上的标记 1 和 2,标记 1 和 2 之间的区域为被测应变的区域。两只可变焦长距显微镜分别将标记 1 和 2 成像在 CCD1 和 2 的靶面上,靶面上的像和物大小比例在 1:1 左右可连续调节。CCD 将光强信号转换成视频信号,两路 CCD 信号连接到视频信号切换器,利用视频信号切换器可将两路信号来回切换,把所需信号送入图像采集卡,视频信号由图像采集卡进行模数转换后形成数字灰度图像存储在帧存储器中,由计算机进行相关运算,计算出标记的位移和

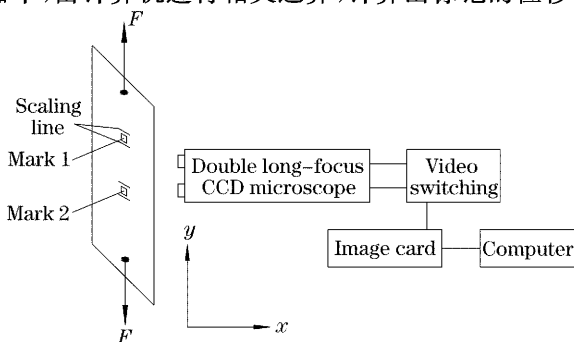


图 1 系统示意图

Fig. 1 Sketch of the system

试件应变值。

CCD 为 $795 \text{ pixel} \times 596 \text{ pixel}$ 的: MINTRON 23K9HC 型、图像卡为 OK-M10F 黑白图像采集卡,成像为 $758 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel} \times 8 \text{ bit}$,图像传递速度为 25 frame/s,衬比度、亮度软件可调,采集窗口可调。

3 相关测量原理

进行数字图像相关运算时假定:白光光源照明物体时,物体表面反射光强 $I(x, y)$ 的分布与物体表面有一一对应关系。据此,可以通过测量物体表面光强的变化来得到物体应变的信息,对于本文所报道的应变测量系统可应用于万能试验仪和混凝土构件卸载的应变等,所测的应变是较大尺寸(例如 100 mm)的平均应变。通常在 100 mm 的两端各设置一个标记。

采集、存储构件变形前和变形后的图像,在未变形前参考图像上以标记中心为中心位置取一子区,该子区用像素的灰度矩阵描述,将其作为样本图像。然后通过软件将样本图像在变形后图像上对目标图像进行相关搜索运算。由于样本图像对应的实际尺寸很小,互相关系数可仅看作与子区中心在方向的位移有关,它可表述为

$$C_L(u, v) = \frac{\langle I \cdot I' \rangle - \langle I \rangle \cdot \langle I' \rangle}{[\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle \cdot \langle (I' - \langle I' \rangle)^2 \rangle]^{1/2}}, \quad (1)$$

I 和 I' 分别对应样本图像和目标图像的数字灰度图。

相关搜索得到一系列 C_L , $C_L = C_{L_{\max}}$ 对应的搜索距离分别为标记中心的两个位移分量 u, v 。该搜索的步长为 1 pixel,其测量精度较差。为提高测量精度,本文采用双线性插值进行亚像素提取,实现 0.01 pixel 亚像素提取。 u, v 分别为

$$u = mM, \quad v = nM, \quad (2)$$

式中 m, n 分别为标记中心变形前后位移的像素数, M 为靶面上一个像素对应物上的线度,单位 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。我们称 M 为数字图像的放大率或定标。

4 超光学系统衍射极限分辨力的测量技术

根据瑞利判据,光学成像系统的衍射极限分辨力为

$$\delta = 0.61\lambda / (NA), \quad (3)$$

即光学系统点扩展函数宽度之半,如图 2(a) 所示。

式中 NA 为数值孔径, δ 通常为几个微米(1:1 成像)。在数字图像成像中,分辨力除计及光学系统外,还要计及 CCD 和图像卡的传递函数,从而使系统的点扩展函数大大增宽,根据大量测试约为 6~10 pixel。即系统的分辨力为 3~5 pixel,也就是 18~30 μm 。

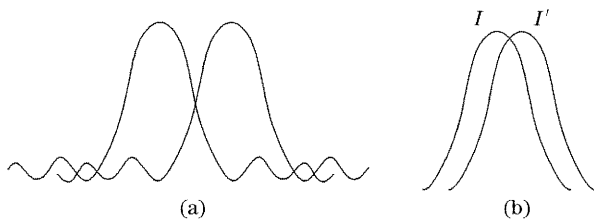


图 2 (a) 瑞利衍射分辨力, (b) 相关运算分辨力

Fig. 2 (a) Rayleigh resolution and (b) correlation calculation resolution

本测量系统中,采用数字图像相关方法,其运算基础是子区(样本图像)的灰度值,只要灰度图 I 发生位移,就可通过相关搜索求出,如图 2(b) 所示。实际的相关测量系统的分辨力受下述因素影响而下降:1) 噪声,2) 振动,3) 灰度级 8 bit 量化。本系统的位移分辨力为 0.01 pixel,即 0.06 μm 。可见数字相关测量系统的分辨力要远优于数字图像成像和光学成像系统的分辨力。

可以预计,随着进一步的研究和开发,数字图像相关测量技术将成为新一代的光学测量技术,它有着巨大的开发和应用潜力。

5 数字图像的灰度噪声对相关测量的影响

对相关测量中的噪声进行了实验研究^[11],研究指出,在一般情况下,由于噪声的影响相关搜索精度达不到 0.01 pixel,一般为 0.1~0.2 pixel。从理论上讨论了数字相关测量系统抗噪声干扰能力的判据:样本图像 $I_0(x_j)$ 的自相关系数,在 $x_i=0$ 附近的变化率越大,系统抗噪声干扰能力就越强。根据该理论,文献[6]从理论和实验两方面给出了如何对系统进行配置,以及如何选择参量来提高相关系统抗噪声干扰的能力,从而降低了噪声对相关测量精度的影响。测量得到的数字图像的灰度噪声主要来源于 CCD 的噪声、图像卡噪声和由于环境振动使像素接收到的光强发生起伏而表现出的噪声。若对图像任一点连续采样 100 次(采样过程中光照度等条件均保持不变),其灰度值在平均值附近有起伏,称这

类噪声为时间噪声。在系统参量选择适当时,其最大灰度值和最小灰度值相差约 10 个灰度级。表 1 给出对五个不同亮度的像素连续采样 100 次的灰度平均值、最大值、最小值和最大值与最小值的偏差。

表 1 数字图像的灰度噪声

Table 1 Gray noise of digital image

	1	2	3	4	5
Average	255	149	103	151	171
Max	255	154	107	155	175
Min	255	145	101	148	166
Deviation	0	9	6	7	9

按文献[6]要求配置系统参量,对不动的物体连续进行两次单帧采集,对图像中任四个子区进行相关运算,子区大小为 13×13 ,其结果见表 2。

表 2 单帧采集相关运算数据

Table 2 Correlated calculation of single captured image

Coefficient c	u / pixel	v / pixel
0.991425	-0.05	0.03
0.989325	-0.06	0.07
0.983235	-0.02	0.04
0.998262	-0.03	0.02

如果在按文献[6]要求配置系统参量的基础上,对不动物体连续进行两次多帧图像采集取平均(例如 100 次)我们称作时间平均法。仍对表 2 的四个子区进行相关运算,其相关运算结果见表 3。

表 3 100 次平均相关运算数据

Table 3 Correlated calculation of average captured image

Coefficient c	u / pixel	v / pixel
0.999784	0.00	0.00
0.999624	0.00	0.00
0.999920	0.00	0.01
0.999846	0.01	0.00

由表 2 和表 3 显见,单帧采集进行相关运算存在虚假位移分量 u, v ,而相关测量精度由虚假位移分量决定,时间平均法的相关测量精度较高,可达到 0.01 pixel。

时间平均法的相关系数优于单帧采集。

根据概率统计理论知平均法对噪声影响的消除作用跟采样次数 N 的平方根成反比,计及对噪声影响的消除效果和采样时间、计算时间,我们采用 100 次平均。实验研究表明 100 次平均已足以消除影响,很好地提高了相关运算结果。

6 定标和标记设定

如图 1 所示,在被测物上设置定标线和标记,两

定标线的距离为 d , 用数字图像相关运算方法测量 d 所占的像元数 n , 则系统的放大率 M 为

$$M = d/n, \quad (4)$$

其单位为 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

设长距显微 CCD 摄像头的放大率为 1, CCD 的一个像素线度为 $6 \mu\text{m}$, 采样子区的大小为 $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$ 。由于该数字图像系统的点扩展函数的底宽为 6 pixel , 也就是说标记物的线度最好小于 7 pixel (即 $42 \mu\text{m}$), 且它被照明后能产生衬比度较好的图像。这些决定了不能在试件上划线或设置微小光源。为此, 本文采用随机阵列光学元件, 它是由玻璃微珠在平面内紧密排列成阵构成。常见的玻璃微珠阵列光学元件有两种形式: 一种是玻璃微珠的一半浸没在塑料或树脂材料中, 两者折射率相等, 下面蒸镀铝反射层; 另一种是高折射率材料的玻璃微珠, 全部浸没在低折射率的塑料或树脂材料中, 下面蒸镀铝反射层。本文采用后者。玻璃微珠的线度一般为几微米至数十微米, 满足了标记物大小的要求, 阵列光学元件的后向散射特性使玻璃微珠能产生衬比度较好的图像。由于玻璃微珠的随机排列, 因此由它产生的数字图像是一幅人造数字散斑图像, 如图 3 所示, 它保证了任意选定的采样子区的灰度图像在其邻近区的唯一性, 使相关测量成为可能。

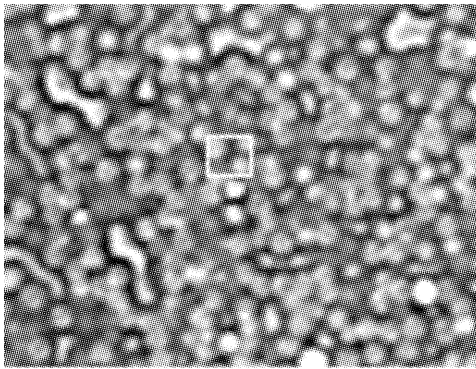


图 3 标识数字散斑图

Fig. 3 Digital speckle gray map of mark

7 相关测量的可靠性

将设有定标线和标记试件安装在精密平动台上。平动台的读数精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。用移测显微镜测得两定标线间距为 3.96 mm , 用数字图像相关方法测得它在靶面上的间距为 461.55 pixel , 计算得数字图像相关测量系统的放大率 $M=8.58 \text{ mm}/\text{pixel}$ 。标记每平动 0.1 mm (手动检测) 采集一帧图像, 将相邻两帧图像作相关运算, 其测量结果如表 4 所示。

可见用数字图像相关方法测量位移是可靠的。应变测量基于位移测量, 所以应变测量也是可靠的。

表 4 平动测量

Table 4 Translation measurement

Translation displacement $u/\mu\text{m}$	pixel μ'	Displacement $u/\mu\text{m}$	Percentage error
100	11.68	100.21	
100	11.53	98.93	
100	11.63	99.79	
100	11.69	100.30	0.21%
100	11.56	99.18	
100	11.68	100.21	
Average	11.63	99.79	

8 应用举例

我们将本系统运用于应变测量, 为考核本系统测量可靠性, 特选取金属材料进行拉伸应变测量。其测量原理如下。

图 1 中标记 1 和 2 之间的区域为被测应变区域, 其间距为 l 。试件受载前 (例如拉伸) 长距显微 CCD 摄像头 1 和 2 分别对标记 1 和 2 采集数字图像, 计为第 1 帧和第 2 帧。受载后再各采集图像, 计为第 3 帧和第 4 帧。第 1 帧和第 3 帧作相关运算, 得标记 1 的位移 u_1 , 2、4 两帧作相关运算得标记 2 的位移 u_2 , 的变形量为 $\Delta l = u_1 - u_2$, 于是应变为

$$\epsilon = (u_1 - u_2)/l, \quad (5)$$

取长为 250 mm , 宽为 37.7 mm , 厚 5 mm 的铝板。在铝板中部轴线上相距 100 mm 两点处带定标线的标识 (如图 1 所示)。两定标线相距 4 mm 。系统对定标线和标识聚焦成像。加载前先测量系统的放大率 M ; 相关运算得定标线在数字图像中所占的像素数为 469.015 , 读数显微镜测定标线中心距为 4.02 mm , 故 $M=8.57 \text{ mm}/\text{pixel}$ 。试件每增加载荷 72.6 N , 双 CCD 长距显微镜分别对标识 1 和 2 各采集一帧图像, 然后将各帧数字图像跟零载荷数字图像作相关运算, 按上述应变原理计算出应变, 如表 5 所示。实验值跟理论值吻合得相当好。

表 5 应变测量结果

Table 5 Result of stain measurement

Force F/N	Theoretical value of strain $\epsilon/\mu\epsilon$	Measured value of strain $\epsilon/\mu\epsilon$
72.6	5.5	5.7
145.2	11.0	12.0
217.8	16.5	17.0
290.4	22.0	23.0

9 结 论

本研究表明,双长距显微数字图像相关测量系统可用于应变的高精度测量,其灵敏度优于 $1 \mu\epsilon$ 。用玻璃微珠列阵光学元件成功地解决了 0.05 mm 高衬比度微小标记的方便设定。采用时间平均法有效地消除了数字图像灰度噪声(由 CCD、图像卡和环境振动等)对相关测量精度的影响,使相关测量精度能稳定地达到 0.01 pixel。该系统是融光电子、数字图像相关方法、散斑计量和数字图像处理等多种技术于一体的现代光学测量系统。它具有非接触式、高精度、可视化、数字化和测试方法简便等优点,且无需特殊隔振装置(全息法、云纹干涉法需在全息防震台上测试)。它适用于工程应变测量,特别是在柔性高分子材料(例如高分子聚化物)的应变、蠕变、力学性能和热性能的研测方面,比传统电测法和近年发展起来的光纤传感器法^[12]具有不可取代的优点。此外,在低膨胀系数新型材料线胀系数测量和微电子器件热变形显微研测等方面均有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Yamaguchi. Simplified laser-speckle strain gauge [J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 436~440
- 2 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital imaging techniques in experiment[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~431
- 3 Gong Haohan, Liu Chen, Chen Daqing *et al.*. Relation between laser speckle and displacement[J]. *Acta Optic Sinica*, 2001, **21**(2): 211~214 (in Chinese)
龚浩瀚,刘 诚,陈大庆等. 激光散斑相关性和位移的关系研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 211~214
- 4 Liu Chen, Jiang Jinhui, Shen Yongzhao. A noise immunity criterion of digital speckle measurement system[C]. *Shanghai Mechanics*, 1996, **17**: 110~113 (in Chinese)
刘 诚,姜锦虎,沈永昭. 数字散斑相关测量系统抗噪声干扰能力的判据[C]. *上海力学*, 1996, **17**: 110~113
- 5 Jiang Jinhui, Wang Haifeng, Liu Chen. Research for relationship of digital speckle measurement and antinoise ability[C]. *Modern Mechanics Testing Technology*, South China University of Technology Press, 1998. 294~297
- 姜锦虎,王海凤,刘 诚. 数字散斑图跟相关测量系统抗噪声抗干扰能力关系的研究[C]. *现代力学测试技术*, 华南理工大学出版社, 1998. 294~297
- 6 Dai Yapin, Zhu Jianqiang, Jiang Jinhui *et al.*. Precision target positioning by digital speckle correlation measurement[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(2): 135~139 (in Chinese)
- 戴亚平,朱健强,姜锦虎等. 用相关测量技术实现精确靶定位技术研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2): 135~139
- 7 Gong Haohan, Jiang Jinhui, Chen Daqing. Displacement measurement by grid digital image correlation [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2000, **15**(2): 246~252 (in Chinese)
龚浩瀚,姜锦虎,陈大庆. 网格数字图像相关方法测量位移场的研究[J]. *实验力学*, 2000, **15**(2): 246~252
- 8 Yang Guobiao, Fang Ruhua, Ding Zuquan *et al.*. Analysis for measurement precision of projection speckle correlation method [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2000, **15**(2): 340~345 (in Chinese)
杨国标,方如华,丁祖泉等. 投影散斑相关法测量精度影响因素的综合分析[J]. *实验力学*, 2000, **15**(2): 340~345
- 9 Yang Guobiao, Jiang Jinghu. Application and study of measurement for front and trailing axes distances of CJ6120LC6HK carriage with digital correlation method [J]. *Chinese Quarterly Mechanics*, 2002, **23**(1): 136~139 (in Chinese)
杨国标,姜锦虎. 数字相关方法在测量 CJ6120LC6HK 型客车前后轮轴心距离的应用研究[J]. *力学季刊*, 2002, **23**(1): 136~139
- 10 Ji Hongwei, Yang Chuanmin, Qin Yuwen. Determination of stress fields around the interface crack tip of bimaterial using DICM[J]. *Mechanical Strength*, 2001, **23**(3): 312~315 (in Chinese)
计宏伟,杨传民,秦玉文. 双材料高聚物界面断裂行为的实验研究[J]. *机械强度*, 2001, **23**(3): 312~315
- 11 Xiao Jinbiao, Jiang Jinhui, Liu Cheng. The experimental study for noise in digital speckle correlation measurement [C]. *Shanghai Mechanics*, 1996, **17**: 114~117 (in Chinese)
肖金标,姜锦虎,刘 诚. 数字散斑相关测量中噪声的实验研究[C]. *上海力学*, 1996, **17**: 114~117
- 12 Zhu Qirong. *The Application of Fiber Optic Sensor to the Study of Composite Material Structure* [D]. Shanghai Tongji University, 2004
朱启荣. *光纤传感器在复合材料结构中的应用*[D]. 上海: 同济大学, 2004