

文章编号:1001-4888(2006)06-0689-14

数字散斑相关技术进展及应用^{*}

金观昌, 孟利波, 陈俊达, 马少鹏, 张 军

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 数字散斑相关技术是廿世纪末发展的一项光力学测量技术, 历经 20 年各国学者的研究改进积累, 目前已成为一种成熟的测量方法, 并已成功地应用于力学测量中。本文回顾和叙述了这些进展, 并列举在各方面的应用实例以进一步扩展其应用领域。数字散斑相关技术的八个关键问题即: 1. 相关公式, 2. 搜索技术, 3. 亚像素搜索, 4. 散斑图, 5. 减噪, 6. 补偿技术, 7. 位移场至应变场转换, 8. 三维位移场测量。最后将叙述数字相关技术在材料测试、结构模型及实物监测、岩石力学、复合材料性能研究、生物力学等方面的广泛应用情况。

关键词: 数字相关技术; 散斑计量

中图分类号: TN25; TH706; O348.12

文献标识码: A

0 引言

数字散斑相关方法是在上世纪 80 年代初由美国南卡罗来纳大学的 W. H. Peter 和 W. F. Ranson^[1]和日本 I. Yamaguchi^[2]等人同时独立提出的。I. Yamaguchi 在研究物体小变形时, 采用测量物体变形前后光强的互相关函数峰值来导出物体的位移。Yamaguchi 采用双光束照明, 并在照明点法线方向放置图像传感器, 他推导了物体变形与在衍射场中散斑位移的关系, 对加载前后的衍射光场进行互相关运算, 导出位移场并利用这个关系得到了表面应变。该方法可获得的最小应变值约为 20 微应变, 标距 1mm, 测量时间 10s。与此同时, Peter 和 Ranson 则采用电视摄像机记录被测物体加载前后的激光散斑图, 经模数转换得到数字灰度场的相关迭代运算, 也即计算相关系数随试凑位移及其导数的变化过程, 找出相关系数的极值而得到相应的位移、应变, 它是一个二维位移场的测量问题。如上所述, 测量的基本问题是相关两个散斑场, 即变形前的参考场和变形后的变形场。数字散斑相关的一个重要目的是改变照相这种传统的记录方式而代之以光电子记录, 达到方便、实用以及直接计算机处理的目的。数字相关方法(DSCM)从随机的散斑信号中提取位移和应变信号, 它与干涉计量相比具有光路简单、要求测量环境低, 可以在野外应用等优点。所使用的光源可以是激光也可是白光, 散斑可以是激光形成的, 也可以是人工散斑或者某些自然纹理等。在测量范围上也可自由变化, 大至宇宙空间小至电镜纳米变形测量, 对于大变形或微变形的测量尤为有利, 其灵敏度一般可达 0.01~0.05 像素所代表的大小。由于相关方法是对两幅记录的图像进行直接的相关处理, 对于动态测量借助高速视频记录或高速摄影系统也可以实现。

1 相关公式

相关公式是相关运算的关键, 本文列出从文献中提出的多达十种相关公式^[3-22], 为了比较这些公式, 提出了一系列判别指标来比较其性能。十种相关公式如下:

^{*} 收稿日期: 2005-08-24; 修订日期: 2006-07-10

通讯作者: 金观昌(1938-), 男, 清华大学教授、博导, 长期从事光测力学研究。E-mail: jingc@mail. tsinghua. edu. cn

$$\begin{aligned}
C_1 &= -\langle |f - g| \rangle, C_2 = -\langle (f - g)^2 \rangle, C_3 = \langle (f \cdot g) \rangle, C_4 = 1 - \frac{\sum \sum |f - g|}{\sum \sum f} \\
C_5 &= 1 - \frac{\sum \sum (f - g)^2}{\sum \sum f^2}, C_6 = \frac{\sum \sum (f \cdot g)}{[(\sum \sum f^2) \cdot (\sum \sum g^2)]^{1/2}}, \\
C_7 &= \frac{\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)]}{[\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 \cdot \sum \sum (g - \langle g \rangle)^2]^{1/2}}, C_8 = \frac{\langle f \cdot g \rangle - \langle f \rangle \cdot \langle g \rangle}{[(\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2) \cdot (\langle g^2 \rangle - \langle g \rangle^2)]^{1/2}} \quad (1) \\
C_9 &= \frac{N^2 \sum \sum (f \cdot g) - (\sum \sum f) \cdot (\sum \sum g)}{[N^2 \sum \sum f^2 - (\sum \sum f)^2]^{1/2} \cdot [N^2 \sum \sum g^2 - (\sum \sum g)^2]^{1/2}} \\
C_{10} &= C_7^2 = \frac{\{\sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]\}^2}{\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2}
\end{aligned}$$

其中 $f = f(i, j)$, $g = g(i + u, j + v)$ 分别为源点和目标点为中心的散斑图的灰度值; u, v 为其水平和垂直方向位移值; $\langle f \rangle$ 和 $\langle g \rangle$ 为其系综平均值; N 为所计算子域的像素值。

对于所列十项相关公式的进一步分析表明:

$$\sum \sum [(f - \langle f \rangle) \cdot (g - \langle g \rangle)] = \sum \sum (f \cdot g) - \sum \sum (\langle f \rangle \cdot \langle g \rangle) \quad (2)$$

$$\sum \sum (f - \langle f \rangle)^2 = \sum \sum f^2 - (\sum \sum f)^2 \quad (3)$$

代入方程 (2) 和 (3), 可以得到 $C_7 = C_8 = C_9$ 。

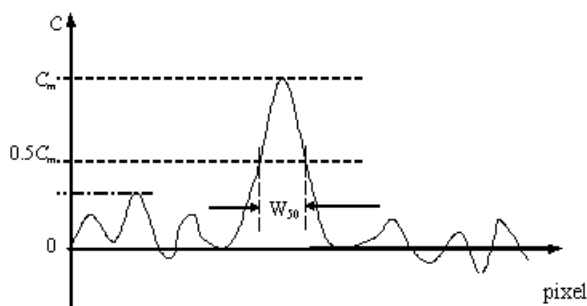


图 1 相关系数分布及三个参数定义图

Fig. 1 Correlation coefficient distribution

为了对这些相关公式进行性能比较,提出了以下四个指标: C_m 为相关最大值; C_{sec} 为次高峰相关系数值; W_{50} 为主高峰在相关系数 0.5 处的宽度; E_{xy} 为平均位移测量的绝对误差。在文献[7]中指出相关系数分布显示出存在单峰最大值 C_m , 相关系数分布及各种参数的定义示于图 1。通常在搜索过程会给出一个阈值以保证搜索到主峰。十分明显, 如 C_{sec} 值越小则越容易确定相关系数最大值 C , 而一个稳定的 C_{sec} 更利于阈值确定; W_{50} 是代表最大主峰的宽

度, 宽度越小峰越尖锐表示一方面找到突起处就可很快到达顶峰, 同时因宽度小, 错判顶峰的几率减小, 因而有利于提高搜索精度和速度; E_{xy} 值是用来评价各种相关公式的测量精度的。对 $C_1 \sim C_3$ 的 C_{sec} 分析表明, 它们随散斑亮度、对比度噪声以及相关尺寸大小影响极大, 其总体性能差, 因此比较工作集中在 $C_4 C_5 C_6 C_7 C_{10}$ 这五组相关公式。

为了比较各种相关公式采用第 4 节所提出的计算机模拟散斑图计算上述指标, 结果列于表 1。由表 1 可见采用相关公式 C_{10} 较为有利。

表 1 五种相关公式的三种参数比较结果

Tab. 1 The results of three parameters with five correlation equations

	C_4	C_5	C_6	C_7	C_{10}
C_{sec}	0.398625	0.608399	0.799550	0.336380	0.155631
W_{50}	4.5986	6.8503	9.7688	5.5915	4.2701
E_{xy}	0.000566	0.001577	0.005438	0.002629	0.002554

2 搜索技术

搜索技术是提高相关运算速度、精度的重要环节, 多年来众多文献^[23-25]提出了许多搜索方法, 由于

篇幅有限本文仅介绍十字搜索和遗传算法二种搜索技术。由于相关系分布呈单一主峰形,因此采用一种十字搜索方法^[7]来代替逐点搜索方法可以大大加快求位移分量 u , v 的处理速度。这种把二维搜索变成二个一维搜索无疑可以大大提高相关处理速度。十字搜索法具体的做法是过被测点 P 作 u , v 轴,以 u 轴为起始轴作等分角为 θ 的射线,在射线上取距离为 d 的若干点作节点,分别按顺序计算这少数节点的 C 值。在找到大于预定的相关系数阈值时(如 $C=0.2$)时,即进入到小范围的单主峰区。下一步是在小范围的单峰区寻找顶点。在上面找到的单主峰区的点 $P_1(u_1, v_1)$ 处固定 $u=u_1$ 的线上寻找最大 C 的位置点 $P_2(u_1, v_2)$, 用计算相关公式得到的 $C(u, v)$ 分布再固定 $v=v_2$, 在这条线上寻找最大 C 的位置点 $P_3(u_2, v_2)$, 这个点很可能就是要找的峰顶位置。为了进一步确认,也可再重复上述过程。对于线上的搜索,还可根据单峰曲线的特点,用对三点 C 值的趋向判断,可以确定是否在峰处或仍在曲线的某一侧,因为在峰顶处将是中间点的 C 最大,而曲线二侧 C 将随 u 或 v 值增大而或增或减,并可以根据增减来判断走向,以使尽快找到峰顶处。十字搜索法将不仅使相关变形测量精度有所提高,而更主要地是可以数十倍地提高处理速度。相类似的一种称为爬山搜索法^[23]亦是另一种节省时间搜索方法。此外应用小波函数的小波多级分解的相关搜索方法^[24]亦被证明是一种快速精确的搜索技术,它十分适用于有噪声和大位移测量。

对于低质量散斑图和大位移测量,由于遗传算法的多点搜索和隐含并行性,可以用来改进数字散斑相关方法的匹配搜索过程。在可以接受的计算消耗下可以获得普通全局搜索方法的精度。遗传算法(GA)的原理是基于问题的最优化描述^[25],取一个点的匹配搜索为例(其余类似),其最优化描述为:存在离散函数 $f(x, y)$ 和 $g(x', y')$, 且:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

其中 $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$ 和 θ 表示图像中像素的平移和旋转,INT 表示取整。对于一个点的特征模板的匹配来说,可以认为 $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$, $\theta=\theta_0$ 为常数。所以,问题的最优化描述为: $\max C[f(x_p, y_p), g(x'_p, y'_p)]$

$$\begin{cases} C = \frac{\{\sum\sum[(f-\bar{f}) \cdot (g-\bar{g})]\}^2}{\sum\sum(f-\bar{f})^2 \cdot \sum\sum(g-\bar{g})^2} \\ \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} = \text{INT} \left\{ \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 \\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

即在一个三维参数空间 (u_0, v_0, θ_0) 中搜索 C 的极值。

GA 实施方案包括编码方案、种群初始化方法、遗传操作以及适应度函数和终止条件的选择。由于本问题需要在三维解空间进行搜索,且要求一定的速度,解空间采用实数编码。在给定一个解空间的范围后,种群采用随机初始化。初始种群的人口数取 150。遗传操作分为三种:选择、杂交和变异。

虽然应用遗传算法可以大大加速搜索过程,但对全场每个被测点进行这样的搜索仍然不可取,实际上这样的做法也是没有意义的。因为,数字散斑相关方法是用来测量物体表面在加载前后的变形场的,根据力学中的连续性假设,变形场中的变形应该是连续的,即使考虑到数字图像的离散化和测点的稀疏分布,相邻测点的位移也不会有较大的差别。如果以前一个测点的精确位移为初值,相邻测点的搜索肯定会落在单峰区内,这时可以采用特殊的简化搜索方法搜索到顶点。在应变较小或者测点较密的时候,甚至可以完全省去整像素水平的搜索。根据以上的分析,提出以下实施方案:

- (1) 在待测区域中布置若干控制点,并用 GA 算法在大范围内精确搜索这些控制点的变形;
- (2) 利用以上控制点的搜索结果计算整个区域的变形分布的趋势,并得到每个被测点的变形的初值;
- (3) 以被测点的变形初值为基础,用特殊的简化搜索方法进行该点最佳匹配的搜索;
- (4) 得到整个被测区域的变形场,进行减噪处理。

为了对 GA 算法的有效性进行验证,将散斑图平移一定的距离,生成另一散斑图($u=20$, $v=-18$),在不同大小的区域分别用 GA 算法和逐点搜索法比较,结果表明,使用遗传算法使 DSCM 方法的单个点大范围搜索的计算消耗降低至少一个数量级。而且,对于 GA 算法,当搜索范围扩大时,计算的消耗的增加并不明显。

此外对较复杂情况,如将散斑图平移一定的距离并旋转一定角度生成另一散斑图($u=20$, $v=-18$, $\theta=-5^\circ$),在这两幅图中搜索变形。普通的逐点搜索法不考虑旋转,变形前后两散斑图上计算窗口的内容由于旋转发生了变化,图像的相关性变差,搜索到的最大相关系数仅为 0.78,数据误差大。而用 GA 算法,在平移和旋转的三维空间搜索,仍然在较小的计算消耗下可以得到正确的结果,由于有对旋转的修正,最大相关系数大于 0.99。这对于亚像素精度的变形测量极为重要。

3 亚像素搜索

亚像素搜索是提高数字相关技术精度的主要手段,在众多文献中普遍认为数字相关精度可达 0.01 像素,但实际上要达到这个指标亦不是十分容易的,其中亚像素搜索是十分关键的。无疑最常用的方法是插值和拟合^[26-29],为了分析上的方便,在本文中介绍的插值法以及拟合法都限于一维的情况。此外基于梯度的算法将提高对小位移测量精度。

3.1 插值

在变形前的图像上取一点 O ,并且找到了 O 点在变形后图像上对应的整像素位移点 O' ,在 O' 点的左右各取若干个对称点,包括 O' 点,计算在这些点上的相关系数,并对这一系列相关系数进行多项式插值,得到以 u 为自变量(若是二维情况,应是以 u, v 为自变量)的连续函数,然后寻找使得 $C(u)$ 取最大值时的 u 值,这即是所求的亚像素位移。采用的插值,分别为三点插值、五点插值和七点插值,插值公式分别如下:

三点插值公式: $C = ax^2 + bx + d$

五点插值公式: $C = ax^4 + bx^3 + dx^2 + ex + f$

七点插值公式: $C = ax^6 + bx^5 + dx^4 + ex^3 + fx^2 + gx + h$

采用由计算机模拟产生的模拟散斑图进行比较,每组散斑图的位移皆是沿 u 方向的。比较结果表明:三点插值的相对误差比较大,如果位移精度要求在 0.1pixel 以下,这种方法基本上是不可取的。当位移小于 0.03pixel 时,五点和七点插值计算的相对误差也相当大,当位移大于 0.03pixel 时,位移误差是可以接受的,特别是七点插值,误差小于 5%。

从相关系数分布曲线来看,其分布规律接近于正态分布,所以可以考虑先对 C 取自然对数,然后再插值。 C 取自然对数后的三点插值、五点插值和七点插值的误差曲线如图 2,从图中可以看到,当位移小于 0.03pixel 时,插值计算方法仍然是不可取的,而当位移大于 0.03pixel 时,五点插值的精度不低于七点插值,这时,可以选用五点插值。对相关系数取对数前与取对数后进行插值的两种方法进行比较表明,相关系数取自然对数后再进行插值,计算的相对误差已明显有所降低。

3.2 拟合

对于 n 个点,如果拟合产生 $(n-1)$ 次多项式,则从理论分析可知,其结果与这 n 个点的多项式插值是相同的。下面进一步讨论,在拟合多项式的次数相同的情况下,选取数据点的分布对精度的影响。在下面的分析中,选取数据点的方法为在已经找到的整像素位移点的左右选取若干个对称点,包括该整像素位移点,计算这一系列点的相关系数,并利用这些点上的相关系数进行多项式拟合,得到以 u 为自变量的连续函数,然后寻找使得 $C(u)$ 取最大值时的 u 值,这即是所求的亚像素位移。仍然使用计算机模拟散斑图的方法,生成 5 组位移是 0.08pixel 的图像,每组两副图。拟合计算的结果如表 2、表 3 所示。

表2 2次多项式拟合的计算结果

Tab. 2 The fit calculations by second-order polynomial

	3点	5点	7点	9点	11点
第1组	0.070	0.054	0.034	0.013	-0.007
第2组	0.072	0.056	0.037	0.022	0.015
第3组	0.076	0.072	0.071	0.072	0.073
第4组	0.079	0.078	0.069	0.056	0.046
第5组	0.076	0.072	0.066	0.058	0.050

表3 4次多项式拟合的计算结果

Tab. 3 The fit calculations by fourth-order polynomial

	5点	7点	9点	11点
第1组	0.076	0.069	0.057	0.044
第2组	0.078	0.070	0.055	0.040
第3组	0.078	0.074	0.073	0.074
第4组	0.081	0.084	0.082	0.075
第5组	0.079	0.077	0.074	0.071

从上述数据可以看到,当拟合多项式的次数是 n 时,数据点数是 $(n+1)$ 时的结果最接近标准位移 0.08pixel,并且比较稳定;当数据点数大于 $(n+1)$ 时,计算结果将产生相当大的偏差。由于对 $(n+1)$ 个数据点进行 n 次多项式拟合,与对 $(n+1)$ 个数据点进行多项式插值是等价的,所以,插值的效果是较好的。

3.3 基于梯度的计算方法

用 I_1 表示变形前的图像, I_2 表示变形后的图像,则有

$$I_1(x, y) = I_2(x + u_0, y + v_0) \quad (6)$$

其中 (u_0, v_0) 为像素点 (x, y) 的位移。为了确定亚像素位移,假设在源图像中像素点为 (x, y) 中心点的子图像 Ω , Ω 是有 n 点的集合,对 Ω 中的第 i 个点 (x_i, y_i) 的位移可表示为:

$$u_i = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i, \quad v_i = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y_i \quad (7)$$

其中: $\Delta x_i = x_i - x$, $\Delta y_i = y_i - y$ 。

$$I_1(x_i, y_i) = I_2(x_i + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i, y_i + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y_i) \quad (8)$$

为了求解方程(8)中的六个未知量,引入 $P = \begin{bmatrix} u_0 & \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & v_0 & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}^T$, 并设计如下迭代过程:

$$\Delta I_i^k = \{c_i\}^k \cdot \{\Delta P\}^k \quad (9)$$

其中 k 表示迭代次数,其余各项意义如下:

$$\begin{aligned} \Delta I_i^k &= I_1(x_i, y_i) - I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k) \\ \{c_i\}^k &= \left[\frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial x} \quad \frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial x} \Delta x_i \quad \frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial x} \Delta y_i \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial y} \quad \frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial y} \Delta x_i \quad \frac{\partial I_2(x_i + u_i^k, y_i + v_i^k)}{\partial y} \Delta y_i \right], \\ (\Delta P)^k &= \begin{bmatrix} \Delta u_0^k & \left[\Delta \frac{\partial u}{\partial x} \right]^k & \left[\Delta \frac{\partial u}{\partial y} \right]^k & \Delta v_0^k & \left[\Delta \frac{\partial v}{\partial x} \right]^k & \left[\Delta \frac{\partial v}{\partial y} \right]^k \end{bmatrix}^T, \\ u_i^k &= u_0^k + \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]^k \Delta x_i + \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]^k \Delta y_i, \quad v_i^k = v_0^k + \left[\frac{\partial v}{\partial x} \right]^k \Delta x_i + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]^k \Delta y_i \end{aligned} \quad (10)$$

对于 Ω 中的每一个点,分别取 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 可以得到 n 个方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1^k \\ \dots \\ \Delta I_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{c_1\}^k \\ \dots \\ \{c_n\}^k \end{bmatrix} \cdot \{\Delta P\}^k \quad (11)$$

采用最小二乘法即可得到式(11)中第 k 次迭代步长 $\{\Delta P\}^k$ 的值,然后可得到第 $k+1$ 次迭代解:

$$P^{k+1} = P^k + (\Delta P)^k, \quad \{P\}^0 = [U \quad 0 \quad 0 \quad V \quad 0 \quad 0]^T \quad (12)$$

这样通过迭代运算,即可得到点 (x, y) 处的位移及其梯度值。上述迭代过程中的初值,可以采用十字搜索法寻找一个整像素位移点 (U, V) , 对于所感兴趣区域中的各测量点,分别重复上述迭代过程,即可得到相应的位移场。梯度法在亚像素搜索精度和速度上有明显优势。

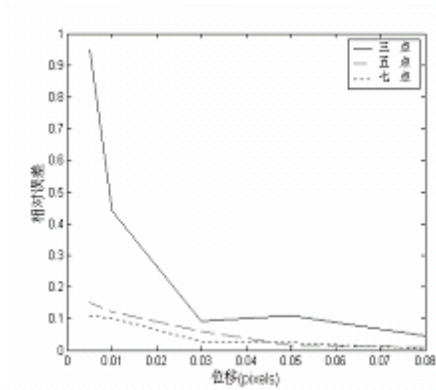


图 2 取自然对数后的插值计算相对误差图

Fig. 2 Error curve of interpolate after log C

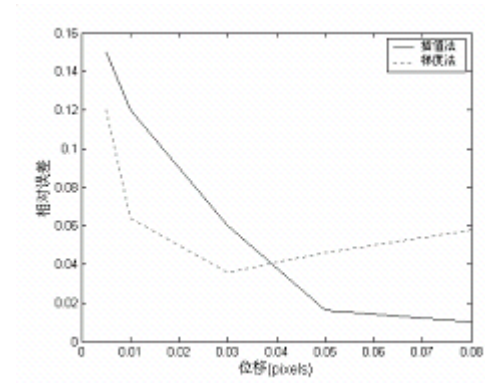


图 3 取对数后五点插值与梯度法的算相对误差

Fig. 3 Error between interpolate and gradient method

4 计算机模拟散斑图及最佳散斑图研究

为了比较相关公式或其它数字相关技术采用计算机模拟散斑图是十分有效的,在文献[17]提出的散斑图模拟简化算法基础上,本文重新考虑加入了各散斑颗粒自身的强度峰值^[30],同时将位移模式细化为:

$U(r) = [U(x, y), V(x, y)]^T = [u(x, y) + u_x(x, y) + u_y(x, y), v(x, y) + v_x(x, y) + v_y(x, y)]^T$
则 CCD 图像经采样量化后在计算机中形成数字图像,可以表示为:

$$f(i, j) = \sum_{k=1}^{SGN} \int_{i \cdot dx}^{i \cdot dx + \alpha \cdot dx} \int_{j \cdot dy}^{j \cdot dy + \beta \cdot dy} I_0(r_k) \exp \left[-\frac{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}{(SGS)^2} \right] dx dy$$

$$g(i, j) = \sum_{k=1}^{SGN} \int_{i \cdot dx}^{i \cdot dx + \alpha \cdot dx} \int_{j \cdot dy}^{j \cdot dy + \beta \cdot dy} I_0(x_k, y_k) \cdot \exp \left[-\frac{(x - U(x, y) - x_k)^2 + (y - V(x, y) - y_k)^2}{(SGS)^2} \right] dx dy$$

其中, dx, dy 为像素大小; α, β 为采样循环,为简化这些数均取值 1。

引入高斯误差函数 erf , 数值模拟方程可最终表达为:

$$f(x_i, y_j) = \frac{1}{4} \pi (SGS)^2 \sum_{k=1}^{SGN} I_0(x_k, y_k) \left\{ \left[erf \left(\frac{x_i - x_k}{SGS} \right) - erf \left(\frac{x_{i+1} - x_k}{SGS} \right) \right] \right. \\ \left. \times \left[erf \left(\frac{y_j - y_k}{SGS} \right) - erf \left(\frac{y_{j+1} - y_k}{SGS} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$g(x_i, y_j) = \frac{1}{4} \pi (SGS)^2 J \sum_{k=1}^{SGN} I_0(x_k, y_k) \left\{ \left[erf \left(\frac{[1 - u_x(x_i, y_j)] \cdot i - u_y(x_i, y_j) \cdot j - x_k - u(x_i, y_j)}{SGS} \right) \right. \right. \\ \left. - erf \left(\frac{[1 - u_x(x_i, y_j)] \cdot (i+1) - u_y(x_i, y_j) \cdot (j+1) - x_k - u(x_i, y_j)}{SGS} \right) \right] \\ \times \left[erf \left(\frac{[-v_x(x_i, y_j) \cdot i + [1 - v_y(x_i, y_j)] \cdot j - y_k - v(x_i, y_j)]}{SGS} \right) \right. \\ \left. - erf \left(\frac{[-v_x(x_i, y_j) \cdot (i+1) + [1 - v_y(x_i, y_j)] \cdot (j+1) - y_k - v(x_i, y_j)]}{SGS} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

其中 i, j 根据图像分辨率循环, J 为雅克比行列式:

$$J = \det \begin{vmatrix} 1 - u_x(x_i, y_j) & -u_y(x_i, y_j) \\ -v_x(x_i, y_j) & 1 - v_y(x_i, y_j) \end{vmatrix}$$

在生成模拟图时,可以根据需要通过预先给定不同的参数对散斑图加以控制,最后转化为 256 灰度级。应用上述计算机模拟散斑图对计算精度和灵敏度产生影响的诸多影响因子(如散斑图中散斑颗粒的大小、散斑颗粒的数目和平均密度等)进行了定量的研究。得出结论如下:

1) 计算子窗口从 11×11 像素到 21×21 像素收敛速度很快,大于 21×21 像素后精度显著提高;计算子窗口大于 51×51 像素后,计算速度明显减慢;最佳计算子窗口大小范围是 $31 \times 31 \sim 51 \times 51$ 像素;

2) 散斑颗粒大小对计算结果有较明显影响,按最大最小值考虑,对3~6像素平均大小散斑颗粒的计算结果很理想;计算子窗口大小与最佳精度下散斑颗粒大小范围上限之间存在0.165倍关系;

3) 散斑颗粒数量变化和散斑颗粒平均分布密度变化对计算结果影响很小。

5 小波减噪^[31-33]

减噪亦是提高相关运算精度的一项措施,数字相关方法的分析技术^[2]主要涉及数字图像的形成与提取、数字图像相关计算、数据后处理等步骤,其测量精度取决于测量或检测过程中噪音的影响,这些因素主要来自于环境和光源的不稳定性、CCD摄像机的电子噪声、数字图像的不相关性、数据计算误差等,特别是图像的数字误差、光学元器件误差。因此,如何消除或减少这些噪音的影响,直接影响到这种方法的进一步应用与研究。

小波分析将信号展开为一族小波基函数的加权和。其原理^[28]是在不同尺度下作小波变换,实际就是用不同中心频率的带通滤波器对噪音信号滤波,把反映噪声频率的那些尺度的小波变换滤掉,再把剩余各尺度的小波变换结合起来作反演变换,就能得到较好地抑制噪声后的信号。采用Daubechies小波滤波器。其小波函数 $\phi(t)$ 由尺度函数 $\phi(t)$ 加权组成。

$$\phi(t) = \sum_k g_k \phi(2t - k) \quad (14)$$

k 值从 $2-(2N-1)$, N 值($=2, 3, 4, \dots$)不同,权重 g_k 的值也不同。

对于离散小波变换,可以用按照滤波器组框架对离散信号进行处理,滤波器系数为 $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$,其中 n 为序列数,它们与小波函数 $\phi(t)$ 、尺度函数 $\phi(t)$ 的关系为:

$$\Phi(\omega) = \prod_{j=1}^{\infty} H'_0(2^{-j}\omega), \quad \Psi(\omega) = H'_1\left(\frac{\omega}{2}\right) \prod_{j=2}^{\infty} H'_0(2^{-j}\omega) \quad (15)$$

其中, $H'_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0(\omega)$, $H'_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} H_1(\omega)$; $\Phi(\omega)$ 、 $\Psi(\omega)$ 分别为 $\phi(t)$ 、 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换; $H_0(\omega)$ 、 $H_1(\omega)$ 分别为 $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ 的 Fourier 变换。

另外,正规性条件也是离散小波分析中所要涉及的重要问题,因为(14)、(15)式中的 Fourier 变换过程未必能导致连续曲线,也不一定收敛,甚至产生分形曲线。对此, Daubechies 以收敛成连续曲线为目标,就 $H_0(\omega)$ 提出了正规性条件。令 $z = e^{j\omega}$,则 $H_0(z)$ 应满足以下正规性要求:

$$H_0(z=1) = \sqrt{2}, \quad \sum_n h_0(n) = \sqrt{2}, \quad H_0(z) = \sqrt{2} \left[\frac{1+z^{-1}}{2} \right]^p F_0(z), \quad F_0(z=1) \neq 0$$

$$F_0(z=1) = 1 \quad |F_0(e^{j\omega})|_{\max} \leq 2^{p-1} \quad \omega = 0 \sim 2\pi \quad (16)$$

其中式(16)表示在 $z=-1(\omega=\pi)$ 处, $H_0(z)$ 有高阶的零点。这样,根据式(16),设计 $H_0(z)$:

$$H_0(z) = \sqrt{2} \left[\frac{1+z^{-1}}{2} \right]^p F_0(z), \quad |F_0(e^{j\omega})|^2 = \sum_{j=0}^{p-1} \left[\frac{p-1+j}{j} \right] \left[\frac{1-\cos\omega}{2} \right]^j \quad (17)$$

式中 $\left[\frac{p-1+j}{j} \right]$ 是从 $p-1+j$ 中每次取 j 可能得到的组合数目,因此,只要确定 p 值,就可以设计滤波器,从而求出小波函数 $\phi(t)$ 、尺度函数 $\phi(t)$ 。

根据小波分析原理,小波减噪主要是采用一系列不同的滤波器,即不同的小波基来完成。不同的小波基对不同的频率信号敏感,选用不同的小波基相当于变换窗口大小,用于选择不同频率的信号。通常大尺度用于识别低频信号,而小尺度只用于识别高频信号。很明显,如何去除属于噪声的小波系数,增强属于信号的小波系数,取决于合适的小波基与滤波器。

采用小波减噪对位移场测量进行验证表明噪声信号大大减少,误差范围由0.2像素(10%)减少至0.005像素(0.25%),减噪效果十分明显,可以真正反映变形位移场的测试结果。

6 补偿技术

补偿技术^[31]是用于提高大变形情况下精度的一种方法,由于相关技术是建立在小变形、散斑分布

不变的条件下,当变形大时该条件将不满足因而采用补偿方法来提高相关计算准确性。其原理为先进行子域内逐点的位移计算,随后把这些位移量引入对变形后散斑图的修正以提高相关度满足相关运算的基本条件。表 4,表 5 分别为长方形橡胶材料试件受拉伸载荷后补偿前、后位移测量结果,很明显应用补偿技术后数据显得有规律,分布较为均匀。它表明大变形测量时采用补偿法可使测量精度大大提高。

表 4 补偿前位移测量结果

Tab. 4 Measuring results before compensation

$E_x(10^{-4})$	X=47	X=87	X=127	X=167	X=207	X=247	X=287
Y=135	-2.2400	-8.9500	-8.9500	-4.0750	-6.5750	-2.4750	-3.4750
Y=175	-2.7550	-6.2750	-4.4750	-5.9250	-3.3500	-4.0000	-3.7000
Y=215	-7.7500	-5.2250	-5.6500	-4.7500	-4.8250	-1.6000	-5.2000
Y=255	-3.5000	-6.6250	-6.7000	-1.4000	-4.4000	-4.9000	-4.2250
Y=295	-0.6000	-5.1500	-2.4750	-4.4250	-4.4000	-4.8500	-5.3000
Y=335	-4.7000	-3.4250	-2.8000	-5.0250	-5.6750	-6.7500	-6.4750
Y=375	-6.5750	-3.7250	-3.6000	-5.1500	-5.7250	-4.2500	-7.9000
Y=415	-5.7250	-5.1500	-4.6500	-5.6750	-4.6750	-4.9250	-0.9350

表 5 补偿后测量结果

Tab. 5 Measuring results after compensation

$E_x(10^{-4})$	X=47	X=87	X=127	X=167	X=207	X=247	X=287
Y=135	-4.4930	-4.4127	-4.3527	-4.3609	-4.5265	-4.4413	-4.3814
Y=175	-4.4034	-4.5027	-4.3978	-4.3551	-4.5248	-4.3725	-4.4165
Y=215	-4.4981	-4.3430	-4.5304	-4.5101	-4.5364	-4.3892	-4.4356
Y=255	-4.4743	-4.5295	-4.3472	-4.5034	-4.3838	-4.5390	-4.3912
Y=295	-4.5043	-4.3968	-4.3896	-4.3871	-4.4494	-4.3822	-4.4722
Y=335	-4.4768	-4.3777	-4.3938	-4.5244	-4.3860	-4.3647	-4.4216
Y=375	-4.4769	-4.4043	-4.5238	-4.4905	-4.4193	-4.3783	-4.4192
Y=415	-4.3450	-4.5121	-4.4219	-4.4975	-4.5024	-4.4182	-4.5043

7 应变场^[34-37]

由于力学测量主要关注应变场,而相关技术能得到位移场,因而由位移场的小误差将导致应变场的不可信。无疑对位移场的减噪或平滑处理是至关重要的,前面介绍的小波减噪就是其中之一,但后期人们发现在力学计算中的有限元方法亦是一种很好的位移场平滑技术,有限元平滑技术使位移场转换成应变场时误差大大减小。在数字相关搜索中对位移敏感但对其导数不敏感,但位移导数即应变本身是十分重要的。有限元平滑的基本概念是寻找一个平滑函数使下列函数最小化

$$R(d) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^J (d_i - \hat{d}_i)^2 + \frac{\lambda}{2} \iint_A \left(\left(\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 d}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 d}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) dA \quad (18)$$

其中: $\hat{d}_i$ 为所求点的位移分量 i (u or v); d_i 为 $\hat{d}_i$ 的平滑解; J 为总点数; A 为包含所有点的最小区域; λ 为平滑参数。在有限元中区域 A 被划分成 Q 个元而平滑解 d 在第 j 单元可以表示为

$$d = [N]_j \{a\}_j \quad (19)$$

其中 $[N]_j$ 为第 j th 单元的形函数; $\{a\}_j$ 为第 j th 单元自由度的柱向量。把式(19)代入式(18)

$$R = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^Q \{ \{a^e\}_j^T [K_1^e]_j \{a^e\}_j - 2 \{a^e\}_j^T \{P\}_j + \lambda \{a^e\}_j^T [K_2^e]_j \{a^e\}_j \} + \text{const} \quad (20)$$

其中:

$$[K_1^e]_j = \sum_{i=1}^{S_j} [N_i]_j^T [N_i]_j, \{P\}_j = \sum_{i=1}^{S_j} [N]_j^T \hat{d}_{ij}$$

$$[K_2^e]_j = \iint_{\Omega_j} \left\{ \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial x^2} \right)^T \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial x^2} \right) + 2 \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial x \partial y} \right)^T \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial x \partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial y^2} \right)^T \left(\frac{\partial^2 [N]_j}{\partial y^2} \right) \right\} dA \quad (21)$$

S_j 为第 j 单元总点数; $[N_i]_j$ 为第 j 单元 $[N]_j$ 在 i 点的值; $\hat{d}_{ij}$ 为第 j 单元在第 i 点的位移分量。 $[K_1^e]_j$, $[K_2^e]_j$ 称为单元的刚度矩阵; $\{P\}_j$ 被称为单元的载荷向量, 方程可以表示如下:

$$R = \frac{1}{2} \{a\}^T [K_1] \{a\} - \{a\}^T \{P\} + \lambda \{a\}^T [K_2] \{a\} + \text{const} \quad (22)$$

方程的最小化可由以下结果导出

$$[K] \{a\} = \{P\}, \quad [K] = [K_1] + \lambda [K_2] \quad (23)$$

如果平滑参数 λ 已知, 节点参数 $\{a\}$ 可由方程 (23) 导出。在参考文献[34,35]中讨论了 λ 的作用。如 λ 为 0, 将无平滑产生而公式(15) 产生对实验数据的最小二乘拟合; 如 λ 很大会产生最强的平滑作用方程 (19) 形成对实验数据的平面拟合。为了使位移场的标准偏差获得较好评估, 文献[37]引入了一维广义交互验证(GCV)算法; 然而, λ 仅为一个经验值而没有确定的定义。本文引入二维 GCV 算法用来评估平滑参数 λ 。GCV 算法的作用为确定 $\lambda \geq 0$ 以最小化函数

$$\text{GCV}(\lambda) = \frac{n \| [I - A(\lambda)P] \|}{\{ \text{tr}[I - A(\lambda)] \}^2} \quad (24)$$

其中: $A(\lambda) = [K_1]([K_1]^T [K_1] + \lambda [K_2])^{-1} [K_1]^T$ 。

文献[37]为了在总体上对二维或高维问题求得 λ 的最佳值, 给出了基于差异分析的算法的完整叙述, 由此求得 $\{a\}$, 而平滑数据可以从方程(22)导出, 而其微分可给出无噪声的位移梯度值。计算表明应变数据偏差将从考虑位移导数的牛顿迭代的 2.21×10^{-4} 提高到 0.45×10^{-4} , 效果是十分明显的。

8 三维数字相关技术^[36-38]

将立体摄影和数字图像相关技术相结合的方法可以测量三维位移场。首先利用两个 CCD 摄像机在空间两个不同位置拍摄物体表面在变形前后同一个区域之间的散斑图像。然后利用数字散斑相关技术求解这四幅散斑图像之间的相对位移。最后利用立体摄影的几何转换公式, 确定物体表面的三维变形场。立体摄影中的摄像机模型如图 4 所示。图中各个坐标系的含义如下: XYZ 坐标系—物体的三维世界坐标系; xyz 坐标系—摄像机的三维坐标系; $x'y'$ 坐标系—二维像平面坐标系; HV 坐标系—计算机上的二维图像坐标系。点 P 为空间中的一点, 就是所要研究的点, 它的坐标可以表示成 XYZ 坐标系下的值 (X, Y, Z) , 也可以表示成 xyz 坐标系下的值 (x, y, z) 。点 P 将成像于像平面的 $P'(x')$ 点上。立体成像中四个坐标系之间的关系见图 5。

坐标系统的转换可以通过空间几何关系解决, 这里就不再赘述。由于涉及许多关系, 通常确定各种参数采用标定来解决。立体摄影系统的标定首先把一个表面涂有随机散斑点的平板粘贴在一个三维平动台上, 其三个方向与 x, y, z 三个坐标方向一致, 然后放在上述立体摄影系统的正前方, 如图 5。选择一个位于摄像机 1 所拍摄到的、大小为 21×21 像素的区域为标定区域, 其中心点为标定点, 并把物体世界坐标系的原点定在该点。然后将该平板在三维的坐标空间中以已知的位移值移动 N 次。在每一个空间位置上, 两个摄像机各拍摄一幅图像。具体的处理过程如下: 首先, 定义点 (H_{1m}, V_{1m}) 为计算机图像坐标中由摄像机 1 所拍摄到的被选作相关计算的标定区域中心点。类似地, 定义点 (H_{2m}, V_{2m}) 为计算机图像坐标中由摄像机 2 所拍摄到的被选作相关计算的标定区域中心点。这两个点(即标定点)对应于平板上的同一点 (X_m, Y_m, Z_m) 。下标 m 表示平移次数, $m=1$ 表示原始未平移的状态。

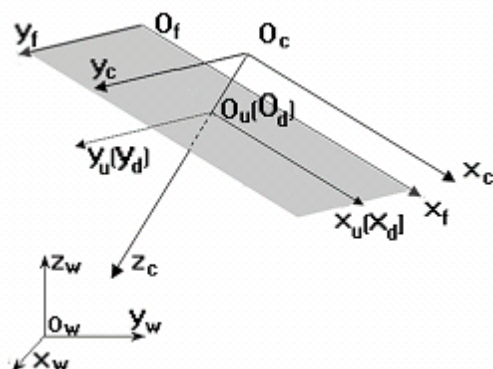


图 4 立体摄影的摄像机模型
Fig. 4 The model of 3D camera

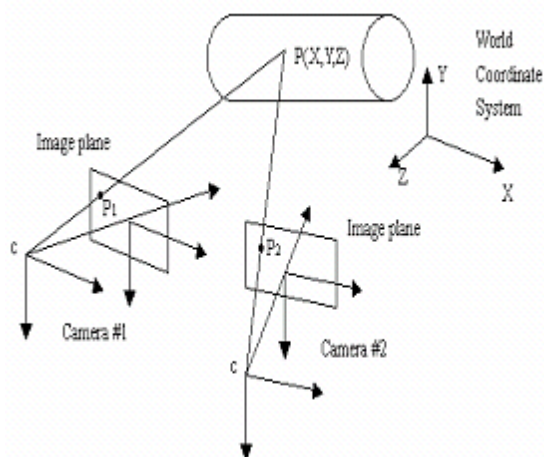


图 5 立体成像中四个坐标系之间的关系
Fig. 5 Relation between 4 ordination systems

在摄像机 1 的坐标系中,中心点位于 (H_{1m}, V_{1m}) 、大小为 21×21 像素 s 的区域为 S_{1m} ;而在摄像机 2 的坐标系中,中心点位于 (H_{2m}, V_{2m}) 、大小为 21×21 像素 s 的区域为 S_{2m} 。经过 $(m-1)$ 次平移后,对摄像机 1 所拍摄第一幅散斑图与摄像机 1 所拍摄的其他序列散斑图之间的自相关运算。即:相关运算的源图像是固定不变的,而目标图像则是平板移动 m 次后的图像 $S_{1(m+1)}$,然后对源图像和目标图像进行相关计算。另外;对摄像机 1 所拍摄的第一幅图像与摄像机 2 所拍摄的序列图像之间的互相关运算。即:相关运算的源图像是固定不变的,都是 S_{11} , (H_{11}, V_{11}) ,而目标图像则是平板移动 m 次后由摄像机 2 所拍摄的图像 S_{2m} ,随后对源图像和目标图像进行相关计算。在求解了一系列的 (H_{1m}, V_{1m}) 和 (H_{2m}, V_{2m}) ,并且已知对应点 (X_m, Y_m, Z_m) 的基础上,就可以采用非线性最小二乘方法来分别标定两个摄像机的参数。

把一个表面涂有随机散斑点的平板粘贴在三维平移台上,平移台以一个已知的三维位移量($U = -0.3\text{mm}$, $V = 0.5\text{mm}$, $W = 0.4\text{mm}$)移动,通过立体摄影系统记录了移动前后的四幅散斑图。利用上述原理求得三维位移场。 $U = 0.3\text{mm}$ 的测量结果为: x 方向位移场的最大值为 $U_{\max} = -0.3004\text{mm}$,最小值为 $U_{\min} = -0.3035\text{mm}$,标准方差为 0.0008mm ; y 方向位移场的最大值为 $V_{\max} = 0.500\text{mm}$,最小值为 $V_{\min} = 0.493\text{mm}$,标准方差为 0.002mm ; z 方向位移场的最大值为 $W_{\max} = 0.409\text{mm}$,最小值为 $W_{\min} = 0.387\text{mm}$,标准方差为 0.005mm 。测量结果表明:对于纯位移,该方法的测量精度是比较高的,面内位移的精度可达 0.007mm ,离面位移的精度可达 0.01mm 。

9 应用

数字散斑相关技术已成功地用于材料测试,结构模型及实物监测,岩石力学、复合材料性能研究,生物力学等方面,下面显示一些应用的结果。图 6 为三种橡胶材料泊桑比测量,显示泊桑比将随 ϵ_y 的变化由 0.5 降至 0.36 。橡胶的大应变测量是一个难题,而数字散斑相关可以较好地解决该项测量难题。图 7 为研究尺寸效应中测量三种不同直径($20 \sim 180\mu\text{m}$)铜丝的力学性能,实验测量表明:当尺寸在几十微米时,随着直径减小,拉伸强度增大,材料力学性能会改变。图 8、图 9 为应用数字散斑相关方法研究基础界面应力分布,测量结果显示界面剪应力在离表面一定(较近)距离会达到最大值,其后很快衰减,该测量结果为墙式基础的设计提供依据。图 9 为应用数字散斑相关方法现场测量钢桥丙、丁接头应力集中的应用实例,在应变分布图右侧亦即接头弯曲处存在应力集中,应变高达 2000 微应变,它表明数字散斑相关方法可以应用于野外、现场应变测量。图 10 为小型陶瓷电容器(毫米大小)的裂纹无损检测,数字散斑相关方法可以检测到裂纹引起的大变形。图 11 为在生物力学中的应用,数字散斑相关方法用于测量猪软骨的力学性能,方法的非接触测量特点使方法可方便地用于柔软物体(软骨、皮肤、血管)的

应变测量。以上六个应用实例充分表明数字散斑相关方法是一种十分有发展潜力的实验力学工具。

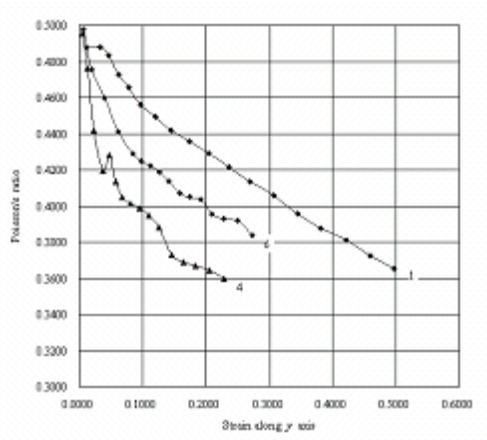


图 6 三种橡胶材料的泊松比变化曲线

Fig. 6 Poisson's ratio of 3 rubber material

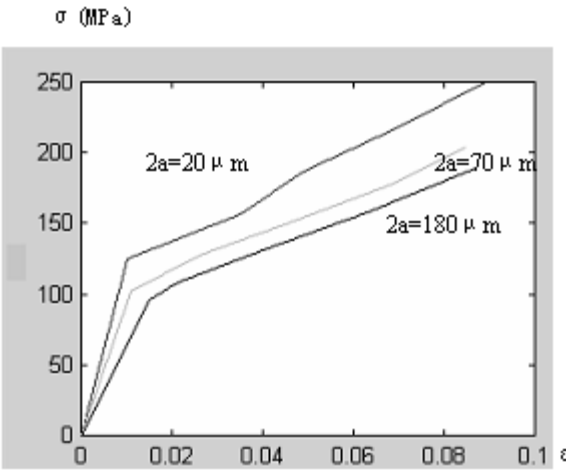


图 7 直径 20~180 μm 三种铜丝力学性能测量结果

Fig. 7 Mechanical behavior of 20~180 μm

diameter copper material

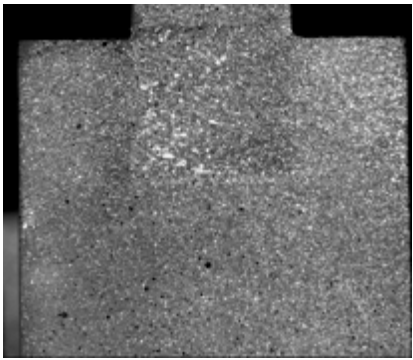


图 8 墙式基础界面应变测量

Fig. 8 The interface strain measurement of wall foundation

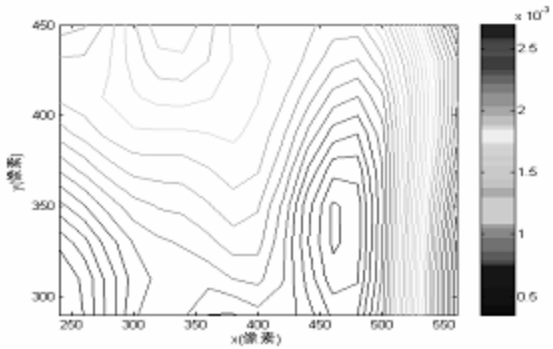
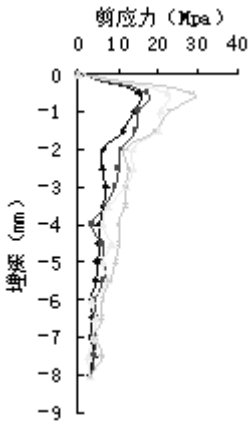


图 9 钢桥结构应力集中测量

Fig. 9 Strain concentration measurement of bridge structure



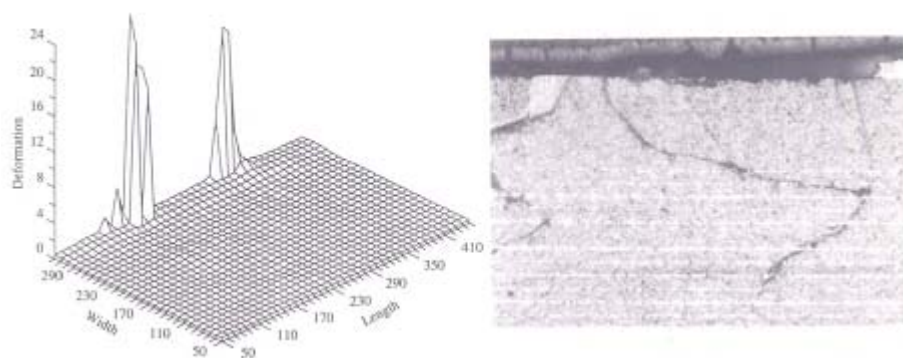


图 10 陶瓷微电容裂纹检测

Fig. 10 Crack detect of micro-capacitor

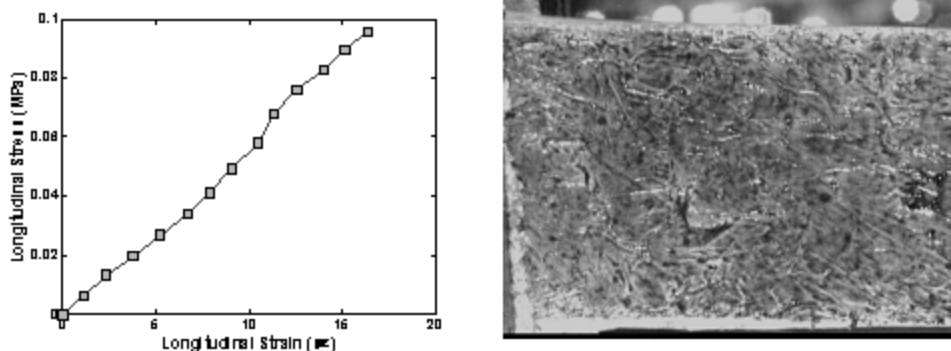


图 11 猪软骨应力应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve of pig soft bone

参考文献:

- [1] Ranson W F, Peters W H. Digital image techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427~431.
- [2] Yamaguchi I. A Laser-Speckle Strain gage [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14:1270~1273.
- [3] Hubert W Schreier, Joachim R Braasch, Michael A Sutton. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation [J]. Opt. Eng., 2000, 39 (11):2915~2921.
- [4] Peng Zhou, Kenneth E Goodson. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. Opt. Eng., 2001, 40(8):1613~1620.
- [5] Fincham A M, Spedding G R. Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow [J]. Experiments in Fluids, 1997, 23:449~462.
- [6] Lourenco J, Krothapalli A. On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV [J]. Experimental in Fluids, 1995, 18:421~428.
- [7] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用 [J]. 力学学报, 1994, 26(5):599~607 (RAI Jiabai, JIN Guanchang, XU Bingye. An advanced digital speckle correlation method and its application. Mechanica Sinica, 1994, 26 (5):599~607 (in Chinese))
- [8] 刘新卫, 刘荣勋. 光纤—数字散斑相关方法的原理及应用 [J]. 北京化工学院学报, 1994, 21(4):46~52 (LIU Xinwei, LIU Rongxun. Principle and application of optic fiber-digital speckle correlation method. Beijing Institute of Chemical Engineering (Nature Science), 1994, 21(4):46~52(in Chinese))
- [9] Gui L, Merzkirch W. A method of tracking ensembles of particle images [J]. Experiments in Fluid, 1996, 21:465~468.
- [10] Gui L, Merzkirch W. A comparative study of the MOD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms [J]. Experimental in Fluids, 2000, 28:36~44.

- [11] Westerweel J. Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry [J]. *Experimental in Fluids*, 2000, suppl:3~12.
- [12] Scarano F, Riethmuller M L. Advances in iterative multigrid PIV image processing[J]. *Experimental in Fluids*, 2000, suppl:51~60.
- [13] Russo N A, Pomarico J A, et al. Extended range optical velocimetry through spatial correlation of image speckle sub-patterns[J]. *Optics communications*, 1999, 169:23~28.
- [14] Vendroux G, Knauss W G. Submicron deformation field measurements; Part 2. Improved digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38 (2):86~92.
- [15] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation; Implementation of a second-order displacement gradient [J]. *Experimental mechanics*, 2000, 40 (4):393~400.
- [16] Chao Y J, Luo P F, Kalthoff J F. An experimental study of the deformation fields around a propagating crack tip [J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(2):79~85.
- [17] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC) [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(8):1613~1620.
- [18] Okamoto K, Hassan Y A, Schmidl W D. New tracking algorithm for particle image velocimetry[J]. *Experimental in Fluids*, 1995, 19:342~347.
- [19] Roesgen T, Totaro R. Two-dimensional on-line particle imaging velocimetry [J]. *Experimental in Fluids*, 1995, 19:188~193.
- [20] Zhang D, Zhang X, Cheng G. Compression strain measurement by digital speckle correlation [J]. *Experimental mechanics*, 1999, 39 (1):62~65.
- [21] Rohaly J, Nakajima T, Ikeda Y. Identification of true particle image displacement based on false correlation symmetry at poor signal peak detectability [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, suppl:23~33.
- [22] Ma S P, Jin G C. New correlation coefficients designed for digital speckle correlation method (DSCM)[J]. *SPIE*, 2003, 5058:25~33.
- [23] 金观昌. 计算机辅助光学测量 [M]. 北京:清华大学出版社, 1997(JIN Guanchang. Computer-aided optical metrology. Beijing:Tsinghua University Press, 1997(in Chinese))
- [24] 简龙辉,马少鹏,张军等. 基于小波多级分解的数字散斑相关搜索方法 [J]. 清华大学学报, 2003, 43(5):680~683(JIAN Longhui, MA Shaopeng, ZHANG Jun. Wavelet-transform based hierarchical search algorithm for the digital speckle correlation method. *Journal of Tsinghua University*, 2003,43(5):680~683 (in Chinese))
- [25] Ma Shaopeng, Jin Guanchang. Digital speckle correlation method improved by genetic algorithm[J]. *Acta MECHANICA SOLIDA Sinica*, 2003,16(4):366~370.
- [26] 李善祥,孙一翎,李景镇. 数字散斑相关测量中亚像素位移的曲面拟合研究 [J]. 光子学报, 1999, 28(7):638~640(LI Shanxiang, SUN Yilin, LI Jingzhen. Curved surface fitting of sub-pixel displacement in digital speckle correlation measurement. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(7):638~640 (in Chinese))
- [27] 王影琛,何小元. 相关识别中的曲面拟合法 [J]. 实验力学, 2000, 15(9):281~285(WANG Yingchen, HE Xiaoyuan. Curved surface fitting on correlation recognition. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(9):281~285 (in Chinese))
- [28] Zhang J, Jin G C, Ma S P. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement [J]. *Opt. Laser Technology*, 2003, 35(7):533~542.
- [29] 张军,金观昌,马少鹏. 基于微区统计特性的 DSCM 亚像素位移梯度算法[J]. 光学技术, 2003, 29(4):467~472 (ZHANG Jun, JIN Guanchang, MA Shaopeng. Gradient algorithm on sub-pixel displacement based on statistics DSCM. *Optical Technique*, 2003, 29(4):467~472(in Chinese))
- [30] Daubechies I. Orthonormal based of compactly supported wavelets [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1988, 41:909~996.
- [31] 姚学锋,吴震,金观昌. 数字散斑相关中的小波减噪技术[J], 清华大学学报, 2001, 41(4-5):108~111(YAO Xuefeng, WU Zhen, JIN Guanchang. Wavelet noise reduction technique in digital speckle correlation. *Journal of Tsinghua University*, 2001, 41(4-5):108~111(in Chinese))
- [32] 林碧森,金观昌,姚学锋. 正交小波变换在散斑图相关计算中的应用 [J]. 光子学报, 2002, 31(2):235~240(LIN

- Bisen, JIN Guanchang, YAO Xuefeng. The applications of orthogonal wavelet transform on digital speckle correlation calculation. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(2):235~240 (in Chinese))
- [33] Jin G C, Wu Z, Bao N K. Digital Speckle Correlation Method With Compensation Technique For Strain Field Measurement[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2003, 39:457~464.
- [34] Craven P, Wahba G. Smoothing Noisy Data with Spline Functions: Estimating the Correct Degree of Smoothing by the Method of Generalized Cross Validation [J]. *Numerische Mathematik*, 1979, 31:377~405.
- [35] Segalman D J, Woyak D B, Rowlands R E. Smooth spline-like Finite-element Differentiation of Full-field Experimental Data over Arbitrary Geometry [J]. *Experimental Mechanics*, 1979, 19(12):429~437.
- [36] Feng Z, Rowlands R E. Continuous Full-field Representation and Differentiation of Three-Dimensional Experimental Vector Data [J]. *Comp. And Struct*, 1987, 26(6):979~990.
- [37] Kent J T, Zadeh M M. Global optimization of the generalized cross-validation criterion [J]. *Statistics and Computing*, 2000, 10, 231~236.
- [38] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, Peters W H. Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision [J]. *Experimental Mechanics*, 1993, 33, 123~132.

The Progress and Application of Digital Speckle Correlation Method

JIN Guan-chang, MENG Li-bo, CHEN Jun-da, MA Shao-peng, ZHANG Jun

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Digital speckle correlation technique is one of the measuring techniques of photomechanics in twenty century. After the research of domestic and abroad scholars in the past twenty years, this technique becomes a mature measuring method and was applied successfully in mechanical measurements. The review and application examples are presented in this paper. Eight key problems are reviewed that are 1 Correlation formula, 2 Search technique, 3 Sub-pixel search, 4 Speckle pattern, 5 Noise reduction, 6 Compensation technique, 7 Displacement field to strain field and 8 3D displacement measuring. The widely application examples on material testing, structure inspection, rock mechanics composite material study, biomechanics are presented at the end of the paper.

Key words: digital correlation technique; speckle metrology