

一种新的数字散斑相关方法及其应用

芮嘉白 金观昌 徐秉业
(清华大学工程力学系, 北京 100084)

提要 本文提出了一种新的改进的数字散斑相关方法——十字搜索法。采用该方法将大大缩短计算时间, 从而使数字散斑相关在微机上得到成功的应用。本文还从概率与统计的角度提出了新的相关系数计算公式, 这个计算公式可以提高计算精度。文中还讨论了高精度测量的一些技术问题。初步实验验证表明, 本文所提出的方法是一种实用的快速、高精度的位移、应变测试方法。

关键词 数字散斑, 相关, 图像, 变形

引 言

数字相关技术 (DCT) 是八十年代发展起来的一种用于测量物体位移、粒子移动的一种计算机辅助测试 (CAT) 方法。这种方法最早由美国南卡大学的 W.H. Peters 和 W.F. Ranson^[1] 提出, 它通过对物体表面的粒子变形前后的光强分布图进行相关运算来确定物体的位移和应变。十年来在南卡大学进行了一系列研究和改进工作^[2-6], 但由于需要对测试变形区进行大量繁琐和费时的计算工作以寻求相关最大的点, 以及精度上的问题, 使该方法仍不能得到很广泛的应用。但由于这种方法对力学测试具有极简单的测试要求, 并且测量是非接触、全场性的, 故该方法仍有着较大的应用前景。

为了提高测量精度, 我们对已有的文献中列出的一些相关系数公式作了验证计算, 发现它们存在着差异, 这些差异归结到相关的峰值分布, 相关的峰值分布锐性将直接关联到测量的精度, 在分析这些公式的基础上我们确定了计算公式, 并提出了一些措施以保证测量精度。

另一个关键问题是如何提高处理速度。我们研究了大量的相关计算规律, 发现相关系数分布呈现为具有一个峰的空间凸曲面, 即单峰曲面。因此提出了一种十字搜索方法代替已有的逐点搜索法, 大大地节省了计算处理时间。并使更进一步的精确计算成为可能。

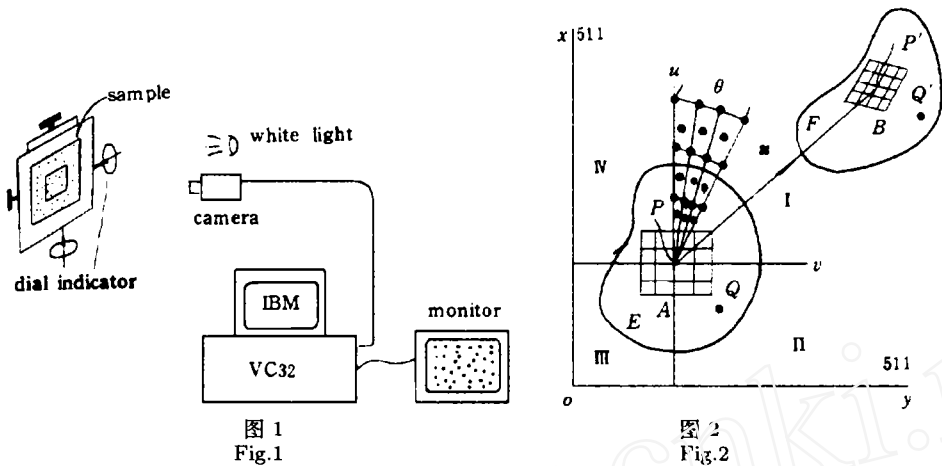
无疑, 这二方面的进展将会使数字相关方法具有更广泛的实用价值。

1 方法原理

数字散斑相关是根据物体表面随机分布的粒子的反射光强分布在变形前后的概率统计相关性来确定位移、变形的。其测量过程为由摄像机记录存在于物体表面的斑点图, 这些图经 A/D 转换储存于图像卡的帧存体中并显示在监视器屏幕上, 通常

1992-10-30 收到第一稿, 1993-11-08 收到修改稿。

每幅图含 512×512 个像素, 图像的灰度经 8bit A/D 转换为 0—255 灰度级. 图 1 为数字散斑相关的装置简图.



由于斑点的随机性, 物体中每点周围一个小区域中斑点分布是各不相同的, 这个小区通常称为子集, 对于物体变形的测量可通过观察子集的移动和变形来完成. 图 2 为同一坐标系下的物体变形前后的两幅图像. 设物体由 E 变形而移动至 F , E 上一点 $P(x_0, y_0)$ 移至 P' , 设 P 的位移及其导数为 $u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$, 又设 Q 点为 P 点子集中某点, $QP = \Delta x \cdot i + \Delta y \cdot j$, 变形后, 点 $Q(x, y)$ 变成 $Q'(x^*, y^*)$ 点. 由连续介质力学知 Q' 的坐标

$$\left. \begin{aligned} x^* &= x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \Delta y \\ y^* &= y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \Delta y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

我们取 P 为研究点, 如图 2 以 P 为中心取子集 A , 假设为 $m \times m$ 个像素, 则 A 就记录了 P 点周围随机分布的斑点灰度值的信息, 由统计学定义为一二维样本空间. 移动后, 原来子集 A 处的斑点, 就位于子集 B 处相应的位置, 斑点间一一对应, 这是另一样本空间, 概率与统计认为两样本空间完全相关, 相关系数为 1. 若有变形, 相关系数会相应下降, 但通过位移导数项对子集 B 尺寸的修正, 相关系数仍可达到 1. 若取一个非相应位置处的子集 B' , 则 B' 和 A 就不完全相关, 相关系数就小于 1. 因此可由两子集的相关来确定某点 P 的位移及其导数.

由概率与统计理论可知, 子集 A 和子集 B 的相关系数估计为

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x_i^*, y_j^*) - \bar{g}]^2}} \\ C &= 1 \text{ 相关; } \quad C = 0 \text{ 不相关} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, (x_i, y_j) 为子集 A 中某点坐标; (x_i^*, y_j^*) 为由 (1) 式求出的子集 B 中对应点坐标; $f(x_i, y_j)$, $g(x_i^*, y_j^*)$ 分别为灰度值; $\bar{f} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f(x_i, y_j)$; $\bar{g} = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m g(x_i^*, y_j^*)$.

只要 A 、 B 相关, 由文献 [8] 可知, $C(u, v)$ 曲面为一单峰曲面, 而对 u, v 分别固定时的 C 则为一正态分布曲线. 故采用 (2) 式作为相关系数也保证了下文所提及的十字搜索法的成功运用. 我们曾用文献 [4—6] 的相关公式进行计算, 发现 C 虽也有一极大值, 但不相关处和相关处的 C 值几乎一致, 故难以精确地确定最相关时的位移值. 下式为文献 [4—6] 公式

$$C' = \frac{\sum_{ij} f(x_i, y_j) \cdot g(x_i^*, y_j^*)}{\left[\sum_{ij} f(x_i, y_j)^2 \cdot \sum_{ij} g(x_i^*, y_j^*)^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

图 3 为用 (2),(3) 两式作相关计算时, 同一条件下 $C(u, v)$ 和 $C'(u, v)$ 的分布情况, 可以看出, C' 值几乎为 0.9 以上, 很难区分最大值, 故采用 (2) 式更为合理, 且符合概率统计学理论.

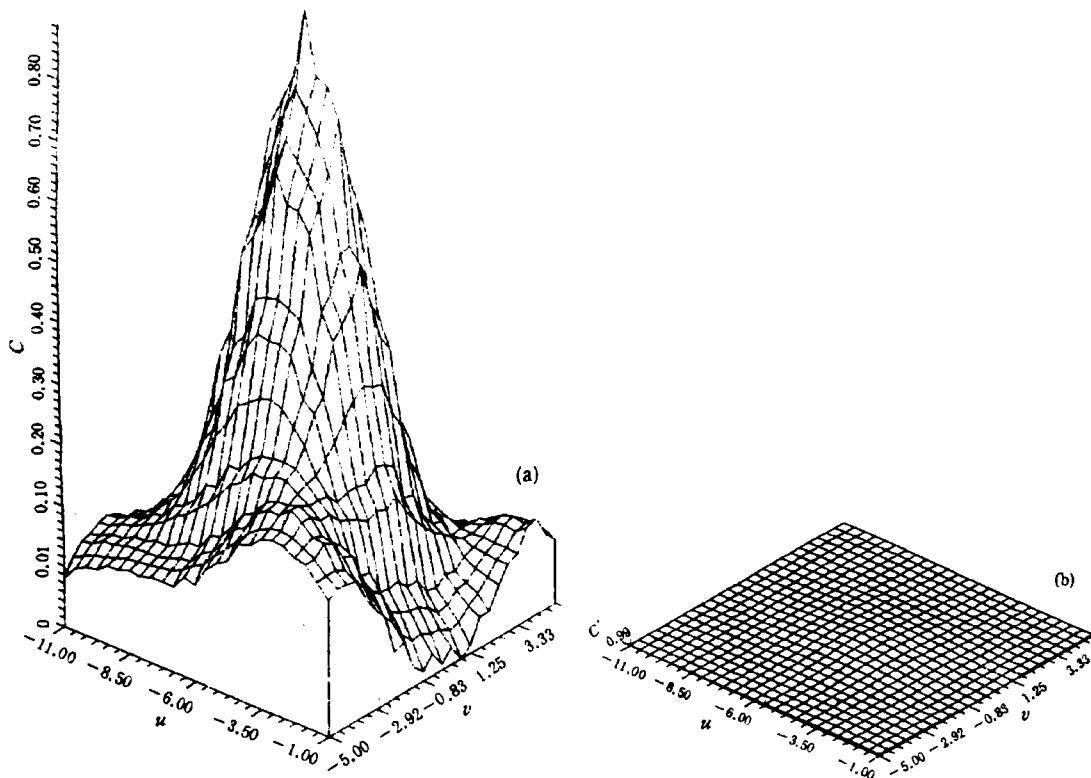


图 3

Fig.3

而文献 [7] 中, 相关系数公式如下

$$C'' = \frac{\sum_{ij} [f \times g - \bar{f} \times \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{ij} [f - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{ij} [g - \bar{g}]^2}} \quad (4)$$

文献中所列 C 值, 结果出现单峰性不好, 而多峰的出现使准确确定真实位移很难实现, 故 (4) 式仍不适用.

在以上分析的基础上, 我们选用 (2) 式作为相关计算公式. 相类似地, 我们也可用

$$S = 1 - C = \begin{cases} 0 & \text{相关} \\ 1 & \text{不相关} \end{cases}$$

作为不相关系数来进行 DCT 测量.

解决了相关计算公式后, 下面的问题就是如何找到一种较好的方法来求解使 S 值最小 (即 C 最大) 的 $u, v, \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 的搜索问题. 文献 [4] 等用所谓的粗细法对在整个平面内的逐个像素点进行位移搜索的, 这样做速度很慢, 虽然 Peters 等人用牛顿-拉普辛法改进了搜索法 [5,6], 但它仍是建立在粗细法基础上的, 故他们这种方法基本上只能在大计算机上进行运算, 如 VAX 机等, 这就使 DCT 法在实用上有较大的限制.

本文提出了一种新的、适用于微型计算机的快速的搜索方法——十字搜索法, 它的思想是将逐点法这种二维逐点搜索方法变成一维的搜索以减少计算搜索时间, 使 DCT 法能在微机上得到很好的应用.

仍如图 2 所示, 设物体上任一点 P , 变形后移至 P' , 位移为 u , 由于 u 未知, 故需分别在 (I—IV) 个象限内搜索. 本文的实验结果和计算均发现, u, v 对 S 值的影响最大, $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 项对 S 值影响甚微, $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 只是在某点的位移确定后, 用于修正 S 值并使之更小, 它只能用于纠正某点子集由于变形而对 S 值的求值带来的误差. 因此象文献 [2,6] 等用控制相关系数值的方法并不能可靠地求出应变. 事实上, 求出位移场后, 用数值方法就可求出应变场.

在 $S(u, v)$ 关系中, 对应于真实的位移 u^*, v^* 时, S 达最小值 $S_{\min}$ (理想值为 0), 在点 (u^*, v^*) 附近, $S > S_{\min}$, 离点 (u^*, v^*) 越远, S 值越大, 再远, S 值就接近于 1, 故一般情况, $S(u, v)$ 曲面应为具有一个单峰的凸曲面. 我们的实验及计算结果也证明了这一点, 如图 4 所示.

为此, 我们提出了“十字”搜索法, 它的步骤为先寻找单峰位置处的某点 (u, v) 值, 再在单峰曲面上寻找其顶点.

在求单峰位置时, 仍如图 2 所示求 P 点位移. 过 P 作 u, v 轴, 作以 u 为起始轴的射线, 夹角为 θ , 只要 θ 角域覆盖位移 u 即可, 等分 θ 角成 n 等份, 以 $r_i = d \cdot i$ 为半径 ($i = 1, 2, \dots$), d 为可调节等分段, 将扇形区分成图示的等分区域, 取图示的节

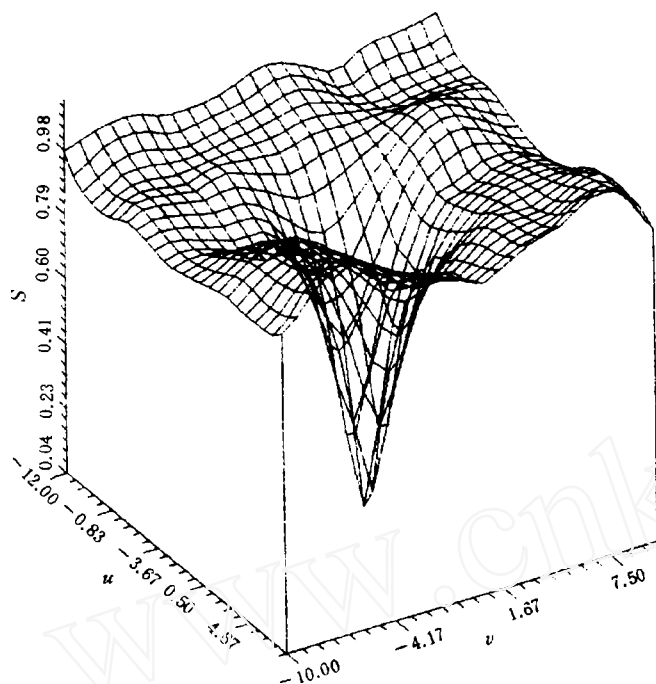


图 4
Fig.4

点. 图 2 中坐标轴采用的为监视器屏幕坐标, 长度单位为像素 (pixel). 分别按顺序求出各节点处的 S_i 值. 给定 S^0 为确定单峰位置时的 S 值, $S^0 < 1$, 当某点的 $S_i < S^0$ 时, 即找到了单峰曲面位置, 从而确定了单峰面上某点 C 位移 u_c, v_c . 这种分法的优点是可按需要定 d, θ, n 值而不需逐个像素计算 S 值来寻找单峰位置.

下面我们需在单峰下凸曲面上来寻找顶点的位置, 如图 5, 这就是十字搜索法. 刚才寻找单峰位置时, 已确定了单峰上一点 C 处的位移 u_c 和 v_c , 故首先固定 $u = u_c$ 作一截面交峰面于 Ce_1d_1 曲线. 在此曲线上可找到该曲线的顶点 $e_1(u_c, v_{e1}, S_{e1})$; 再固定 $v = v_{e1}$ 作截面 (现截面垂直于前一截面) 交峰面于 $d_2e_2d_3$ 曲线, 并在此曲线上找到顶点 $e_2(u_{e2}, v_{e1}, S_{e2})$; 再固定 $u = u_{e2}$ 作截面找到 e_3 点, 几次垂直的“十字”截面的切割后即可找到单峰顶点 e_n , 往后的各次十字截面所求得的 e_n 点均为同一点. 计算结果发现, 一般地二次切面就可求得顶点, 即 $S_{\min}$ 位置.

在图 5 中的一维曲线寻找顶点时, 我们提出了“三点法”如图 6 所示, 沿 u 位移方向的一维曲线, 我们以 1pixel 搜索为例, 选相距为 1pixel 的连续三点 c_{-1}, c, c_{+1} , c 点可以是前一步处理时计算出的现曲线上的一点, 计算三点的 S 值, 则可能出现图 6 所示的三种情况, 若为中间点的 S 值最小的 (G) 情况, 则肯定该点为以 1pixel 搜索时的曲线的顶点, 否则, 只有左右 (E)(F) 两种情况, 若 (E) 则增中心点 c 的 u 值步长, 若 (F) 则减步长, 重新计算连续的三点 S 值, 并调节步长大小及符号, 最终就会达到 (G) 情况, 也就求出了 S 的最小值点.

我们先以 1pixel 为位移搜索量的最小单位, 再分别以 0.1pixel 和 0.01pixel 作最小单位重复上述的十字, 三点法过程分别搜索使 S 最小的位移 u, v , 故本文的位移可算

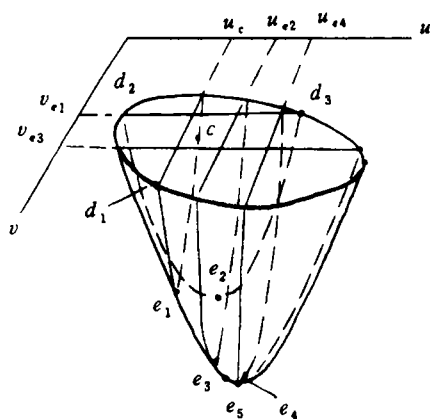


图 5
Fig.5

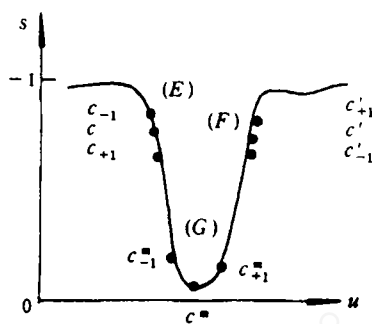


图 6
Fig.6

至 0.01pixel. 我们实验及计算发现, 小数像素位移搜索时, S 曲面单峰性仍很好.

以上分析可看出, 在单峰的寻找, 十字法求曲面顶点及三点法求曲线顶点的过程中, 根本无须逐点地计算二维区域的 S 值, 而只是归结为对一维曲线顶点的寻找问题, 一维曲线也不须逐点分析计算, 显然大大提高了计算处理速度, 也使计算精度的提高成为现实.

在实现高精度测量时, 下列技术问题是比较关键的.

A. 二子集相关时, 要求斑点在变形前后一一对应, 这就不允许斑点的光强在变形或移动后有变化, 否则变形前后子集就不会完全相关, 相关法就会不精确, 有时还会造成 $S(u, v)$ 曲面的多峰性以致找不到真实的位移值. 为此我们引进了“硬斑点”概念:

- 1) 颗粒反光性较好, 肉眼观察明显.
- 2) 颗粒牢固地定位于物体表面, 物体变形时, 它仅随基点平动或转动, 以保证反射光强基本不变.
- 3) 照射光为均匀光. 建议用白光.

满足这些条件的颗粒所产生的斑点称为“硬斑点”, 它是保证相关性, $S(u, v)$ 曲面单峰性的一个必要条件. 我们在实验中曾采用玻璃微珠, 铝屑作颗粒, 白光光源, 其效果很好, 曲面单峰性也十分好, 如图 4 和图 3a.

B. 在以 0.1pixel 和 0.01pixel 搜索位移时, 由 (1) 式求出的 x^*, y^* 是小数像素 (pixel) 值, 那时的灰度值需由 x^*, y^* 周围的四个整数像素位置处的灰度值插值得来, 以往的文献上采用的插值有双线性插值, 多项式插值和样条插值. 但本文的实验和计算发现, 双线性插值对计算 $u, v, \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 已满足精度要求, 这是由于 u, v 仅与相关系数曲面的“峰顶位置”有关, 而与“峰值大小”无关. 对灰度值的插值, 只对灰度值有影响而使 S 值有细微变化, 而与由位移决定的峰顶位置 (u^*, v^*) 无关. 以往文献对峰顶位置和峰值大小这两概念看法较为含糊, 造成对插值花费精力过多而对 u, v 测量收效甚微. 我们也曾用三次样条函数进行了插值, 发现所得结果与双线性插值几乎一样, 但计算量却大得惊人.

2 实验结果及分析

为了对本文所提出的新的数字散斑相关方法——十字搜索法进行实验验证，我们配置了微型计算机图像处理装置，编制了相应的计算机程序，并完成了二个简单的物体平移验证实验。测试装置简图如图 1。试件为涂有玻璃微珠漆的刚体，粘于可双向运动的精密移动平台上，在平台运动的两个方向上各装千分表以测量其位移，白光光源和摄像机靠近并垂直于试件待测面，移动试件，可摄得移动前后的两幅图，同时可由千分表读得两位移值。一台 AST286 微机配置 VC32 图像卡以及 CCD 摄像机组成的图像处理装置用来记录位移前后的散斑图。在运行编制的数字图像相关计算程序后，就可算出试件上感兴趣的点的位移值。

所取试件与图像之间放大倍数选为 $(512/58)\text{pixel/mm}$ ，算到 0.01pixel 量级，故在此放大倍数下，对应的测量灵敏度为 $1\mu\text{m}$ 。

表 1 为待测点处附近不相关系数和位移值的数据。已测得位移和不相关系数为

$$u^* = -1.63, \quad v^* = 3.0\text{E} - 02, \quad S^* = 2.089\text{E} - 02$$

我们分别固定 u^* 和 v^* ，对应地 v 和 u 以 0.01pixel 变化来计算 S 值如表 1。

表 1 u^*, v^* 附近的 $u, v(\text{pixel})$, S 值
Table 1 The S value around (u^*, v^*) vicinity

v^*	u	-1.67	-1.66	-1.65	-1.64	-1.63*	-1.62	-1.61	-1.60	-1.59
0.03	$S(10^{-2})$	2.114	2.104	2.096	2.091	2.089	2.091	2.096	2.104	2.115
u^*	v	-0.01	0	0.01	0.02	0.03*	0.04	0.06	0.07	0.08
-1.63	$S(10^{-2})$	2.104	2.100	2.096	2.091	2.089	2.092	2.110	2.125	2.145

注：* 为测点处 u, v 值

可见， u^*, v^* 处 S 值确为最小值，它确实为最相关处，本文方法的灵敏度确实为 0.01pixel ，说明本文方法的可靠性。表 2 为验证实验结果。

表 2 相关方法测量位移的数据比较 (mm)

Table 2 The comparison of results measured by correlation or dial indicator

Correlation	0.095	0.198	0.292	0.403	0.249	0.500	0.602	0.659
dial	0.100	0.200	0.300	0.400	0.250	0.500	0.601	0.652
error	5%	1%	3%	1%	0.4%	0	0.2%	1%

我们曾用 Peters, Sutton 等人提出的逐点搜索法计算过相关，并就其在 286 微机上所费的 CPU 时间作了比较，计算子集尺寸为 $9 \times 9\text{pixel}$ 的一点位移时，逐点法 (算至 0.1pixel) 需 3 分多钟，本文方法 (算至 0.01pixel) 仅需 5 秒左右。约快 36 倍多。对于变形体，则求出位移场后，再用数值计算方法即可求得应变场，但测量时，宜将放大倍数提高，在应变对子集变形影响较小时尽量加大子集尺寸，以确保相关性。

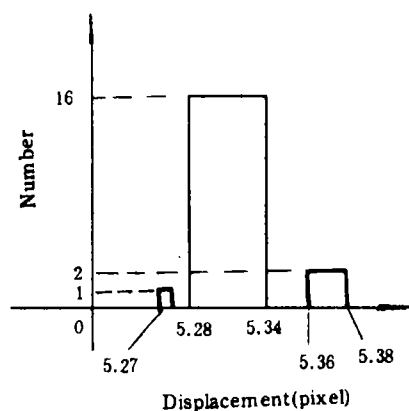


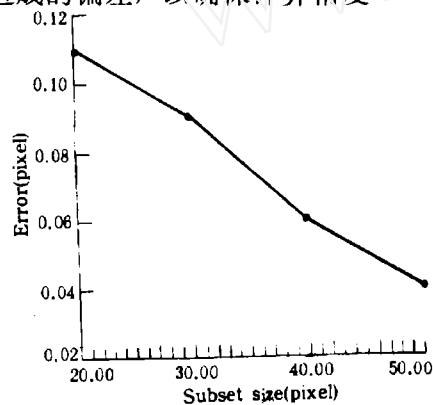
图 7
Fig.7

我们还分析了斑点对测量精度及子集尺寸对计算速度的影响. 我们取图 1 所示试件上均布的 19 个点, 让试件有一刚体位移, 由于粒子分布的不均匀性等因素, 算得的 19 个点的位移范围为 (5.27—5.38)pixel, 其直方图如图 7. 去掉最大最小值, 由斑点不均匀等造成的测量绝对偏差为 0.06pixel, 换算成长度 (放大倍数同上) 为

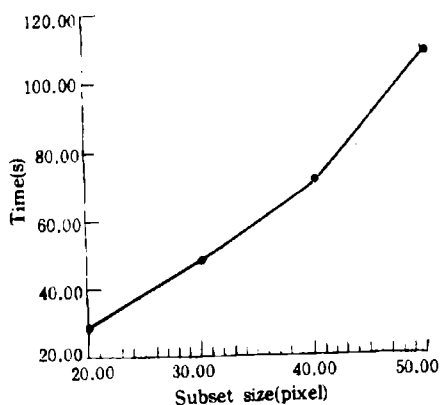
$$\Delta = 0.06 \times 58/512 = 0.006(\text{mm}) = 6(\mu\text{m})$$

故测量偏差为 $\pm 3\mu\text{m}$.

由相关统计特性, 理论上说, 子集尺寸大些会提高精度, 但计算速度会下降. 我们研究了子集大小和偏差及计算时间的关系, 列出曲线如图 8(a),(b). 比较 (a),(b) 两图, 建议使用 (40×40) 或 (50×50) 像素作为子集尺寸, 以减少由于斑点不均匀等因素造成的偏差, 以确保计算精度.



(a)



(b)

图 8
Fig.8

3 结 论

1. 文中所用的相关系数公式比以往文献的更为合理, 试件表面斑点只要满足“硬斑点”的要求, 就能精确测算出位移场.
2. “硬斑点”条件是保证 $S(u, v)$ 曲面单峰性的必要条件, 对灰度值的插值仅需双线性插值公式.
3. 对于二维单峰空间凸曲面 $S(u, v)$, 且 $S(u, v)$ 值均为离散值的情况, 十字搜索法是一种快速且精确的寻找最小值的方法, 它使 DCT 法更加实用.
4. 实验结果表明, 本文方法测量精度较高, 若改变放大倍数, 仍可能提高测量灵敏度及精度. 要求尽量使子集尺寸大些以确保相关精度.

参 考 文 献

- 1 Peters WH and Ranson WF. Digital image techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, 1982, 21: 427-432
- 2 Sutton MA, et al. Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method. *Computer Vision*, Aug. 1983: 133-139
- 3 Peters WH. Applications of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 1983, 22: 738-742
- 4 Chu TC, et al. Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics. *Experimental Mechanics*, Sep. 1985: 232-244
- 5 Sutton MA. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 1986, 4: 143-150
- 6 Bruck HA, et al. Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction. *Experimental Mechanics*, Sep. 1989: 261-267
- 7 高建新. 数字散斑相关方法及其在力学测量中的应用. 清华大学博士论文, 1989
- 8 阿尔德 HL, 罗斯勒 EB. 概率与统计导论. 北京大学出版社, 1984

A NEW DIGITAL SPECKLE CORRELATION METHOD AND ITS APPLICATION

Rui Jiabai Jin Guanchang Xu Bingye

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A new improved digital speckle correlation method—cross search method was described in this paper. The method will greatly reduce the computing time, and thus the applications of digital correlation method using personal computer can be realized. A new formula for calculating correlation coefficient was presented based on the probability theory. By this formula, the measuring accuracy of digital correlation method can be greatly improved. Some technique problems for obtaining high precision were discussed. The primary experimental results show that this method is a fast, precise method for displacement and strain measurements.

Key words digital speckle, correlation, image, deformation