

数字图像相关方法中的应变测量平滑算法

秦 飞, 魏建友

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘 要: 为了降低数字图像相关方法测得的位移场不协调导致的应变误差, 采用有限元法中的分片光滑概念和最小二乘法拟合出连续位移场, 对位移场求导得到应变场. 实验结果表明, 光滑后的位移和应变误差得到了明显改善.

关键词: 数字图像; 应变测量; 平滑算法

中图分类号: TN 247

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2008)08-0815-05

数字图像相关(digital image correlation, 简称 DIC)^[1-2]方法是一种迅速发展起来的光、力学测量技术. 该方法主要用于对材料或者结构表面在载荷作用下的位移场和应变场进行测量. 它具有全场测量、非接触、对测量环境无特别要求等突出的优点^[3]. 微电子封装中的焊锡接点, 由于尺寸微小, 采用应变计对其进行变形测量比较困难, 而 DIC 方法的特点使其比较适于焊点的变形测量^[4-7]. 一般做法是首先测出位移, 然后对位移求导计算应变. 由于测出的位移是离散的, 测量误差在求导时被放大, 所以计算出的应变有较大的误差^[8].

为提高应变测量精度, 作者在测出位移后, 借助有限元法分片光滑思想, 采用最小二乘法拟合出光滑、连续的位移场, 对该光滑位移场求导计算应变.

1 数字图像相关方法的基本原理

数字图像相关方法是根据物体表面随机分布的斑点的反射光强分布在变形前后的概率统计相关性确定位移. 图 1 给出了物体变形前后的 2 个灰度矩阵, 点 (x, y) 经位移 r 运动到 (x^*, y^*) , 位移 r 在 x 、 y 轴上的分量为 (u, v) . 在点 (x, y) 周围取样本矩阵 $F_1(x, y)$. 物体变形后, 样本矩阵也发生了相应的变形, 灰度分布为 $F_2(x^*, y^*)$. 若忽略变形造成的光强细节分布变化, 则可认为物体表面上的灰度分布不发生变化, $F_1(x, y)$ 与 $F_2(x^*, y^*)$ 相比仅仅发生了位置的移动, 即

$$F_1(x, y) = F_2(x + u, y + v) \quad (1)$$

因此, 当 $u = x^* - x, v = y^* - y$ 时, 子矩阵 $F_1(x, y)$ 与 $F_2(x^*, y^*)$ 是完全相关的. 数字图像相关方法通过计算原始散斑中灰度分布矩阵 $F_1(x, y)$ 与变形散斑中相应点的目标灰度矩阵 $F_2(x^*, y^*)$ 的相关性求 u, v .

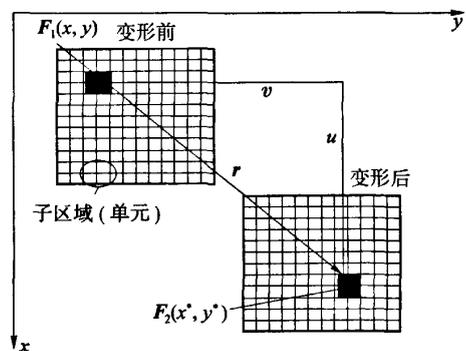


图 1 DIC 方法原理

Fig.1 Principle of DIC method

收稿日期: 2007-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572010);北京市教育委员会科技发展资助项目(KM200610005013);北京市先进制造技术重点实验室开放课题资助项目(102KB00732).

作者简介: 秦 飞(1965-), 男, 河南新郑人, 教授.

为了计算相关性,需要选取一个合适的相关度量函数

$$C(u, v) = C(F_1(x, y), F_2(x + u, y + v)) \quad (2)$$

该函数在 $\{u, v\}$ 处取最大值. 由此可见,为了测量 u, v , 只需在变形后的物体上找到 $C(u, v)$ 取最大值的目标矩阵位置即可, 选用

$$C = \frac{\sum \sum (F_1(x, y) - \bar{F}_1) \cdot (F_2(x^*, y^*) - \bar{F}_2)}{\sqrt{\sum \sum (F_1(x, y) - \bar{F}_1)^2 \cdot \sum \sum (F_2(x^*, y^*) - \bar{F}_2)^2}} \quad (3)$$

作为相关度量函数, 当 C 最大时通过 $u = x^* - x, v = y^* - y$ 求得位移. 其中 \bar{F}_1, \bar{F}_2 分别为变形前后子矩阵的平均灰度值. 为得到目标矩阵位置, 采用粗-细搜索迭代算法^[9].

2 离散位移场的光滑算法

2.1 位移场拟合

在子区域上建立具有 4 个节点的单元, 设节点的位移值为 $u_k (k = 1, \dots, 4)$, 则单元内连续的位移场可以用形函数 $s_k(x, y)$ 表示为^[10]

$$u^{\text{con}}(x, y) = \sum_{k=1}^4 u_k s_k(x, y) \quad (4)$$

设单元内包含 n 个测点, 采用最小二乘法进行拟合可以求得 4 个单元节点的位移值. 由最小二乘法建立函数

$$\Pi = \sum_{i,j} \left[\sum_{k=1}^4 u_k s_k(x_i, y_j) - u^{\text{dis}}(x_i, y_j) \right]^2 \quad (5)$$

式中 $u^{\text{dis}}(x_i, y_j)$ 是单元内 n 个测量位移值. 当函数 Π 取最小值时所得的 u_k 就是最小二乘光滑后的 4 个节点位移.

单元大小选择时要考虑被测试件的大小、试件上划分网格的疏密等因素, 而且使所包含的被测点数大于单元的节点数.

将式(5)对 u_k 求偏导得到

$$\sum_{i,j} \left[\sum_{k=1}^4 u_k s_k(x_i, y_j) - u^{\text{dis}}(x_i, y_j) \right] s_l(x_i, y_j) = 0 \quad i, j \in R, l = 1, \dots, 4 \quad (6)$$

R 是单元覆盖的子区域. 将式(6)展开得到

$$\sum_{i,j} \left[\sum_{k=1}^4 u_k s_k(x_i, y_j) \right] s_l(x_i, y_j) = \sum_{i,j} u^{\text{dis}}(x_i, y_j) s_l(x_i, y_j) \quad (7)$$

由于单元子域 R 内共有 n 个测量点, 所以将式(6)简化为

$$\sum_{m=1}^n \sum_{k=1}^4 s_k(x_m) s_l(x_m) u_k = \sum_{m=1}^n u^{\text{dis}}(x_m) s_l(x_m) \quad (8)$$

为保证整个区域拟合出的位移场是协调的, 需要将所有单元组装, 得到包含所有 N 个节点位移的线性代数方程组. 组装的方法和有限元法完全相同, 组装后的方程为

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \cdots & a_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

将该代数方程组求解, 即得到所有节点的位移值.

2.2 应变计算

将解得的节点位移代回式(4), 得到每个单元上的连续位移场, 通过求导进一步得到单元应变

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x^{\text{con}}(x, y)}{\partial x} = \sum_{k=1}^4 u_k \frac{\partial s_k(x, y)}{\partial x} \tag{10}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial u_y^{\text{con}}(x, y)}{\partial y} = \sum_{k=1}^4 v_k \frac{\partial s_k(x, y)}{\partial y} \tag{11}$$

$$\gamma = \frac{\partial u_y^{\text{con}}(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial u_x^{\text{con}}(x, y)}{\partial y} = \sum_{k=1}^4 v_k \frac{\partial s_k(x, y)}{\partial x} + \sum_{k=1}^4 u_k \frac{\partial s_k(x, y)}{\partial y} \tag{12}$$

式中, ϵ_x 为 x 向的正应变; ϵ_y 为 y 向的正应变; γ 为剪应变; $u_x^{\text{con}}(x, y)$ 、 $u_y^{\text{con}}(x, y)$ 分别为 x 、 y 方向的位移场; u_k 、 v_k 分别为节点在 x 、 y 方向的位移。

3 实验验证与分析

3.1 实验装置

为了验证本文的方法, 采用如图 2 所示的实验装置. 摄像机采用 JVC 牌 TK-C1381EG 型号 CCD 摄像机; 光源采用普通节能白光灯; 试件为 Q235 钢板 (尺寸为 75 mm × 12.5 mm × 3 mm). 本文对试件在刚体位移以及拉伸情况下的位移分别进行了搜索验证, 图像放大倍数为 83.3 μm/像素, CCD 摄像机与试件的距离为 80 cm. 图 3 为制有散斑的试件. 散斑的制作方法为: 先在试件表面喷涂白漆作为底色, 再用黑漆在其表面制作散斑点, 黑斑点尺寸为 0.38 mm.

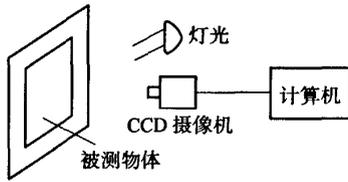


图 2 实验装置
Fig. 2 Test setup

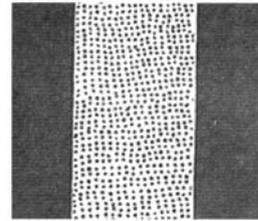


图 3 试件与散斑
Fig. 3 Specimen

3.2 刚体位移

将试件一端夹持在试验机上进行刚体平移, 采集不同位移值的试件图像, 位移值由拉伸试验机上的光栅位移传感器进行记录. 以位移为 0 mm 时的散斑图像为基准, 取试件位移为 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、1.75、2.00 mm 时的散斑图像进行相关计算. 光滑前后试件位移绝对误差对比见图 4. 可以看到, 光滑前的最大绝对误差约 0.008 像素; 光滑后的最大绝对误差约 0.003 像素, 降低了 62.5%. 图 5 所示为光滑前后试件位移相对误差对比. 随着位移的增大, 相对误差逐渐降低, 这是由于绝对误差稳定在一个固定

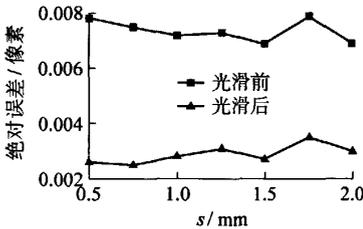


图 4 光滑前后位移绝对误差对比
Fig. 4 Displacement error before and after smoothing

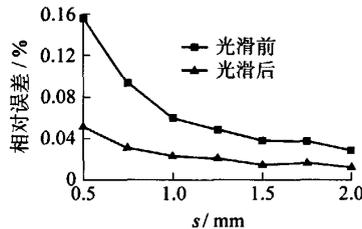


图 5 光滑前后位移相对误差对比
Fig. 5 The percentage displacement error before and after smoothing

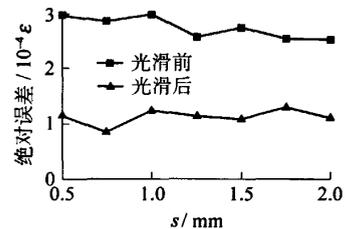


图 6 光滑前后应变绝对误差对比
Fig. 6 Strain error before and after smoothing

的范围内浮动,不随位移增大而增大.光滑后试件位移的相对误差也明显低于光滑前.图6为光滑前后试件应变绝对误差曲线对比,光滑前的应变最大误差为 $2.96 \times 10^{-4} \epsilon$,而光滑后应变的误差为 $1.2 \times 10^{-4} \epsilon$ 左右,误差降低了约60%.同时可以看到,随着位移的增大应变误差并没有太大改变,表明测量系统误差的影响一直存在,并保持在一个固定范围内波动,所以,当应变较小时,测量系统误差会对测量结果产生较大的影响.

3.3 单向拉伸

取载荷为15.03 kN和16.42 kN的2种情况进行分析.光滑前测得的最大位移为45像素,最小位移为38.9像素,如图7所示.光滑后最大位移为44.6像素,最小位移为39.1像素.从图8可看出,光滑后位移场是连续、平滑的.

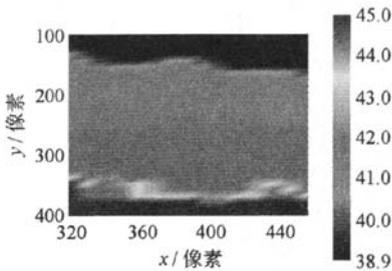


图7 光滑前位移场

Fig. 7 Displacement field before smoothing

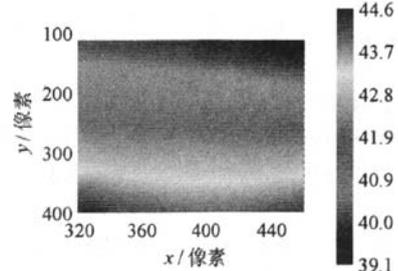


图8 光滑后位移场

Fig. 8 Displacement field after smoothing

光滑前物体各被测点应变平均值为0.02,标准偏差为0.0408;光滑后物体各被测点应变平均值为0.016,标准偏差为0.002.从数据上看,光滑前后测得的应变平均值与引伸计测得的平均应变值0.016基本一致,但光滑前应变值的标准偏差大,即浮动范围较大,而光滑后应变标准偏差明显变小,各点的应变趋于一致,更趋近于试件真实的应变.

4 结束语

作者基于DIC方法对离散位移场采用最小二乘法拟合出光滑、连续的位移场,通过对该位移场求导计算应变,提高了DIC方法的测量精度.实验结果验证了本文方法的可行性和有效性.DIC方法的系统误差保持在一个固定范围内波动,当试件本身应变较小时,系统误差将会对测量结果产生较大影响,本文提出的光滑算法可以明显降低系统误差的影响.

参考文献:

- [1] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Opt Eng, 1982, 21(3): 427-431.
- [2] YAMAGUCHI I. Laser-speckle strain gauge[J]. J of Physics E: Scientific Instrument, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [3] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 192-203.
WANG Huai-wen, KANG Yi-lan, XIE He-ping. Advance in digital speckle correlation method and its application[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 192-203. (in Chinese)
- [4] LU H, YE H C P, WYATT K. Experimental evaluation of solder joint thermal strain in a CSP using digital speckle correlation[C]//BHAVNANI S H, KROMANN G B, NELSON D J, et al. I THERM'98; Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermo Mechanical Phenomena in Electronic Systems, Washington, 1998-05-27-30. New York: IEEE Press, 1998: 241-245.
- [5] LU H, YE H C P, DAI J B. Experimental evaluation of effect of global to local interaction on HDI solder joint deformation

- [C]//Proceeding of 49th Electronic Components and Technology Conference, San Diego, 1999-06-01-04. Piscataway: IEEE Press, 1999: 469-474.
- [6] ZHOU P, GOODSON K. Thermo mechanical diagnostics of BGA packages using digital image/speckle correlation[C]// KROMAMN G B, CULHAM J R, RAMAKRISHNA K, et al. IOTHERM 2000: Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermo Mechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas, 2000-05-23-26. New York: IEEE Press, 2000: 240-245.
- [7] 张军辉, 冯平, 蔡增伸, 等. DSCM 在中温环境下 SnSb8.5 焊丝变形测量中的应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2006, 34(5): 567-570.
ZHANG Jun-hui, FENG Ping, CAI Zeng-shen, et al. Application study on deformation measurement in mid-temperature environment for SnSb8.5 welding wire using DSCM[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2006, 34(5): 567-570. (in Chinese)
- [8] SHI Xun-qing, PANG H L J, ZHANG X R, et al. In-situ micro-digital image speckle correlation technique for characterization of materials' properties and verification of numerical models[J]. Transactions on Component and Packaging Technologies, 2004, 27(4): 659-667.
- [9] SUTTON M A, WOLTERS W J, PETERS W H, et al. Determination of displacement using an improved digital correlation method[J]. Computer Vision, 1983, 1(3): 133-139.
- [10] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版, 2003.

Smoothing Algorithm for Strain Measurement in Digital Image Correlation Method

QIN Fei, WEI Jian-you

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: In order to reduce the error in strain which is caused by the digital image correlation method, an approach is proposed in which a continuous displacement field is constructed firstly to fit the discrete measure points by the technique used in the finite element method and the least square method, then the strain is calculated from the continuous displacement field. The results indicate that error in displacement and strain can be significantly reduced by the proposed approach.

Key words: digital image; strain measurement; smoothing methods

(责任编辑 梁 洁)