

# 基于图像处理技术的数字散斑照相\*

刘 诚 高淑梅

(徐州师范大学物理系, 徐州 221009)

**摘 要** 提出一种新的数字散斑照相计量方法, 该方法将 CCD 和计算机相结合, 在自然光照明下对被测量物体照相, 通过一种快捷的图像处理技术, 直接提取出物体变形信息。突破传统光测的激光照明及傅里叶变换模式, 实现光测量技术真正自动化。

**关键词** 图像处理技术, 散斑照相, 傅里叶变换, 非相干光散斑。

## 1 引 言

光测量技术的现代化是从 CCD 摄像机等电子元件进入此领域开始的, 以光敏的电子元件代替传统的银盐胶片, 摆脱烦琐的湿处理过程, 测量速度大为提高。这类光测技术大体可分为两大类, 一类以数字散斑干涉(DSPI)<sup>[1]</sup>为代表, 另一类以数字相关测量<sup>[2]</sup>为代表。从测量技术本质而言, 这两类方法截然不同, 前者以图像相减为基础, 仍需激光照明, 得到的是全场景的测量信息, 测量精度在光波长数量级, 只适合小形变测量; 后者以相关计算为基础, 可以用白光照明, 但直接得到的是点测量信息, 公认的测量精度为 0.01 个像素(合 0.1  $\mu\text{m}$ ), 能够测量大形变。二者优缺点非常明显, 前者的缺点是必须激光照明, 测量环境受到限制, 后者只提供点信息, 信息量有限。为了将两者结合(在计算机辅助下用白光测出全场测量信息)光测人员已经进行了大量研究。其中, 文献[3, 4]在白光下利用傅里叶变换技术得到逐点信息的扬氏条纹图, 文献[5]用和传统方法相类似的偏心滤波技术得到全场条纹信息, 开辟了数字散斑照相技术的先例, 取得较大的进步。以上方法的突出特点是都采用傅里叶变换技术, 全场测量时需进行两次傅里叶变换, 计算量非常大, 即使是快速变换法在时间上仍然不经济; 同时快速傅里叶变换使部分信息特别是高频信息不可避免遭到丢失, 使全场条纹清晰度变差, 给实际测量带来困难。本文提出一种快捷的处理方法, 它突破传统光测的激光照明及傅里叶变换模式, 一次得到全场条纹信息, 较好地解决了上述问题。

## 2 理论分析

数字散斑照相的原理如图 1 所示, 被测量物体在变形前后分别被拍摄一幅图像, 同时将图像的灰度值数字化后存入计算机。设在物体变形前 CCD 靶面上各像素的灰度分布为  $\varphi(i,$

\* 师范大学青年自然科学基金资助课题(QL9706)。

收稿日期: 1998-07-02; 收到修改稿日期: 1998-08-31

$j$ ), 物体变形后靶面上各像素的灰度分布为  $\mathcal{Q}(i, j)$ , 其中  $(i, j)$  为整数, 它表示像素坐标位置。由于两幅图像是同一个物体变形前后的像的灰度分布, 若设由于物体的变形使原来在第  $(i, j)$  个像素上的点于  $x$  和  $y$  两个方向的位移分别为  $d_i, d_j$  个像素, 则两个灰度分布函数有如下关系:  $\mathcal{Q}(i, j) = \mathcal{Q}(i + d_i, j + d_j)$ , 若将以第  $(I, J)$  个像素为中心的一个小区域  $\sigma$  内各像素的灰度值采用如下算法,

$$\Phi(I, J) = \sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) - \mathcal{Q}(i, j)] \sin(k_x i + k_y j) \tag{1}$$

其中  $k_x, k_y$  为给定的参数, 在物体发生应变时, 对于大部分像素, 其移动后的点  $(i + d_i, j + d_j)$  仍然在  $\sigma$  内, 同时若  $\sigma$  区域足够小时, 可以认为在  $\sigma$  区域内  $k_x d_i, k_y d_j$  近似不变, 令:  $d_i = d_I, d_j = d_J$  则上式可变为:

$$\Phi(I, J) = 2 \sin\left(\frac{k_x d_I + k_y d_J}{2}\right) \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos\left(k_x i + k_y j - \frac{k_x d_I + k_y d_J}{2}\right) \tag{2}$$

容易看出  $\Phi(I, J)$  是和物体各点位移有关的正弦条纹图, 通过条纹的定阶可以测量出物体各点的形变量  $(d_I, d_J)$ , 若只需要测量  $x$  方向的各点位移, 只要令  $k_y = 0$ , 此时:

$$\Phi(I, J) = 2 \sin\left(\frac{k_x d_I}{2}\right) \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos\left(k_x i - \frac{k_x d_I}{2}\right) \tag{3}$$

### 3 信息增强

(3) 式中求和号外的正弦函数为测量信息, 求和号所代表的一组余弦函数的和为干扰项。理论上由(3)式可以得到和物体位移有关的条纹图, 但是实际操作中却有很大的困难, 这只要和传统散斑照相的条纹图表达式(4)作比较即可理解<sup>[6]</sup>,

$$I(x, y) = a^2 s(x, y) \cos^2(f_x \mu + f_y \nu) \tag{4}$$

(3) 式的  $k_x$  相当于(4)式空间频率  $f_x$ , (3) 式求和号内的部分相当于  $s(x, y)$ 。 $s(x, y)$  为散斑图的轮廓函数, 是物体的理想像和成像系统点扩散函数的卷积结果, 仍然具有散斑特性, 所以最后得到受余弦函数调制的散斑图, 但是(3)式求和号内本身就是一个具有单一周期的余弦函数, 且周期和求和号外的正弦函数周期相同, 根据微扰理论, 求和号外的条纹信息将被求和号内的干扰项淹没, 简单地利用(3)式便难以得到有意义的测量条纹。必须采用特定的算法来进行信息增强, 将干扰项从(3)式中去掉, 只保留求和号外的条纹信息。令

$$\Phi(I, J) = \sum_{\sigma} \{[\mathcal{Q}(i, j) + \mathcal{Q}(i, j)] \cos(k_x i + k_y j)\}$$

和(3)式同理

$$\Phi(I, J) = 2 \cos\left(\frac{k_x d_I + k_y d_J}{2}\right) \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos\left(k_x i + k_y j - \frac{k_x d_I + k_y d_J}{2}\right) \tag{5}$$

考虑只测量  $x$  方向位移的情况时, (5)式变为:

$$\Phi(I, J) = 2 \cos\left(\frac{k_x d_I}{2}\right) \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos\left(k_x i - \frac{k_x d_I}{2}\right) \tag{6}$$

(6) 式和(3)式的平方和为:

$$\Psi(I, J) = 4 \left[ \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos\left(k_x i - \frac{k_x d_I}{2}\right) \right]^2 \tag{7}$$

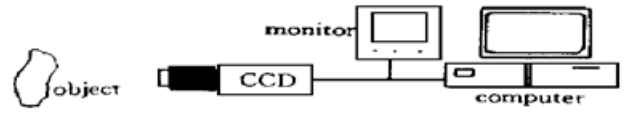


Fig. 1 System diagram for digital speckle photography

上式开平方得:

$$\sqrt{\Psi(I, J)} = 2 \sum_{\sigma} \mathcal{Q}(i, j) \cos(k_x i - \frac{k_x d_l}{2}) \quad (8)$$

将(3)式取绝对值后除以(8)式得:

$$f_x(I, J) = \left| \sin\left(\frac{k_x d_l}{2}\right) \right| \quad (9)$$

$f_x(I, J)$  是关于第  $(I, J)$  像素在  $x$  方向位移的正弦条纹图, 和(3)式相比, 它完全消除了随机项的干扰, 条纹的清晰度应有大幅度提高。归纳上述公式:

$$f(I, J) = \left| \sin\left(\frac{k_x d_l + k_y d_l}{2}\right) \right| = \frac{|\Phi(I, J)|}{\sqrt{\Psi(I, J)}} = \frac{|\Phi(I, J)|}{\sqrt{\Phi(I, J) + \Phi^2(I, J)}} = \frac{|\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) - \mathcal{Q}(i, j)] \sin(k_x i + k_y j)|}{\sqrt{\{\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) + \mathcal{Q}(i, j)] \cos(k_x i + k_y j)\}^2 + \{\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) - \mathcal{Q}(i, j)] \sin(k_x i + k_y j)\}^2}} \dots \quad (10)$$

若需要检测某一个特定方向的位移(如  $x$  方向), 则上式转化为:

$$f_x(I, J) = \left| \sin\left(\frac{k_x d_l}{2}\right) \right| = \frac{|\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) - \mathcal{Q}(i, j)] \sin(k_x i)|}{\sqrt{\{\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) + \mathcal{Q}(i, j)] \cos(k_x i)\}^2 + \{\sum_{\sigma} [\mathcal{Q}(i, j) - \mathcal{Q}(i, j)] \sin(k_x i)\}^2}} \quad (11)$$

由上式可知, 在像面上, 位移满足下式的地方呈现暗条纹。

$$\frac{k_x d_l}{2} = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, 4 \dots \quad (12)$$

实际测量时, 只要将物体变形前后所采集的两幅图像  $\mathcal{Q}(i, j)$  与  $\mathcal{Q}(i, j)$  代入(11)式, 即可得到和物体位移有关的正弦条纹图。

以上讨论是在像面上进行的, 若设光学成像系统的垂轴放大率为  $M$ , 则物体的真实位移  $d = d_l/M$ , (12)式相应变为

$$k_x M d / 2 = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, 4 \dots \quad (13)$$

## 4 光学系统选取与测量精度

据(13)式, 若物体全场最大面内位移为  $d_{\max}$  个像素, 则像面上全场条纹的个数  $n = k_x M d_{\max} / 2\pi$ , 一般情况下测量精确度和条纹数成正比, 所以从测量精度看  $M k_x d_{\max}$  取较大值有利于测量; 另一方面上述各公式成立的前提条件是: 在求和区域  $\sigma$  中  $k_x d_l$  应基本保持不变, 这就要求物体的应变和  $k_x$  要足够小, 若物体的应变一定, 则  $k_x$  要取尽量小值。同时满足上面两点, 成像系统的垂轴放大率  $M$  必须足够大, 即对于应变一定的物体, 其像越大越有利于测量。

对于一般拍摄图像用的面阵 CCD, 其像元数为  $512 \times 512$ , 靶面面积约  $4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 所以其光学系统的放大率对一般物体而言不能达到要求, 用一只面阵 CCD 采集图像不可能得到良好条纹图。为了有效地增大系统放大率, 测量时可以考虑用多个 CCD 对同一个物体分段拍摄的方法。在本文下面的实验中, 为了使装置简单同时又能够说明问题, 使用线阵 CCD 测

量物体在一条直线上的变形情况。CCD 型号为 TCD1500C, CCD 的像元数为 5340, 像元宽  $7 \mu\text{m}$ , 靶面总宽度为 3.74 cm, 从实验的实际情况来看, 符合上述测量要求。

由(13)式可以看出, 物体的位移  $d = 2n\pi/k_x M$ , 众所周知, 散斑照相用于实际测量时, 要求全场至少有 1 个条纹, 所以此方法的最小测量精度  $d_{\min} = 2\pi/k_x M$  个像素(需注意的在以上所讨论的过程中, 有关长度的物理量皆以像素为单位, 若化成普通长度量纲, 还需要乘以每个像素的宽度)。它不仅和光学系统的垂轴放大率  $M$  有关还和选取的参数  $k_x$  有关,  $M$  越大测量精度愈高; 从  $d_{\min} = 2\pi/k_x M$  看, 好象  $k_x$  取大值对测量精度有利, 但是由于前面谈及的原因其取值要受到限制, 具体取多少应按实际情况来决定, 一般应变较大时必须取较小值, 应变较小时可以取较大值, 只要能够保证在求和区域  $\sigma$  中  $k_x d_l$  基本保持不变这一前提条件即可, 所以此方法的测量精度可以根据实际测量需要调整。

### 5 实验及结果

实验原理如图1所示, 被测量物体为图2所示的长条形发泡塑料, 长为30.0 cm, 宽为4.0 cm, 厚度为2.7 cm, 表面作人工斑化处理, 其一端竖直固定在基座上, 在自由端沿中心轴线方向将物体压缩,  $d$  表示压缩量, 用上述方法测量在中心轴线方向上物体各点因受压缩而引起的位移曲线。

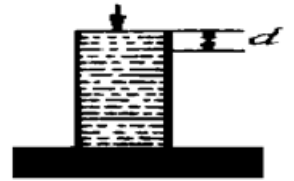


Fig. 2 Diagram for measured object

线阵 CCD 靶面平行于物体被压缩方向放置. 用成像镜头将物体成像于靶面上, 物体表面中心线上的散斑灰度分布信息可以从 CCD 靶面上直接读出, 系统物距为 85 cm, 像距离为 8 cm。在物体变形前采集一次物体表面散斑灰度分布数据, 作为前述各公式中的  $\varphi(i, j)$ 。

在自由端压缩量分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 和 2.0 mm 4 种情况下, 对物体分别进行 4 次照相, 采集四次散斑亮度数据作为四种不同应变下的  $\varphi(i, j)$ 。根据(11)式, 得到物体中心线上各点在四种形变下相应的四个位移正弦曲线  $f_x(I, J)$ , 图 3(a) 是物体压缩量为 0.5 mm 时, 物体中心轴线上不同点的因压缩而产生的位移正弦曲线, 相应(b)、(c)、(d), 分别是压缩量为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 时各点的位移曲线, 横坐标为物体长度, 单位为厘米, 为使图线清楚, 画图时, 纵坐标取实际值的十倍。计算时  $k_x = 1$ 。从图中可以看出, 理论和实验符合的较好, 同时可发现在压缩量为 2.0 mm 时, 此方法得到的条纹图的对比度已经严重下降, 按上所述原因, 此时像面上求和区域内各点的位移已经不再近似相等, 不符合本文各公式成立的前提条件, 此时这种测量方法已经失效。

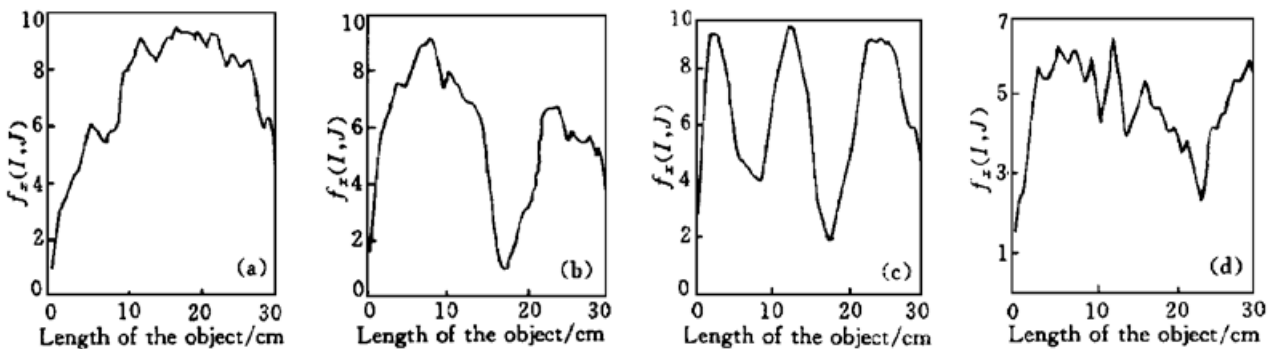


Fig. 3 Fringe pattern of the experiment for  $d = 0.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm}$  respectively

**结 论** 从理论及实验两方面, 提出一种新的白光数字散斑照像处理方法, 它突破利用傅里叶变换法的提取信息的常规模式, 在白光条件下实现快速自动化全场条纹信息测量, 在光测技术走出实验室方面有实用意义。

### 参 考 文 献

- [1] Nakadate S, Yatagai T, Saito H. Computer-aided speckle pattern pinterferometry. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(2) : 237~ 243
- [2] Peters W H, Ranson W F, Sutton M A *et al.*. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.*, 1990, **25**(3) : 232~ 244
- [3] 方 强, 姚 虹, 谭玉山. 白光数字散斑照相技术. 光学学报, 1990, **10**(10) : 932~ 937
- [4] 胡逸群, 谷士文, 费耀平等. 用数字图像技术直接对双曝光散斑图逐点分析. 光学学报, 1993, **13**(8) : 734~ 739
- [5] Chen F, Griffen C T, Hung Y Y. White light digital speckle photography for measuring rigid body motion. 光学学报, 1995, **15**(9) : 1235~ 1239
- [6] 顾 杰, 沈永昭, 姜锦虎. 全场分析的 Moire 理论. 中国激光, 1987, **14**(10) : 607~ 611

## Digital Speckle Photograpy Based on Image Processing

Liu Cheng      Gao Shumei

(*Physics Department Xuzhou Normal University, Xuzhou 221009*)

(Received 2 July 1998; revised 31 August 1998)

**Abstract** A new technology of digital speckle photography is presented. It combines the CCD with a computer. By using a quick processing algorithm the whole field information is obtained directly, the Fourier transform and coherent laser is abandoned in this technology.

**Key words** image processing, speckle photograph, Fourier transform, incoherent speckle.