

时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用*

李善祥 孙一翎 李景镇

(深圳大学工程技术学院光信息系, 深圳 518060)

摘 要 在对散斑场的特性进行研究与分析的基础上, 提出了时间序列动态散斑相关跟踪测量法, 它弥补了一般散斑相关法不适合大变形测量的缺点, 扩大了散斑相关法的应用范围. 运用这种方法不仅可以测量大动态范围的面内变形, 而且可以测量分析面内动态变形过程和变形速度.

关键词 散斑; 数字散斑相关; 时间序列动态散斑图; 散斑相关跟踪测量

中图分类号 TN212; TN249

文献标识码 A

0 引言

数字散斑相关法中, 用 CCD 摄像机记录被测物体表面变形前、后的散斑图像, 然后用计算机处理数字图像数据得出变形信息. 与其它测量方法相比具有测量光路简单、对测量环境要求不高、可进行非接触测量等优点, 因而在面内变形或位移测量中得到广泛的应用. 但由于散斑相关法原理本身的原因它只适用于微小变形或位移(一般不大于 10 个像素)的测量. 本文在分析一般散斑相关法不能测量面内大变形原因的基础上, 提出了一种能克服上述缺点的利用时间序列动态散斑图的数字散斑相关跟踪法, 这种方法不仅可以测量大动态范围的变形或位移, 还能分析面内各点动态变形过程和变形速度, 扩大了散斑相关法的应用范围.

1 数字散斑相关法原理及局限性

在数字散斑相关法中, 用一束激光照明被测物体表面并拍摄物面变形前、后的散斑图像. 被激光照明的物体可看作表面粗糙的漫反射体, 表面上每一点都可看作互相独立的散射基元^[1], 产生散射光(子波), 散射光经摄像机镜头在像面上产生一个衍射斑(相干脉冲响应), 所有衍射斑相干迭加形成亮暗相间的光场分布——散斑场(即物面的散斑图). 由于散斑分布是随机的, 散斑图上每一点周围的一个小区域(通常取为 $L \times L$ 的小图像, 以下称为该点的子图像)的散斑分布与其它点的子图像就不一样. 当物面在某种物理原因的作用下发生微小变形时, 可以认为变形只改变散射基元的空间位置而基本上不影响其散射特性, 因而也基本上不影响散斑场的微观结构, 这样散斑图上每一点的子图像也基本上

仅仅随该点作相应的位移. 假设变形前物面上的待测点 P 在变形后位移到了 P' 点, 则变形前散斑图上 P 点的子图像 A 就与变形后散斑图上 P' 点的子图像 A' 相对应, 两者的相关性最高、相关系数最大. 因此 P' 位置可以通过子图像的相关位移搜索来找出, 具体做法是在变形后的散斑图上取一系列位置不同的子图像(大小与子图像 A 相等), 逐个与 A 相关、计算相关系数. 所取子图像位置越靠近 P' 点, 相关系数就越大(相关系数具有单峰性), 使相关系数取得最大值的子图像中心位置就是 P' 位置, 这就是散斑相关法原理. 为提高相关分析速度和测量精度可结合采用快速位移搜索算法以及“灰度插值”、“相关系数曲面拟合”等亚像素位移搜索法^[2~5].

从以上原理可以看出散斑相关法只能测量微小的变形或位移, 因为当变形较大时会改变散斑场的微观结构, 导致子图像 A 与 A' 的相关性变差. 变形越大 A 与 A' 的相关性越差、相关系数越小, 相关系数的单峰性也越来越不明显, 同时在主峰的周围出现大的次峰, 有时甚至出现次峰比主峰还高的情形, 这时进行相关峰搜索就会出现误判, 得出错误的测量结果. 大量实验表明, 当变形不超过 10 个像素时用散斑相关法可以比较准确可靠地测量出来, 当变形大于 10 个像素时用散斑相关法测量就不太可靠了. 因此一般数字散斑相关法的测量范围约为 0.01-10 个像素, 我们将超出此范围的变形称为大动态范围的变形.

2 时间序列动态散斑相关跟踪法原理

为了能在原散斑相关法的基础上测量大动态范围的变形, 我们在物面发生变形的整个过程中控制摄像机每隔 Δt 时间就拍下一张散斑图, 时间间隔 Δt 的选择原则是在 Δt 时间内, 物面的最大变形不超过 10 个像素, 以保证每相邻两幅散斑图的微观结构基本不变, 保持具有较高的相关性. 变形越快 Δt 就越短, 对变化很快的过程要用高速 CCD 摄像机. 假

*国家自然科学基金(60127501)和广东省自然科学基金(000840)资助项目

Tel: 0755-26557246 Email: lisx@szu.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08

设物面变形的持续时间为: $T = (n-1)\Delta t$, 则共需拍摄 n (变形越大 n 也越大) 幅散斑图 $f_1 \sim f_n$, 如图 1.

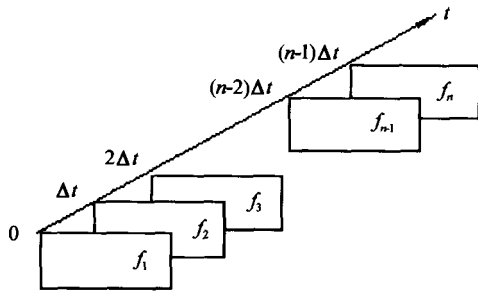


图 1 时间序列动态散斑图

Fig. 1 Sequential dynamical speckle patterns

将这 n 幅散斑图称为时间序列动态散斑图. 对于这 n 幅动态散斑图, 可用一般的散斑相关法跟踪待测点的移动踪迹, 最终得出测量结果. 我们将这种方法称为时间序列动态散斑相关跟踪法, 具体跟踪过程如下:

第一步: 调出散斑图 f_1 与 f_2 , 在变形前的散斑图 f_1 上选取待测点 $P_1(x_1, y_1)$, 利用散斑相关法找出待测点 P_1 经过 Δt 时间移动到了 $P_2(x_2, y_2)$ 点. 位移为 $\Delta x_1 = x_2 - x_1$, $\Delta y_1 = y_2 - y_1$. 第二步: 调出散斑图 f_2 与 f_3 , 在动态散斑图 f_2 上以 $P_2(x_2, y_2)$ 为新的待测点, 利用散斑相关法找出待测点 P_2 经过 Δt 时间移动到了 $P_3(x_3, y_3)$ 点. 位移为 $\Delta x_2 = x_3 - x_2$, $\Delta y_2 = y_3 - y_2$. 跟踪到待测点 P_1 经过 $2\Delta t$ 时间移动到了 P_3 点. 依此类推, 逐步跟踪待测点移动的踪迹.

第 $(n-1)$ 步: 调出散斑图 f_{n-1} 与 f_n , 在动态散斑图 f_{n-1} 上以前一次跟踪到的新位置 $P_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1})$ 为新的待测点, 再利用散斑相关法找出待测点 P_{n-1} 经过 Δt 时间移动到了 $P_n(x_n, y_n)$ 点. 位移为 $\Delta x_{n-1} = x_n - x_{n-1}$, $\Delta y_{n-1} = y_n - y_{n-1}$.

经过以上步骤我们跟踪到待测点 P_1 经过 $T = (n-1)\Delta t$ 时间, 依次经过 P_2, P_3, \dots, P_{n-1} 点最终移动到了 P_n 点. 显然总的位移为

$$\Delta X = x_n - x_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta x_i$$

$$\Delta Y = y_n - y_1 = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta y_i$$

用 C++ 编程, 可使上述散斑相关跟踪测量分析过程全部由计算机自动完成.

3 时间序列动态散斑相关跟踪法的应用

3.1 测量大位移

时间序列动态散斑相关跟踪法最直接的应用是测量大范围的位移. 从上述测量原理可以看出, 只要在物体位移过程中拍摄足够多的动态散斑图, 以保

证每相邻两幅散斑图保持具有较高的相关性, 很大的位移也能测量出来, 几乎没有测量上限. 我们进行了相关的实验, 将一铝金属板置于一维精密微动平台上, 用数码摄像机拍摄动态散斑图, 铝板沿水平方向移动 $1000 \sim 5000 \mu\text{m}$ (约 $9 \sim 45$ 个像素), 每次增加 $500 \mu\text{m}$. 为模拟二个方向同时位移的情况, 将摄像机旋转约 45° , 铝板每次移动过程中连续拍摄 9 幅散斑图. 图 2 为实验结果, 图中 Z 轴代表铝板位移, X, Y 为测量结果. 实验结果显示相对误差小于 2.5% .

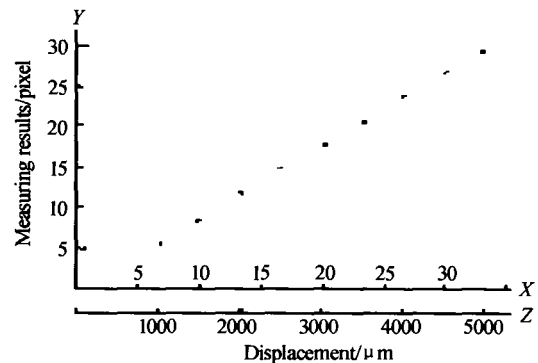


图 2 大位移实验测量结果

Fig. 2 Measuring results of the experiment on large displacement

3.2 测量分析面内动态变形过程

在拍摄时间序列动态散斑图的过程中摄像机还记下了各幅散斑图的记录时间, 在某些研究动态过程的情况该时间参量是很有用的信息. 我们曾用上述方法研究金属靶因受强激光照射所引起的面内动态变形过程. 因所研究的变形过程很快, 我们使用了“SP-1000”型高速摄像机来拍摄动态散斑图. 该摄像机的摄影频率可变, 为 $50 \sim 1000$ PPS, 画幅尺寸为 239×192 Pixels. 实验中用一束可见光激光照明金属靶以形成测量散斑. SP-1000 型高速摄像机系统比较复杂, 其中主控制计算机为“Compaq presario 633”, 属早期 PC 机, 内存小, 只能安装 Dos 和 Windows 3.1 操作系统, 我们研制的时间序列动态散斑相关跟踪分析软件不能在此机安装运行. 为实现图像控制、采集、存储以及相关跟踪分析等过程的自动化, 我们将主控计算机上的图像采集卡及控制卡均拆卸下来并安装在另一台计算机上, 并把相应的控制软件也移植过来, 再把我们研制的时间序列动态散斑相关跟踪分析软件安装在同一台计算机上, 这样就组成了一个完整的自动测量分析系统, 顺利完成了实验任务.

4 结论

理论和实践都表明, 我们提出的时间序列动态

散斑相关跟踪法是测量分析面内大变形的有效方法,在大位移测量中,测量上限几乎没有限制;此外在拍摄时间序列散斑图时记下了时间参数,使该法特别适合用于测量分析面内动态变形过程或变形速度.

参考文献

- 1 方强,陈家壁. 全息散斑计量学. 北京:科学出版社,1995. 67~71
Fang Q, Chen J B. Holographic and Speckle Metrology. Beijing: Science Press, 1995. 67~71
- 2 孙一翎,李善祥,李景镇. 数字散斑相关测量方法的研究与改进. 光子学报, 2001, 30(1): 54~57
Sun Y L, Li S X, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(1): 54~57
- 3 金观昌. 计算机辅助光学测量. 北京:清华大学出版社, 1997. 143~159
Jin G C. Computer-aided Optical Metrology. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 143~159
- 4 李善祥,孙一翎,李景镇. 数字散斑相关测量中亚像素位移搜索的曲面拟合研究. 光子学报, 1999, 28(7): 638~640
Li S X, Sun Y L, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(7): 638~640
- 5 赵玮,赵晓铭,王红霞,等. 利用分数傅里叶变换相关实现散斑相关测量. 光子学报, 2005, 34(3): 464~467
Zhao W, Zhao X M, Wang H X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3): 464~467

The Tracking Method of Digital Speckle Correlation Using the Sequential Dynamical Speckle Patterns and its Applications

Li Shanxiang, Sun Yiling, Li Jingzhen

College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060

Received date: 2004-05-08

Abstract Based on analyzing the speckle field's characteristic, the tracking method of digital speckle correlation using the sequential dynamical speckle patterns was presented. This method can bridge the gap that the ordinary speckle correlation does not suit the large deformation measurement, and increase the applied fields of digital speckle. Through this method, the large-scale dynamical displacement can be measured and the process of deformation in surface can be analyzed.

Keywords Speckle; Digital speckle correlation; Sequential dynamical speckle patterns; Tracking method of digital speckle correlation



Li Shanxiang was born in 1945. In 1970, he graduated from the Department of Engineering Physics, Tsinghua University. Now he is an associate professor and teaches in the Department of Photonic Information Engineering of College of Engineering and Technology, Shenzhen University. His current research interests are holography and optical information processing.