

数字散斑相关法测量连续位移的原理与实验

闫海涛, 王鸣, 赖方明, 韩道福

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210097)

[摘要] 提出用数字散斑相关方法测量移动物体的连续位移. 激光照射粗糙表面形成散斑场, 用 CCD 记录粗糙表面移动时的序列散斑图像, 利用数字散斑相关方法分析散斑图像, 确定粗糙表面的位移. 研究表明, 数字散斑相关技术可以高精度地测出连续移动物体的位移.

[关键词] 数字散斑, 自相关函数, 连续位移

[中图分类号] TN247 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2006)02-0044-04

Principle and Experiment of Digital Speckle Autocorrelation Measuring Seriate Displacement

Yan Haitao, Wang Ming, Lai Fangming, Han Daofu

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Jiangsu Key Lab
on Opto-Electronic Technology, Nanjing 210097, China)

Abstract: The digital speckle autocorrelation function is presented to measure seriate displacement of moving object. A series of speckle patterns are shot by CCD camera when laser irradiates the rough surface of a moving object. Based on the digital speckle autocorrelation method, these speckle patterns are analyzed, and the displacement of the objects is determined. The result of experiment indicates that digital speckle autocorrelation is capable of measuring the seriate displacement accurately.

Key words: digital speckle, autocorrelation function, seriate displacement

0 引言

当光线照射到比较粗糙的表面, 光线经过表面漫反射, 在空间形成散斑场. 散斑场携带有该表面的信息, 因此可以通过对散斑场的分析来计量物体的一些物理特征值. 散斑计量现在已经发展的比较成熟了, 可以利用散斑照像的二次曝光或者散斑图像相减, 得到杨氏条纹^[1], 用于测量物体的应变、振动和位移, 也可以通过分析散斑图像所携带的信息来测量物体表面的粗糙度和形貌. 用自混合干涉形成散斑测量流体速度^[2]等等.

用上述测量位移的方法测量的位移一般是“静态”的位移. 本文为了测量连续位移, 设计了模拟实验方法得到散斑场, 再通过 CCD 记录, 由采集卡传输到计算机将散斑图像数字化. 利用散斑的自相关函数进行分析, 能够测量连续移动变化的位移. 通过实验和对结果的分析, 可以很好的测量出位移, 并且得到的实验数据也说明得到的精度比较高.

1 理论分析

相干光经随机表面的散射后会形成散斑, 随机表面或光源的变化都会引起形成的散斑场的变化, 而随时间变化的散斑称为动态散斑. 散斑场对随机表面的变化非常敏感, 且动态散斑场包含随机表面及其运

收稿日期: 2005-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375074), 江苏省高新技术基金资助项目(BG2003024).

作者简介: 闫海涛, 1978—, 硕士研究生, 主要从事光电子和激光应用的学习与研究. E-mail: yancun@eyou.com

通讯联系人: 王鸣, 1950—, 教授, 主要从事光电子和激光应用的教学与研究. E-mail: wangming@pine.njnu.edu.cn

动特征的信息,因此动态散斑场一直是人们所感兴趣的研究课题^[3]. 动态散斑一般用相关函数来描述.

1.1 散斑场的自相关函数

设一散射屏以速度 v 做横向运动,而其出射平面上的 x_0, y_0 坐标系固定不动. 假定散射屏是一个纯位相物体,在单色平行光均匀照明下,散射屏出射平面光场形成的散斑场的复振幅可以写成:

$$A(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(r_0) A_0(r_0, t) h(r, r_0) dr_0 \quad (1)$$

上式中 $p(r_0)$ 是孔径函数, $h(r, r_0)$ 是描述光场传播的权函数, $A(r, t)$ 就是散斑场的复振幅. 由于 $A(r_1, t_1)$ 和 $A(r_2, t_2)$ 是联合圆对称复随机变量,应用高斯矩定理^[4] 得:

$$R_{\Delta}(r_1, r_2, t_1, t_2) = |A(r_1, t_1) A^*(r_2, t_2)|^2 \quad (2)$$

用束腰半径为 ω_0 的高斯光束(激光就是高斯光束)照射散射屏,令光束轴线平行于散射屏平均平面法线,并将该轴线取为 z 轴,见图 1. 孔径函数可以表示为:

$$p(r_0) = \frac{\omega_0}{\omega(z_0)} \exp\left(\frac{j2\pi z_0}{\lambda}\right) \exp\left[\frac{-|r_0|^2}{\omega^2(z_0)}\right] \exp\left[\frac{j\pi |r_0|^2}{\lambda \rho(z_0)}\right] \quad (3)$$

式中 z_0 表示束腰平面到散射屏出射平面的距离,由左向右取正号; $\omega(z_0)$ 表示散射屏出射平面上照明光斑的有效半径; $\rho(z_0)$ 表示投射到散射屏出射平面上的光波的波面曲率半径.

我们知道,菲涅耳衍射相应的权函数为:

$$h(r, r_0) = \frac{1}{j\lambda z} \exp\left[\frac{j2\pi z}{\lambda}\right] \exp\left[\frac{j\pi |r - r_0|^2}{\lambda z}\right] \quad (4)$$

将(3)式和(4)式代入(1)式中,再将(1)式代入(2)式中,将其规范化,得:

$$r_{\Delta}(\Delta r, \tau) = \frac{R_{\Delta}(\Delta r, \tau)}{R_{\Delta}(0, 0)} = \exp\left[-\frac{|v|^2 \tau}{\omega^2(z_0)}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2 \omega^2(z_0) |\sigma v \tau - \Delta r|^2}{\lambda^2 z^2}\right] \quad (5)$$

取 $\tau = 0$,得到规范化的空间相关函数^[5] 为:

$$r_{\Delta}(\Delta r, 0) = \exp\left[-\frac{\pi^2 \omega^2(z_0)}{\lambda^2 z^2} |\Delta r|^2\right] \quad (6)$$

对于相同的光学系统, $\omega(z_0)$ 和 z 是不变的. 所以,通过散斑场的空间相关函数就可以得到 r_{Δ} 与 Δr 的关系式. 但是 Δr 只是距离的大小,没有方向的判定. 下面介绍判定方向的方法.

1.2 序列动态散斑

由于散斑场的分布是随机的,散斑图上每一点周围的一个小区域(通常取像素块为 $n \times n$ 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有不同的统计特性. 如果散射屏在散射屏所在的平面内产生面内微位移,可以认为微位移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 k 在变形后位移到了 k' 点,则变形前散斑图上 k 点的子图像 A 就与变形后散斑图上 k' 点的子图像 A' 相对应,两者的相关性最高且相关系数也最大. 因此 k' 位置可以通过子图像的相关位移搜索来找出,具体做法是在有位移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 k' 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 k' 位置,这就是散斑相关法原理. 我们要连续位移,就需要有连续采样和连续计算相关. 为了能在散斑相关法的基础上得到连续性,我们在物面发生位移的整个过程中,控制 CCD 每移动 Δr 距离时就拍下一张散斑图, Δr 的选择原则是在移动 Δr 时,散斑场的最大变形不超过 Δn 像素(Δn 的选择也于 n 有关),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. 若共拍摄 m 幅散斑图 $u_1 - u_m$,我们将这 m 幅散斑图称为序列动态散斑图. 对于这 m 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. 具体跟踪过程如下:

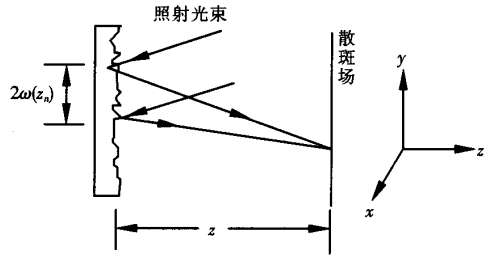


图 1 光路图和坐标方向

第一步,调出散斑图 u_1 与 u_2 ,在没有移动之前的散斑图 u_1 上选取待测点 $k_1(x_1, y_1)$ 周围的子图像 A_1 ,利用散斑相关法找出待测点移动 Δr 后到了点 $k_2(x_2, y_2)$,点 $k_2(x_2, y_2)$ 周围的子图像 A_2 ,可以通过像素差求得移动距离的大小和方向(坐标方向见图 1).

距离为: $\Delta x_1 = x_2 - x_1, \Delta y_1 = y_2 - y_1$.

方向为: $\tan \alpha = \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.

第二步,调出散斑图 u_2 与 u_3 ,在动态散斑图 u_2 上以 A_2 为新的待测点,利用散斑相关法找出待测点 A_2 移动到了点 A_3 . 依此类推,逐步跟踪待测点移动的踪迹,就可以得到散斑相关的连续性,解决了连续测量的问题.

2 实验结果及分析

为了处理该实验的数据,我们专门设计了一个程序. 该程序可以实现数字散斑相关计算和分析,并且输出移动距离的大小和方向.

2.1 实验装置

实验采用的装置如图 2 所示:用扩束镜将激光扩束,使光源面积扩大和尽量均匀. 铝板固定在一个可以在 x, y 平面内移动的有标尺的平台上. 采集卡是 DH—CG400 图像采集卡,CCD 是 768×576 像素. 我们让铝板连续移动距离 Δr ,采集连续序列动态散斑图像. 采样的是在铝板前 9.5 cm 处的散斑场. 图 3 是采集到的其中一幅散斑图像.

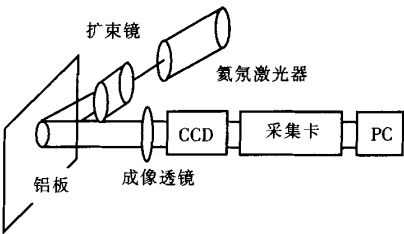


图 2 实验装置图

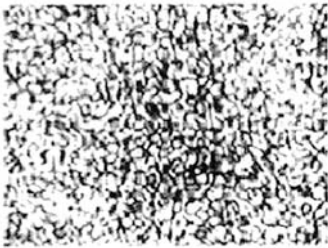


图 3 用 CCD 记录的散斑图像

2.2 实验数据及分析

表 1 中的数据是每次移动的 Δr 和对应的最大相关系数,在点周围区域选取 12×12 像素块(Image Square,简称 IS). 可以看出,随距离的增加,最大相关系数变小. 因为随着距离的增加,图像改变的程度会增加,所以最大相关系数减小. 我们为了防止失真的情况(如表格中大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的情况)出现,要得到较大的相关系数,每次移动距离 Δr 不能太大.

表 2 是我们选取的像素块和对应的最大相关系数(每次移动的距离 Δr 为 $10\text{ }\mu\text{m}$),以及我们统计的与最大相关系数接近的所有像素块的个数 Q_k ,它可以作为像素块可能判定错误的一个参数. 从数据可以看出,最大相关系数会减小,统计到的接近最大相关系数的像素单元的个数也会减少,所以像素单元太小也容易失真,因为像素单元越大,散斑图像携带的信息量越大,越不容易失真,但像素单元越大计算的数据量同样会增加.

表 1 像素块为 12×12 时的实验结果

$r_{\Delta r}$	$\Delta r/(\mu\text{m})$
0.845 9	10
0.774 7	20
0.715 6	30
0.626 4	40
0.604 5	50
0.570 5	60
0.513 4	70
0.500 8	80
0.533 1	90

表 2 $\Delta r = 10\text{ }\mu\text{m}$ 时的实验结果

$r_{\Delta r}$	IS	Q_k
0.973 7	3×3	50
0.961 2	4×4	22
0.958 5	5×5	13
0.906 8	8×8	7
0.870 6	10×10	2
0.845 9	12×12	0
0.720 2	15×15	0
0.603 4	20×20	0

通过对上面数据进行分析,我们可以总结出:像素单元的选取 12×12 最好,每次移动的距离 Δr 应该满足: $10 \mu\text{m} \leq \Delta r \leq 50 \mu\text{m}$.

表 3 是改变铝板在 x 和 y 方向的位置,得到 Δx 和 Δy ($\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$),然后利用最大相关系数判定方向夹角 θ ,对比于实际移动的方向 θ_0 ,计算误差 $\varepsilon = \theta - \theta_0$. 从表 3 可知:当移动的距离在 $10 \mu\text{m} \leq \Delta r \leq 50 \mu\text{m}$ 时,判定的移动距离的大小和方向是很准确的. 只有 Δr 接近或者超过了 $50 \mu\text{m}$,才会有误差产生,最大误差也只有 3.18° .

表 3 像素块 12×12 、 $10 \mu\text{m} \leq \Delta r \leq 50 \mu\text{m}$ 时的实验结果

$r_{\Delta l}$	$\Delta x/(\mu\text{m})$	$\Delta y/(\mu\text{m})$	$\theta/^\circ$	$\theta_0/^\circ$	$\varepsilon/^\circ$
0.845 9	10	0	0.00	0.00	0
0.845 4	0	10	90.00	90.00	0
0.843 3	10	10	45.00	45.00	0
0.825 8	10	20	63.43	63.43	0
0.784 2	20	10	26.57	26.57	0
0.768 5	20	20	45.00	45.00	0
0.754 2	10	30	71.57	71.57	0
0.753 3	30	10	18.43	18.43	0
0.722 5	20	30	53.13	56.31	- 3.18
0.726 4	30	20	36.87	33.69	3.18
0.662 1	10	40	78.69	75.96	2.73
0.664 8	40	10	11.31	14.04	- 2.73

3 结论

通过理论分析和实验验证,我们可以得到:每次移动距离的大小在一定条件下,利用数字散斑相关算法,可以很好的判定出移动的距离的大小和方向. 并且用数字散斑相关算法得到的位移的分辨率可以达到 $10 \mu\text{m}$. 如果我们在实验时采用高速拍摄的连续图像,因为移动的速度和拍摄的速度相比很小,就可以不用再限定移动的距离的大小了,这样就能得到更为精确的结果. 还可以通过增加 CCD 的像素,或者成像透镜的放大倍数,记录更多的散斑场信息或提高图像的分辨率,得到更高的精度.

[参考文献]

[1] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,1986:131-188.
[2] 陆敏,王鸣,郝辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. 光学学报,2005,25(2):190-194.
[3] 李大伟,程传福. 超快动态散斑相关函数的理论研究[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2005,20(2):34-36.
[4] 刘培森. 散斑统计学基础[M]. 北京:科学出版社,1987:175-183.
[5] Renu Tripathi, Pati G S, Arvind Kumar, et al. In-plane displacement measurement using a photorefractive speckle correlator [J]. Optics Communications,1998, 149:355-365.

[责任编辑:丁蓉]