

白光数字散斑照像术

方 强 姚 虹 谭玉山

(西安交通大学 机械工程系)

提 要

本文提出一种新的数字散斑计量术——白光数字散斑照像术。它以二维数字偏心滤波技术实现全场信息的表征,而以数字相关技术实现点信息的表征。文中给出了计量方法、理论分析及实验结果。

关键词: 数字散斑, 白光散斑照像计量。

一、引 言

将数字信息处理技术与传统技术结合以提高其功能是现代科学技术发展的一个明显特征。数字技术用于计量条纹的自动识别^[1]、实现散斑干涉计量技术^[2]和准外差计量技术^[3],丰富和发展了全息散斑计量学的内容,使传统的纯光学的计量技术提高到了一个新的高度。本文将数字信息处理技术与白光散斑技术结合,形成所谓的白光数字散斑照像术。也就是以数字技术记录被测表面散射出的白光散斑场,以数字信息处理技术将隐含在不同状态白光散斑场中的变形信息以某种显形式表征出来,最后再由数字信息处理技术实现信息的自动识别。

该技术的可实现性是基于白光散斑场的空间频谱是空间带限的这样一个事实。根据采样定理,只要采样频率大于或等于散斑场最大空间频率的二倍,用数字方法就可毫无损失地记录和提取变形信息。在实际工作中,采样条件总是满足的,在后续理论分析中只须对模拟量进行操作。本文以二维偏心数字滤波技术实现全场变形信息的表征,以数字相关技术实现点信息的表征。前者适用于定性分析,后者适用于定量分析。下面分别介绍该技术的基本方法、理论分析及实验结果。

二、计 量 方 法

图1为数字散斑照像计量系统示意图。从白光源发出的光照明散斑化处理后的被测表面,该表面在不同变形状态下所形成的散斑像被电视摄像机记录并被图像捕获器数字化后存放在帧存储器中,监视器用于监视摄像状态。计算机从帧存中读取数字图像并利用数字信号处理技术实现变形信息的表征及识别,所得结果显示在监视器上,或从打印机输出。

在白光数字散斑照像计量中,关键是采用什么处理方法将隐含的变形信息以显形式表现出来。本文采用二维偏心滤波技术表征全场变形信息,而以相关技术表征点变形信息。

全场信息的表征是这样进行的,以数字方法构成一个二维数字滤波软件系统,其频率响应函数为

$$H(\mathbf{f}-\mathbf{f}_0) = \begin{cases} 1, & |\mathbf{f}-\mathbf{f}_0| \leq f_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中 \mathbf{f} 为频率矢量, \mathbf{f}_0 为滤波器中心坐标矢量, f_0 为通带宽度。将变形前后的二幅散斑图同时输入该滤波系统,其输出二维场径平方变换后即形成以显形式携带变形信息的计量场,该计量场的信号分布为

$$I(\mathbf{r}_i) = |[I_1(\mathbf{r}) + I_2(\mathbf{r})] \otimes h_f(\mathbf{r}_i - \mathbf{r})|^2, \quad (2)$$

式中符号“ \otimes ”表示卷积运算, \mathbf{r} 为散斑图记录面空间坐标矢量, I_1 及 I_2 分别表示变形前后的二散斑场, h_f 为系统的脉冲响应函数,它由频率响应函数的傅里叶变换决定。 h_f 与滤波器中心坐标为零时的脉冲响应函数有如下联系

$$h_f(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) = h(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) \exp(-i2\pi\mathbf{f}_0 \cdot \mathbf{r}). \quad (3)$$

点信息的表征是采用数字相关技术实现的,其做法是用一窗函数在变形前的散斑像被测点附近获取一个小区域图像,然后将该子图像在变形后图像上被测点附近区域内作相关扫描,相关峰值处的坐标矢量即代表了该点的变形矢量。在数字实现中一般采用方形窗

$$W(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0) = \begin{cases} 1, & |\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|_x \text{ 及 } |\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|_y \leq (D/2), \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (4)$$

式中符号 $|\mathbf{r}|_z$ 表示矢量 \mathbf{r} 在 z 方向的投影。相关计量平面上的信号分布为

$$R(\mathbf{r}_R) = \int_{-\infty}^{\infty} I_1(\mathbf{r}-\mathbf{r}_R) W(\mathbf{r}-\mathbf{r}_c-\mathbf{r}_R) I_2(\mathbf{r}) d\mathbf{r} / D^2. \quad (5)$$

三、理论分析

在白光散斑照像计量中,被测表面一般是经过人工处理过的,例如 Asundi^[4] 所建议的。散斑化后的表面状态非常复杂,需要计量的是这种表面的变化信息。由于在计量中很难事先精确了解被测表面及其产生的散斑场的分布,在由不同状态下的表面经比较后所形成的计量场中所含有的表面状态信息及变形信息都是未知的。只有正确描述计量场中变形信息的分布形式及其与表面形态信息之间的关系,才能设计出合理的信息识别方法。这种问题通常应采用统计学方法进行描述。将被测表面及其形成的特定散斑场看成是由大量宏观形状相似、微观形状迥异的物面构成的系综上的一个随机场,物面的微观信息作为一种载波在统计意义上携带物面的宏观信息。在计量场中,由于被测变形场是在宏观上改变了表面的形状,这种宏观形状的变化信息必将在统计意义上调制在特定的微观信息上。其系综平均值将代表变形信息分布,从而建立计量场中信息分布模型。

在计量中,被测表面的变形场总是小变形场,它的空间变化相对于表面反射特性的变化来说要缓慢的多。它只改变物表面散射基元的位置而不改变散射基元的特性,如以 $\mathbf{d}(\mathbf{r})$ 表示被测表面的面内变形场,变形前后表面光场之间有如下联系

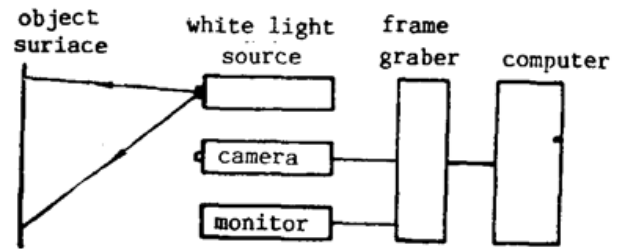


Fig. 1 System diagram for white light digital speckle photography

$$I_2(\mathbf{r}) = I_1[\mathbf{r} - M\mathbf{d}(\mathbf{r}/M)], \quad (6)$$

式中 M 为光学记录系统的横向放大率。在白光散斑计量中, 经处理后的被测表面在统计意义上可以视为空间平稳场。根据光场强度的非负性, 所记录的白光散斑光强的自相关函数可以假设成

$$\langle I_i(\mathbf{r}_1) I_i(\mathbf{r}_2) \rangle = C(0) + C(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1), \quad i=1, 2, \quad (7)$$

其中函数 C 为一非负的窄带函数, 其值随的增大而减小, 其明显的取值区域由记录面上最小散斑点的覆盖区域决定。

1. 全场信息分布模型

全场信息分布模型主要取决于所记录的二散斑场的系综相关函数, 由(6)、(7)两式可得

$$\begin{aligned} & \langle [I_1(\mathbf{r}_1) + I_2(\mathbf{r}_1)] [I_1(\mathbf{r}_2) + I_2(\mathbf{r}_2)] \rangle \\ & = 4C(0) + 2C(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) + C(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 - M\mathbf{d}) + C(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 + M\mathbf{d}), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 \mathbf{d} 在 $(\mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_1)/2$ 处取值。对(2)式施以系综平均运算并利用(8)式, 信息的分布模型由四项组成。很容易推得其中第一项为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_1 = 4C(0) H^2(\mathbf{f}_0) = \begin{cases} 4C(0), & |\mathbf{f}_0| \leq f_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

上式表明, 当滤波器中心坐标频率幅值大于滤波器的通带宽度时, 该项为零。在实际测量中总是如此, 因而在后面对该项就不予考虑了。

第二项经整理后为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_2 = 2 \iint C(\Delta\mathbf{r}) \exp(-i2\pi\mathbf{f}_0 \cdot \Delta\mathbf{r}) h(\mathbf{r}_i - \mathbf{r} - \Delta\mathbf{r}) d\Delta\mathbf{r} h(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (10)$$

在计量中, 滤波器的脉冲响应函数覆盖大量散斑点, 因而函数 C 的空间分布要比 h 的窄的多, 在 $\Delta\mathbf{r}$ 的取值范围内函数 h 可视为常数且等于 $\Delta\mathbf{r} = 0$ 处的值。则(10)式可以简化为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_2 = 2 \int C(\Delta\mathbf{r}) \exp(-i2\pi\mathbf{f}_0 \cdot \Delta\mathbf{r}) d\Delta\mathbf{r} \cdot \int h^2(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) d\mathbf{r} = 2N(\mathbf{f}_0) K(0). \quad (11)$$

式中 $K(0)$ 为滤波器脉冲响应函数的自相关函数在原点处的值。现在考虑一下 $N(\mathbf{f}_0)$, 由随机过程理论知, 一个随机函数的自相关函数与其功率谱密度互为傅氏变换。从(11)式可知, $N(\mathbf{f}_0)$ 正是散斑强度功率谱密度在 \mathbf{f}_0 处的取值, 这在物理意义上是很容易理解的。

第三项为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_3 = \int C(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 - M\mathbf{d}) \exp[-i2\pi\mathbf{f}_0 \cdot (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)] h(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_1) \cdot h(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_2) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (12)$$

式中 \mathbf{r}_1 及 \mathbf{r}_2 的取值范围主要由中心位于 \mathbf{r}_i 的 h 函数决定。由于滤波函数的点扩散函数很小, 且 \mathbf{d} 为小变形缓变函数, 可以认为在 h 函数决定的区域内 \mathbf{d} 保持不变且等于 \mathbf{r}_i 处的值。利用化简(11)式相同的理由, (12)式可变为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_3 = N(\mathbf{f}_0) K(|\mathbf{d}|) \exp[-i2\pi M\mathbf{f}_0 \cdot \mathbf{d}(\mathbf{r}_i/M)]. \quad (13)$$

类似也可证 $\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle_4$ 为上式的共轭值。则全场变形信息分布模型为

$$\langle I(\mathbf{r}_i) \rangle = 2K(0) N(\mathbf{f}_0) \left\{ 1 + \frac{K(|\mathbf{d}|)}{K(0)} \cos[2\pi M\mathbf{f}_0 \cdot \mathbf{d}(\mathbf{r}_i/M)] \right\}, \quad (14)$$

表明, 在二维偏心滤波所给出的计量场中, 变形信息在滤波方向上的分量场在设计意义上以

余弦函数表征,条纹调制度由被测变形及滤波参数联合决定。

在实际应用中,滤波参数通常在数字频域中给出,根据数字频域与模拟频域的关系

$$\boldsymbol{w} = 2\pi\boldsymbol{f}/|\boldsymbol{f}_s|, \quad (15)$$

以数字域参数表示的信息分布模型为

$$\langle I(\boldsymbol{m}) \rangle = 2K(0)N(\boldsymbol{w}_0) \left\{ 1 + \frac{K(|\boldsymbol{d}(\boldsymbol{m})|)}{K(0)} \cos[M\boldsymbol{w}_0 \cdot \boldsymbol{d}(\boldsymbol{m})] \right\}, \quad (16)$$

式中 \boldsymbol{f}_s 为采样频率矢量, \boldsymbol{m} 为以采样周期为间隔的离散点的坐标序号矢量, \boldsymbol{w} 为数字频率矢量。

2. 点信息分布模型

在相关平面上,代表信息分布的量为

$$\langle R(\boldsymbol{r}_R) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \langle I_1(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_R) I_2(\boldsymbol{r}) \rangle W(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0 - \boldsymbol{r}_R) d\boldsymbol{r} / D^2, \quad (17)$$

由(6)、(7)两式得

$$\langle R(\boldsymbol{r}_R) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \{O(0) + O[\boldsymbol{r}_R - M\boldsymbol{d}(\boldsymbol{r} + \boldsymbol{r}_0)]\} W(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_R) d\boldsymbol{r} / D^2, \quad (18)$$

式中面内变形场是窗内各点的函数。由于变形为小变形缓变函数,可以使窗函数足够小,使窗内各点的变形相等,则有

$$\langle R(\boldsymbol{r}_R) \rangle = O(0) + O[\boldsymbol{r}_R - M\boldsymbol{d}(\boldsymbol{r}_0)], \quad (19)$$

根据 O 函数的性质,该分布模型表明,在相关平面上,峰值的位置坐标矢量在统计意义上表征了被测点的变形矢量。在实际测量中,只能得到单一的相关计量场,为了使样本计量场中的峰值尽可能真实地代表变形值,窗函数参数的选择应在保证窗内各点变形基本相等的前提下尽可能大。

在数字实现时,相关平面上分布模型可写成

$$\langle R(\boldsymbol{m}_r) \rangle = O(0) + O[\boldsymbol{m}_r - M\boldsymbol{d}(\boldsymbol{r}_0)], \quad (20)$$

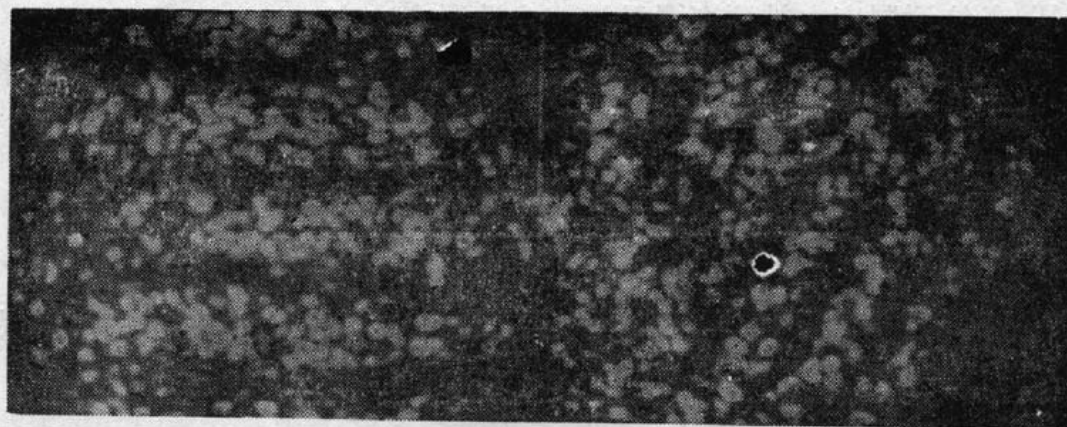
式中 \boldsymbol{m}_r 为相关平面上坐标序号矢量。这时所测得的变形值将以离散的形式给出,因而变形测量的灵敏度将是一个采样间隔,最小的可测变形量也是一个采样间隔。为提高测量灵敏度和精度,可以采用插值技术,与此有关的技术将另文发表。

四、实验与结果

作者在基于 IBM-PC/AT 微机的数字图像处理系统上就数字散斑照像计量技术进行了一系列实验。根据全场及点信息提取的特点,设计了不同的实验。

全场信息提取技术适用于定性分析,为了验证该方法,实验对一圆盘绕其中心转动形成的面内变形场进行了实际测量。这种面内变形场在任何方向上的分量场的大小都只与被测点到通过圆心且平行于滤波方向的直线的垂直距离成正比,它产生的条纹场将是一组平行于滤波方向的直线,条纹间距由测量灵敏度决定。图 2 给出了在二个不同方向上滤波的结果。显然,它的宏观分布趋势与理论预计的相同,条纹中的斑点代表了与特定被测表面对应的随机信息。

点信息提取技术适用于定性分析。由于实测量具有随机性,我们采用统计参数偏差



(a) (b)
Fig. 2 Decentric filtering results
(a) filtering horizontally; (b) angularly

Bias 及标准差 Var 对它进行评估。偏差与标准差的定义为

$$\text{Bias}(\hat{d}) = \langle d - \hat{d} \rangle, \quad (21)$$

$$\text{Var} = [\langle (d - \hat{d})^2 \rangle]^{1/2}, \quad (22)$$

式中 \hat{d} 为实测的变形值, 即估计值。为了获得以上两个参数必须对具有相同变形的大量物面进行实验。为简化实验, 对一被测表面施以一系列平移, 对每一平移量在物面上大量的点上进行测量, 在各态历经性的假设下, 以空间采样点上的平均来代替系综平均, 即

$$\text{Bias}(\hat{d}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d - \hat{d}_i), \quad (23)$$

$$\text{Var}(\hat{d}) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d - \hat{d}_i)^2 \right] \quad (24)$$

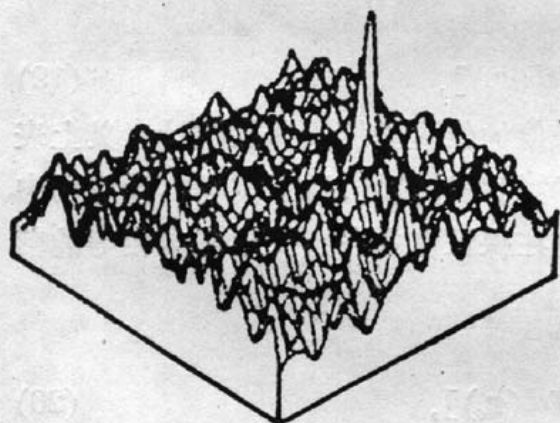


Fig. 3 Typical distribution on a single correlation plane

图 3 给出了相关平面上的一个典型分布情况, 可以看出, 其总趋势与理论分析相同, 分布上的波动是由

特定表面的随机因素造成的。实验分析表明, 该技术的测量偏差为零, 标准差为 0.3 个采样间隔。

五、结 论

本文提出了一种光电混合测量技术——白光数字散斑照像术。用统计学方法对该技术进行了详尽的描述, 给出了全场信息及点信息分布的统计学模型。通过在基于 IBM-PC/AT 微机的数字图像处理系统上所进行的一系列实验, 证明了该技术的可行性。

参 考 文 献

- [1] D. W. Robinson; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 14 (Jul), 2169~2176.
- [2] C. Wykes; *J. of Modern Optics*, 1987, **34**, No. 4 (Apr), 539~554.
- [3] S. Nakadate, H. Saito *et al.*; *Opt. Acta*, 1986, **33**, No. 10 (Oct), 1295~1309.
- [4] A. Asundi, F. P. Chiang; *Opt. Eng.*, 1982, **21**, No. 4 (Jul/Aug), 570~580.

White light digital speckle photography

FANG QIANG, YAO HONG AND TAN YUSHAN

(Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University)

(Received 25 September 1989; revised 8 May 1990)

Abstract

A new digital speckle metrological technique called white light digital speckle photography is presented. 2-D digital decentric filtering and 2-D digital correlation techniques are suggested to be used to represent the whole field information and point information respectively. The metrological method, theoretical analysis and experimental results are described and given in detail.

Key words: digital speckle; white light speckle photography.