

数字散斑强度相关计量的特性研究

李喜德 谭玉山

(西安交通大学机械系, 西安 710049)

提 要

从理论与实验两方面探讨了在相干光与非相干光照明条件下, 数字散斑强度相关计量的动态范围, 空间分辨率及信号分辨率, 提出了扩大相关计量动态范围的方法及提高相关计量系统空间与信号分辨率的途径, 并进行了实验验证。

关键词 数字散斑强度相关, 空间分辨率, 信号分辨率。

1 引 言

数字散斑强度相关计量(DSIOM)是近几年在数字图象相关技术基础上发展起来的一种应用十分广泛的计量技术^[1~7]。它测量范围广, 系统简单, 环境隔振要求弱, 适合动、静态位移、应变、速度等的检测, 因此成为目前工程结构、流场、无损检测等的有效测量工具。为了全面地了解 DSIOM 特性, 本文详细地分析了 DSIOM 系统在相干光及非相干光照明条件下的动态范围、空间及信号分辨率, 讨论了影响这两个参数的各种因素, 提出了扩大测量动态范围、提高空间与信号分辨率的途径, 并给出了实验结果。最后, 本文还对相干光与非相干光两种照明方式对相关计量的影响进行了比较与分析。

2 基本原理与特性分析

2.1 数字散斑强度相关计量的基本原理

物体在相干光与非相干光照明下, 在成像接收面上即形成该物体表面的散斑像, 同理, 当物体由于运动或变形时, 在成像接收面上即形成表面位移的散斑像。设物体的散斑象与其位移散斑象分别为 $f(x, y)$, $g(x+u, y+v)$, 则求散斑象位移 (u, v) 的问题, 即变为图象函数 $f(x, y)$ 及 $g(x+u, y+v)$ 的数字图象相关问题。

对于一个二维数字图象, 其相关函数定义为:

$$c_w(u, v) = \int_w f(x, y) \cdot g(x+u, y+v) dx dy. \quad (1)$$

其中, w 表示相关窗域。

(1)式并不常用, 因为图象场存在各种噪声、激光强度的变化、视频系统缺陷、非均匀运动变形等, 常使(1)式不具有稳定的峰值输出。合理的处理方法是对(1)式在一个更小的子域 Δw 中进行归一化, 即:

$$\tilde{c}_{\Delta w} = \frac{c_{\Delta w}(u, v)}{\sqrt{\int_{\Delta w} [f(x, y)]^2 dx dy \cdot \int_{\Delta w} [g(x+u, y+v)]^2 dx dy}} \quad (2)$$

上式离散化数字形式为:

$$\tilde{c}_{\Delta w}(n, m) = \frac{\sum_{j=0}^{l_y} \sum_{i=0}^{l_x} f(i, j) \cdot g(i+n, j+m)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{l_y} \sum_{i=0}^{l_x} f^2(i, j) \cdot \sum_{j=0}^{l_y} \sum_{i=0}^{l_x} g^2(i+n, j+m)}} \quad (3)$$

其中: $l_y = \Delta M/2$, $l_x = \Delta N/2$, 且 $\Delta M \times \Delta N = \Delta w$, n, m 为 u, v 的数字化形式

应用(3)式, 对于物体的二维位移、转动及小变形等的测量均能得到较好的计量结果。

2.2 数字散斑强度相关计量的动态范围

噪声条件下的 DSICM 动态范围的研究, 对于实际测量具有重要意义。因为只有在动态范围内的测量才是有效与准确的。

由(3)式知, DSICM 在本文方式下的动态范围为:

$$0 \leq n \leq \Delta N/2, \quad 0 \leq m \leq \Delta M/2. \quad (4)$$

若令 $n \times m = \delta_c$, 则相关动态域满足:

$$0 \leq \delta_c \leq \Delta w/4 \quad (5)$$

由于噪声等各种退相关效应的影响, 实际的相关测量动态范围均小于 $\Delta w/4$, 因此记 $[\delta_c]_{\max} = \Delta w/4$ 。图 1 分别是相干光与非相干光在物体平移条件下, 不同窗域大小时所测动态范围曲线; 图 2 为测量光路。其中, 物体表面用铝粉均匀涂抹, CCD 镜头到物面距离为 66.5 cm, 镜头为 TV25 mm 镜头, 实验时光图为 8。从图 1 中清楚地看到: 不论是相干光还是非相干光, 其动态测量范围均与窗函数 Δw 成线性关系。对于白光散斑, 动态范围 δ_{cw} 满足 $\delta_{cw} \doteq [\delta_c]_{\max}$, 而对于相干光散斑相关计量, 动态范围 δ_{cc} 满足: $\delta_{cc} \ll [\delta_c]_{\max}$ 。造成这种差别的原因是, 对于非相干光, 由于散斑场即是物体表面, 因此当物体在运动或有一小变形时, 散斑场的变化小而平稳, 只是随着物体表面而运动。而对相干光, 其一由于激光散斑颗粒小, 在相同的采样条件下, 散斑场图象更易受运动、变形等因素的影响, 其二, 由于散斑场的空间相干特性, 当物体在受到运动变形等因素影响时, 会出现强烈的退相关效应, 从而使相关场峰值输出不稳定。另外, 从图 1 中还可以看到, 相干相关检测要比非相干相关检测具有更明显的波动性, 这反映了相干光检测的高灵敏度。

以上从理论与实验两方面分析了数字散斑强度相关计量的动态范围。很显明, 对于白光相关计量, 当 Δw 取定后, 在本文讨论的相关方式下, 能得到最大相关限度。若还需增大测量范围, 只要增大 Δw 即可。当然这是指在 Δw 中, 散斑象首先必须满足前述(3)式成立的假设, 又在计算机容量及时间消耗允许条件下。而对于相干光条件时, 它距最大相关动态范围差得很远, 因此有必要采取措施来提高它。

由数字散斑强度相关检测的实质可知, 当散斑象在运动过程中保持一致时, 相关检测将具有最大与最稳定的峰值输出。而对于一个运动或变形的散斑面来说, 要保证其散斑象在运动过程中不变, 则入射光场 Σ_0 也必须跟着散射面一起运动, 但对于实际测量系统来说, 入射波场 Σ_0 是固定的。为解决这一困难, 一个很简单的方法是选择匀振幅的平面波照明散射体及其运动区域, 即可认为入射场是跟着漫射板一起运动的, 然当 Σ_0 不是平面波时, 即使对于漫射表面在移动过程中始终被照明的区域, 也不能视为入射波跟着漫射板一起运动, 此时

由于散斑场的空间干涉所形成的“沸腾”噪声等会使散斑场退相关加强。总之， Σ_0 越接近平面波，散射体运动变形越缓慢，则相干测量的动态范围 δ_{cc} 会越大；反之， Σ_0 越偏离平面波， δ_{cc} 就越小。

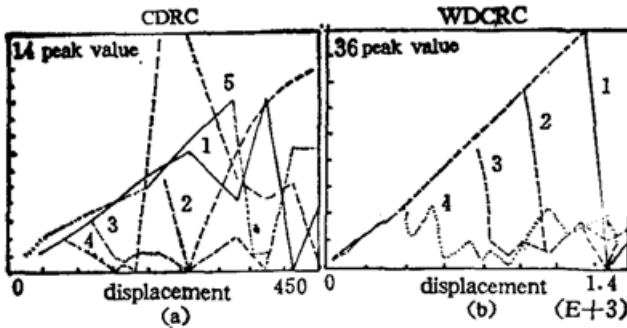


Fig. 1 Dynamic range diagram

(a) Coherent light, (b) uncoherent light

Window size: (1,5)80×80, (2) 60×60, (3) 40×40, (4) 20×20

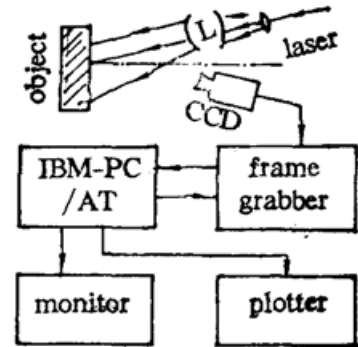


Fig. 2 The setup of DSICM system

根据上述分析，在图 2 光路中加入一透镜系统，用以压缩光场发散角，见图 2 中 L ，此时所得相关测量范围见图 1(a) 中曲线 (5)，与曲线 (1) 相比，可知其动态范围从 $260 \times 8 \mu\text{m}$ 提高到 $325 \times 8 \mu\text{m}$ 。

上述分析给出了从光路本身的变化来增大 DSICM 动态范围的方法(动态范围高端)，在实际测量中，还可以通过提高光学系统分辨率，改变物体表面状况及改善测量环境等，从动态范围的低端增加相关测量动态范围。

2.3 数字散斑强度相关计量的空间分辨率与信号分辨率

空间分辨率与信号分辨率是研究噪声条件下 DSICM 的两个重要参数，表现在信号分辨率是 DSICM 动态范围的下限，而空间分辨率即为 DSICM 用于运动与变形检测的下限可测条件。因此分析这两个参数及后处理(如平滑、恢复)对它们的影响，对于全面了解 DSICM 的动态范围，更好地应用这一检测技术具有重要意义。

为了分析方便，先给出这种分辨率的定义：

DSICM 的空间分辨率是指相关计量系统所能分辨运动、变形物体表面的最小细节；而 DSICM 的信号分辨率是指相关计量系统所能分辨物体表面变形或位移的最小幅度。

对于一般的相关计量系统来说，主要由两部分组成，其一，为光学成象系统；其二，为数据采集及计算机系统。因此，相关计量系统的两种分辨率即由这两部分的分辨本领及噪声水平所决定，

2.3.1 数字散斑强度相关计量系统的空间分辨率

假设 DSICM 系统中，光学成象系统的空间分辨率为 N (lines/mm)，则对一般用的 TV 25 mm 镜头，若取 $F8$ ， $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ，则 $N \approx 162$ ，同理对非相干光，若取 $\tilde{\lambda} = 550 \text{ nm}$ ，则 $N \approx 185$ 。此时光学镜头可以分辨到 $6.2 \mu\text{m}$ (632.8 nm) 或 $5.4 \mu\text{m}$ (550 nm)，即处于散斑逐点检测的下限水平，而对于数据采集系统，一般用中分辨率 CCD ($384 \times 491 \text{ pixels}$)，具有 8 位灰度量化及 $2 \times 512 \times 512 \text{ pixels}$ 的帧存贮器的图象板，其空间分辨率限制为图象采集系统象素节距限度 P ，一般 $P > 1/N$ ，因此 DSICM 的空间分辨率主要受到图象系统空间

分辨率的限制.

2.3.2 数字散斑强度相关的信号分辨率

根据上述信号分辨率的定义, 给出如下关系式:

$$|D(\mathbf{r})| = |D_0(\mathbf{r})| + D_n(\mathbf{r}). \quad (6)$$

式中, $|D_0(\mathbf{r})|$ 为相关计量所决定的物体表面的真实位移或变形, $D_n(\mathbf{r})$ 为对应该点的噪声水平, 显然由于 $D_n(\mathbf{r})$ 的存在, 相关计量系统不可能达到其最低空间分辨率 P , 而为 $P + P_n$. 这里 P_n 描述了下限测量条件下的噪声水平.

2.3.3 提高数字散斑强度相关信号分辨率与空间分辨率的途径及其对动态范围的影响

如前文的讨论, 无论是信号分辨率, 空间分辨率, 还是其动态范围, 均由两部分决定: DSICM 本身的硬件系统与测量条件下的噪声水平. 而对于硬件, 一旦所采用的系统确定, 将不可改变. 因此提高相关检测系统的信号、空间分辨率, 扩大动态范围, 只能取决于对系统噪声的处理结果及在噪声条件下对原始图象的恢复程度.

由(6)式知, 为了提高相关计量系统的信号分辨率即信噪比(SNR), 首先必须降低噪声项 $D_n(\mathbf{r})$ 的影响, 而解决这一问题一个简单而有效的方法是对散斑象进行 $n \times n$ 平滑处理. 众所周知, 若假设系统噪声为白噪声, 则可使 SNR 提高 \sqrt{n} 倍, 因此平滑处理将是提高 DSICM 信号分辨率的有效手段. 然而平滑处理同时将不可避免地降低相关计量系统的空间分辨率, 压缩动态范围宽度. 如对于前述 $n \times n$ 矩形窗平滑方法, 其传递函数为:

$$H(u, v) = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{\sin n\pi u}{u} \cdot \frac{\sin n\pi v}{v}. \quad (7)$$

显然其空间分辨率分量将被压缩为 $1.5nP$, 从而使动态范围的下限由 $P + P_n$ 变为 $1.5nP + P_n$. 可见, 在平滑方式下, 提高信号分辨率是以降低其空间分辨率, 减少其动态范围为代价的.

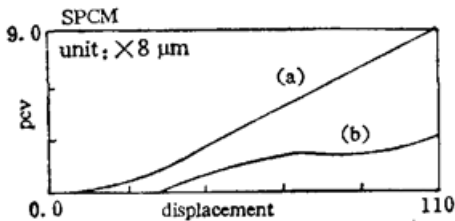


Fig. 3 Comparison of spatial resolution between subpixel correlation and general correlation (a) subpixel correlation, (b) general correlation, PCV—Correlation peak value shifting

为了提高系统空间分辨率, 而又不使 SNR 降低, 可采用数字散斑强度的亚像素相关检测. 如图 3 是原始散斑象相关曲线(a)与双一次线性恢复散斑象条件下的亚像素相关检测曲线(b). 由图中曲线可知, 非恢复条件下, 其空间分辨约为 $30 \times 8 \mu\text{m}$, 而恢复条件下约为 $15 \times 8 \mu\text{m}$, 显然其动态范围也向低端推进 $15 \times 8 \mu\text{m}$.

需要指出的是: 用恢复方法提高 DSICM 的空间分辨率是非常有限的. 由于散斑象的随机性, 不可能完全真实地恢复散斑象; 也由于存在噪声及光学系统的带限作用等, 因此空间分辨率不可能无限制地提高.

3 结 论

本文详细地讨论了 DSICM 的动态范围、空间与信号分辨率, 得到数字散斑强度相关计量的动态范围与窗的限度成正比; 对于相干光来说, 动态范围远小于半窗域, 而非相干光相

关计量的动态范围,在本文方式下,为一半窗域限度,因此,非相干光计量在动态范围与稳定相关输出方面更优于相干光相关计量,但在小发散角相干照明下,可以扩大相关计量的动态范围.相关计量的空间分辨率主要受到相关系统图象象素节距大小及系统噪声水平的限制;要提高空间分辨率,可以从软件方面进行散斑象的 2-D 恢复;图象场的平滑技术使相关计量的图象场 SNR 提高 \sqrt{n} 因子,但使空间分辨率与动态范围低端降低到 $1.5nP + P_n$.

参 考 文 献

- [1] W. H. Peters, W. F. Ranson, Digital imaging techniques in experimental stress analysis *Opt. Eng.*, 1982, **21** (3): 427~431
- [2] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton *et al.*, Digital imaging correlation using Newton-Raphson method of partial differential correlation. *Exp. Mech.*, 1989, **29** (3): 261~267
- [3] T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton *et al.*, Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics, 1985, **25** (3): 232~244
- [4] Ming-Yi Chen, Chang-He Zhou, Yu-Long Mo, Electronic speckle pattern photography (ESPP). 25th Anniversary Edition, *Hologram interferometry and speckle metrology, USA*, Published by The Society for Experimental Mechanics, Inc., 1990: 172~176
- [5] F. P. Chiang, Y. Z. dai, B. Q. Xu *et al.*, Study of surface roughening under different stress mode by correlation. 25th Anniversary Edition, *Hologram interferometry and speckle metrology, USA*, Published by The Society for Experimental Mechanics, Inc., 1990: 172~176
- [6] J. L. Guey, H. H. Aksas, P. Meyruesis, An automatic sequential method of fringe pattern analysis in laser speckle photography. 25th Anniversary Edition, *Hologram interferometry and speckle metrology, USA*, Published by The Society for Experimental Mechanics, Inc., 1990: 67~70
- [7] S. S. Cha, T. S. Slepicka, H. Sun *et al.*, Application of digital image velocimetry to displacement measurements, 25th Anniversary Edition, *Hologram interferometry and speckle metrology, USA*, Published by The society for Experimental Mechanics, Inc., 1990: 81~87

Investigation of the specifics of digital speckle intensity correlation metering

LI XIDE TAN YUSHAN

(Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 17 December 1991; revised 28 February 1992)

Abstract

In this paper, the specifics of digital speckle intensity correlation metering (DSICM) has been discussed in detail. The dynamic range, spatial resolution and signal resolution of DSICM have been investigated theoretically and experimentally under the conditions of coherent and incoherent light. The way of extending the correlation metering dynamic range and improving the correlation metering system has been presented.

Key words digital speckle intensity correlation metering, spatial resolution signal resolution.