

斜光轴数字强度相关计量的像模糊容限

李喜德

谭玉山

(中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230026) (西安交通大学机械工程系, 西安 710049)

摘 要 本文结合 CCD 器件的分辨水平, 详细分析了斜光轴数字强度相关计量时, 允许由离面位移、变形及倾斜等所引起的最大像模糊容限, 并给出了其解析表达式.

关键词 数字强度相关计量, 像模糊容限.

1 引 言

光学场的数字强度相关计量技术, 是近几年在数字图像处理与光学计算相结合的基础上, 发展起来的一种应用广泛的计量技术. 由于其计量光路简单, 数据处理灵活, 因此成为工程结构、细观表面及瞬态过程等的有效测量工具^[1~4]. 目前, 在数字强度相关计量中, 为了提高测量系统对离面位移及变形等的灵敏度, 一般均采用斜光轴布置. 这样被测表面上的某些区域将不能准确地成像于 CCD 靶面. 同时, 加之离面位移与变形等的存在, 将使被测表面在 CCD 靶面的投影像更加模糊, 从而可能导致相关计量失败. 本文结合 CCD 器件的分辨水平, 详细推导了这一投影像与被测表面位移、变形、位置及光学系统各参数的关系, 定义了斜光轴数字强度相关计量所容许的最大像模糊容限, 并给出了解析表达式. 最后, 本文结合理论推导, 对离面位移引起的像模糊容限进行了实验验证.

2 斜光轴数字强度相关计量的像模糊容限

为了导出斜光轴数字强度相关计量的像模糊容限, 给出如图 1 所示斜光轴相关计量时空间点的平面成像光路. 其中 B, C 为空间任意点, O 为光学系统入瞳中心与出瞳中心(假设为薄透镜), θ 为光学系统光轴与被测表面法线的夹角, 平面 π_0 为过 A 点平行于光学系统平面的平面 π 的共轭像. 设光学系统对于 π_0 平面准确对焦, 则空间点 B, C 经光学系统成像后必然落于 π_0 平面之外, 并在其上形成一个弥散斑 z_B, z_C . 显然, z_B, z_C 分别为准确像点 B' 与 C' 在平面 π_0 上的模

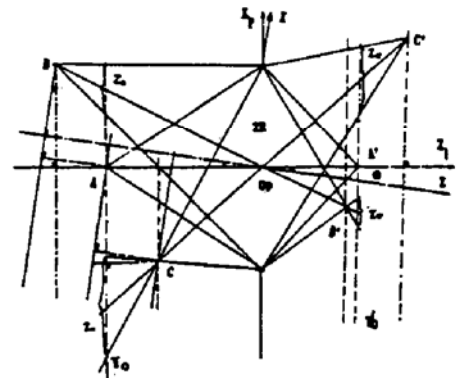


Fig. 1 Plane imaging of space point in slant optical axis system

糊投影像. 由图 1 可知, $z_{B'}$, $z_{C'}$ 分别与 B 、 C 点光锥在 π_0 平面上的投影 z_B , z_C 共轭, 故有:

$$z_{B'} = Mz_B, \quad z_{C'} = Mz_C \quad (1)$$

式中 M 为共轭平面 π_0 , π_0' 的横向放大率. 进一步应图 1 中各三角形相似关系有:

$$\frac{z_B}{2R} = \frac{AE}{O_1E}, \quad \frac{z_C}{2R} = \frac{CG}{O_1Q} \quad (2)$$

经简单几何计算得:

$$\begin{cases} z_B = \frac{2R[-a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta]}{z_a/\cos\theta - a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta}, & z_C = \frac{2R[-a_{xc}\sin\theta + a_{zc}\cos\theta]}{z_a/\cos\theta + a_{xc}\sin\theta - a_{zc}\cos\theta} \end{cases} \quad (3)$$

$$M = f\cos\theta/(z_a - f\cos\theta) \quad (4)$$

$$\text{故有} \quad \begin{cases} z_{B'} = \frac{2R[-a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta]f\cos\theta}{(z_a - f\cos\theta)(z_a/\cos\theta - a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta)} \\ z_{C'} = \frac{2R[-a_{xc}\sin\theta + a_{zc}\cos\theta]f\cos\theta}{(z_a - f\cos\theta)(z_a/\cos\theta + a_{xc}\sin\theta - a_{zc}\cos\theta)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} x_b - x_a = a_{xb}, & z_b - z_a = a_{zb} \\ x_c - x_a = a_{xc}, & z_c - z_a = a_{zc} \end{cases} \quad (6)$$

a_{xb} , a_{xc} , a_{zb} , a_{zc} 分别为 A 点, 相对于 B 、 C 两点 x 及 z 方向位移分量; x_i , z_i 分别为 i 点位置坐标, 且 $i = a, b, c; f$ 为光学系统焦距.

由于任何光探测器都有一定的空间限度与受光灵敏度. 因此, 当 π_0' 平面上 $z_{B'}$ 与 $z_{C'}$ 的限度小于探测器的分辨灵敏度时, 无法判别 $z_{B'}$ 与 $z_{C'}$ 是几何点还是弥散斑. 显然, 对斜光轴数字强度相关计量, 若以 δ 表示用 CCD 靶面的分辨水平, 则可定义其极限像模糊容限为:

$$z_{B'} \leq \delta, \quad z_{C'} \leq \delta \quad (7)$$

将(6)式(7)式分别代入(5)式, 即可求得斜光轴相关计量时的最大像模糊容限:

$$\begin{cases} \delta \geq \frac{2Rf\cos\theta(-a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta)}{(z_a - f\cos\theta)(z_a/\cos\theta - a_{xb}\sin\theta + a_{zb}\cos\theta)} \\ \delta \geq \frac{2Rf\cos\theta(-a_{xc}\sin\theta + a_{zc}\cos\theta)}{(z_a - f\cos\theta)(z_a/\cos\theta + a_{xc}\sin\theta - a_{zc}\cos\theta)} \end{cases} \quad (8)$$

从(8)式可见, 由于光学系统的倾斜, 使得容限条件不仅与转角 θ 有关, 同时还与对准点的初始坐标位置有关, 并且若把 B 、 C 两点分别看成是 A 点位移或变形后的两个位置时, 其位移与变形分量也加入了容限条件中. 下面分两种情形进行讨论:

1. 只有离面位移与变形, 且取最大像模糊容限, 即: $a_{xb} = a_{xc} = 0$, $z_{B'} = z_{C'} = \delta$ 时, 由(8)式有:

$$\begin{cases} a_{zb} = \frac{z_a\delta(z_a - f\cos\theta)}{2Rf\cos^3\theta - \delta\cos^2\theta(z_a - f\cos\theta)} \\ a_{zc} = \frac{z_a\delta(z_a - f\cos\theta)}{2Rf\cos^3\theta - \delta\cos^2\theta(z_a - f\cos\theta)} \\ a_z = a_{zb} + a_{zc} = \frac{4Rfz_a\delta\cos^3\theta(z_a - f\cos\theta)}{4R^2f^2\cos^6\theta - \delta^2\cos^4\theta(z_a - f\cos\theta)^2} \end{cases} \quad (9)$$

(9)式即无面内位移时, 对准点 A 所允许物面偏离的空间最大容限. 可见最大偏离:

1) 与光学系统孔径有关. 孔径越小, 容许的离面位移与变形越大; 反之, 当孔径变大时, 最大容许离面位移与变形则变小. 由于光学系统孔径与光圈之间有关系式:

$$2RF = f \quad (10)$$

因此, 相关计量时, 若要测量较大的离面位移与变形, 在保证一定的光照度条件下, 可选用较大的 F 数.

2) 与记录相关场时的物镜焦距有关. 焦距越大, 容许的离面容限越小.

3) 与对准平面的位置有关. 对准平面越远, 容许的离面容限越大.

4) 令(9)式中 $\theta=0$, 即得垂直光轴下, 数字强度相关计量时, 单向及空间最大离面容限:

$$\begin{cases} a_{zb} = \delta z_a (z_a - f) / [2Rf - \delta(z_a - f)], \\ a_{zc} = \delta z_a (z_a - f) / [2Rf - \delta(z_a - f)], \\ a_z = 4R\delta f z_a (z_a - f) / [4R^2 f^2 - \delta^2 (z_a - f)^2]. \end{cases} \quad (11)$$

考虑到(10)式及一般 CCD 器件所用的照相物镜有 $z_a \gg f$, 则(11)式可简化为:

$$a_{zb} = z_a^2 \delta F / (f^2 - z_a F \delta) \quad a_{zc} = z_a^2 \delta F / (f^2 - z_a F \delta) \quad a_z = 2f^2 z_a^2 \delta F / (f^4 - (F z_a \delta)^2) \quad (12)$$

2. 只有面内位移时, 即 $a_{zb} = a_{zc} = 0$, 由(8)式有:

$$a_{zb} = \frac{-2\delta z_a (z_a - f \cos \theta)}{[2Rf \cos \theta - \delta(z_a - f \cos \theta)] \sin 2\theta} \quad a_{zc} = \frac{-2\delta z_a (z_a - f \cos \theta)}{[2Rf \cos \theta - \delta(z_a - f \cos \theta)] \sin 2\theta} \quad (13)$$

及单向面内位移最大容限

$$a_z = \frac{-4\delta z_a R f (z_a - f \cos \theta)}{[4R^2 f^2 \cos^2 \theta - \delta^2 (z_a - f \cos \theta)^2] \sin \theta} \quad (14)$$

可见, 即使在无离面位移与变形存在, 由于采用斜光轴相关计量, 面内位移与变形也会引起 CCD 靶面像模糊, 并且在达到(13)式与(14)式的水平时, 可使相关计量结果变坏或失败.

3 实验及结果分析

本文结合前文计算, 对数字强度相关计量时像模糊容限进行了实验. 该实验光路如图 2 所示. 实验中各参数为 $a_{za} = a_{zb} = 0$, $\theta = 0$, $z_a = 61.3 \text{ cm}$, $e = 4.3 \text{ cm}$, $F = 9$, 所用镜头焦距为 $f = 25 \text{ mm}$, $\delta = 12.37 \mu\text{m}$. 实验时, 通过平台在 z 轴方向移动物体(实验开始时, 准确对焦被测物面), 然后进行数字相关计量, 并在相关函数计算中考虑到采样窗的移动. 图 3 给出了相关计量时, 峰值移动 S 随 a_{zb} 变化的实验曲线. 可见, 当 $a_{zb} > 5.33 \text{ cm}$ 时, 相关计量失败.

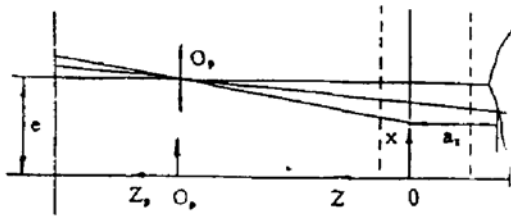


Fig. 2 The setup of measuring the image blurring allowance

若将实验中各参数代入(11)式, 可求得数字强度相关计量空间模糊像容限 $(a_{zb})_{\max}$ 为 7.51 cm . 比较 a_{zb} 与 $(a_{zb})_{\max}$ 可见, 后者略大于前者. 造成这种结果的主要原因是: 首先, 本文在理论推导中假设了像弥散斑在整个 CCD 靶面上均不会超过 CCD 器件的分辨水平. 但在实际测量中, 由于光场的发散及非均匀性, 使得 CCD 靶面上投影的弥散斑不会都局限于 CCD 的分辨本领之

下, 从而在进行数字相关计算时对相关函数产生影响, 致使像模糊容限降低; 其次, 光学系统的缺陷、光探测器及处理系统的不完善、环境影响等, 均可使像模糊容限减小.

为了能真实地反映一个实际相关计算系统所允许的最大像模糊容限, 可将上述诸因素归结为一个系统修正因子 β , 并定义 CCD 器件的有效分辨水平 δ' , 即 $\delta' = \beta\delta$. 显然, 由本文的实验有 $\beta = a_{zb} / (a_{zb})_{\max} = 0.71$. 可见, 当空间像弥散斑超过 CCD 器件分辨水平的 71% 时,

垂直光轴数字强度相关计量即达到其允许的最大半空间像模糊容限。

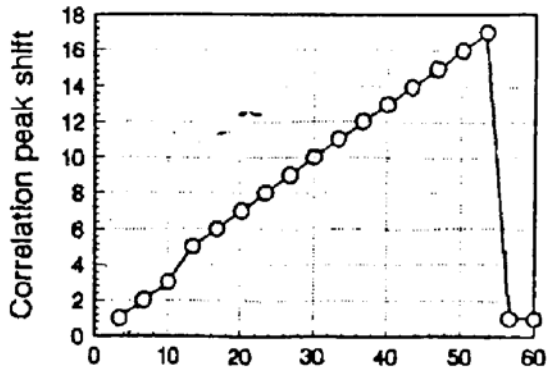


Fig. 3 The experimental result of image blurring allowance of vertical optical axis system

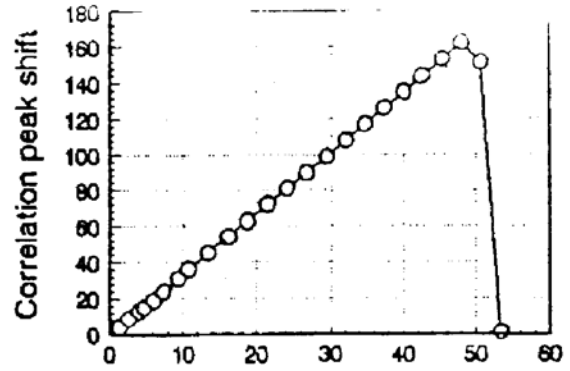


Fig. 4 The experimental result of image blurring allowance for slant optical axis system

为了考查斜光轴情形下的最大半空间像模糊容限, 本文也对其进行了实验检测. 考虑到此时相关计量具有较高的计量灵敏度, 在其它实验参数不变条件下, 取: $\theta = 37.3^\circ$, $F = 5.6$, $z_a = 50.5$ cm. 实验结果如图 4 所示. 此时, 求得 $\beta = 0.84$, $(a_{sb})_{max} = 5.7$ cm. 可见若在同样的实验参数下, 斜光轴数字强度相关计量有更大的空间模糊容限及较高的计量灵敏度.

参 考 文 献

- [1] W. H. Reters, W. F. Ranson, Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt. Eng.*, 1982, 21(3): 427~431
- [2] T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton, Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.*, 1985, 25(3): 232~244
- [3] 周辛庚, 戴福隆, 高建新, 数字散斑相关方法的原理与应用(二). 实验应力专业委员会编, 第七届全国实验力学学术会议论文集(一), 北京, 北京大学出版社, 1992, 618~622
- [4] 李喜德, 谭玉山, 数字散斑强度相关计量在工程结构检测中的应用. 实验应力专业委员会编, 第七届全国实验力学学术会议论文集(一), 北京, 北京大学出版社, 1992, 635~638

Image Blurring Allowance of Digital Intensity Correlation Metering in the Case of Slant Optical Axis

Li Xida

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Tan Yushan

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

(Received 12 April 1993; revised 12 July 1993)

Abstract Allowing for CCD resolution, the authors have investigated in detail the image blurring allowance of digital intensity correlation metering in the case of slant optical axis. The maximum image blurring allowances caused by both the out-plane displacement, deformation and the tilt have been presented.

Key words digital intensity correlation metering, image blurring allowance