

数字散斑剪切干涉光学测距

Optical Distance Sensing Using Digital Speckle Shearing Interferometry Technique

朱中儒 张国平
Zhu Zhongru Zhang Guoping

(华中师范大学物理系 湖北武汉 430079)

(Dept. of Physics, Central China Normal University, Wuhan, Hubei, 430079, China)

摘要 提出数字散斑剪切干涉测量原理,结合干涉条纹锐化技术,在计算机上对散斑数据帧进行处理得到锐化条纹图形,从图形中得到条纹周期,根据周期计算出被测目标距离。测量的范围可以随着光源的位移进行调节。实验结果表明,当平面漫反射物体距扩束透镜 56.5 mm 时,该法测得距离为 56.9 mm,有 0.71% 的偏差。当光源位移 50 mm 时,该法测得的距离为 569.3 mm,与尺子测得的距离 565 mm 相差 0.80%。当距离达 1 000 mm 时,难以测定条纹周期。该方法特别适用于对漫反射物体距离的测量,且对环境的干扰具有相对非敏感性。

关键词 光学测距 颗粒斑纹切除 干涉条纹周期 条纹锐化

中图分类号 O 436.1; TH 761.2

Abstract A novel theoretical model for sensing distance using digital speckle shearing interferometry (DSSI) is presented. The objective distance could be determined according to the relation between fringe period and distance. The fringe period could be determined from the sharpening fringe pictures which are processed using computer. In the experiment, when the distance between the objective and the expander lens was 56.5 mm, we had 56.9 mm of measurement by DSSI, with 0.71% deviation. When the light source had 50 mm displacement, the target distance was 569.3 mm measured by DSSI, with 0.80% deviation compared to the distance of 565mm measured with ruler. When the target distance is 1 000 mm, it is hard to determine fringe period. This method is suited for the determination of distance of diffuse targets, and has relatively insensitive towards environment.

Key words optical distance measurement, speckle shearing, fringe period, fringe sharpening

目前有许多光学测距的方法,这些方法总的来说可分成 4 类,分别是时间间隔法,几何测量法,干涉测量法和衍射测量法^[1]。比较来看,每项技术都有其优点和缺点。比如干涉测量技术与其它技术比较有很高的精度但易受环境噪声的影响。一般情况下采用什么样的技术往往取决于测量本身的需要。本文所提出的这种测距方法主要基于两方面的考虑: 1) 适合于测量漫反射目标; 2) 对环境噪声的相对非敏感性。这两个要求都限制了前面所介绍的测距方法的应用。

数字散斑剪切测量方法 (DSSI) 是基于数字散斑剪切干涉原理,散斑剪切干涉法是一种被广泛应用的测量方法,应用于确定漫反射物体的曲表面或平表面因变形而引起的弯曲程度^[2,3]。散斑剪切干涉装置能使其对环境噪声具有相对非敏感性。结合视频数字处理^[4-6],可得到清晰干涉条纹,这项技术越来越广泛地应用于非破坏性监测之中。

1 原理

数字散斑剪切测距装置如图 1 所示,目标是一个平面漫反射物体,自激光器发出的一束激光经透镜扩束后照射到被测物体表面上。当光源在两记录点之间平移时就得到一幅干涉条纹。当成像系统聚焦之后,测出与光源位移相关的条纹周期就可得到想要测量的距离。

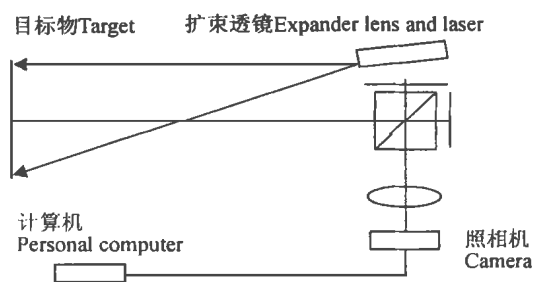


图 1 数字散斑剪切测距装置

Fig. 1 Digital speckle shearing interferometry set-up for optical distance measurement

当光源沿着光辐射路径方向平移 δR , 利用干涉测距系统就可求出光源在两个不同位置时在成像表面的光强度, 它们分别是:

$$I_1 = T_1^2 + T_2^2 + 2T_1T_2\cos(H), \quad (1a)$$

$$I_2 = T_1^2 + T_2^2 + 2T_1T_2\cos(H + \Delta), \quad (1b)$$

T_1 和 T_2 分别是两束干涉光波前幅度, H 是光波的随机相位, Δ 是光源平移导致的相位变化量. 将 2 幅图纹进行差分, 就可得到第 3 幅图纹, 表达式如下:

$$|I_1 - I_2| = |4T_1T_2\sin(H - \frac{\Delta}{2})\sin(\frac{\Delta}{2})|. \quad (2)$$

如图 2 所示, 当光源从 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 移到 $S_2(x_2, y_2, z_2)$, 光线经过目标上任意点 $P(x, y, z)$ 到达探测器 $O(x_0, y_0, z_0)$, 光程差如下:

$$S_1P = [(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2]^{1/2} \\ = R_1 [1 + \frac{x^2 + y^2 + z^2 - 2xx_1 - 2yy_1 - 2zz_1}{2R_1^2}],$$

$$S_2P = [(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2]^{1/2} \\ = R_2 [1 + \frac{x^2 + y^2 + z^2 - 2xx_2 - 2yy_2 - 2zz_2}{2R_2^2}], \quad (4)$$

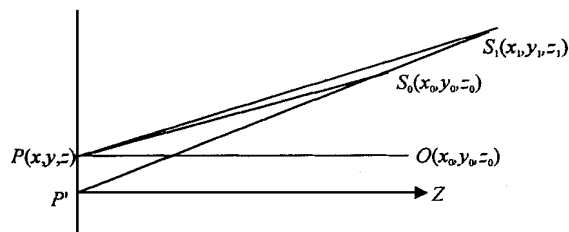


图 2 数字散斑剪切测距光路

Fig. 2 Optical path diagram of the digital speckle shearing interferometry for distance measurement

其中, $R_1^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$, $R_2^2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2$, 且去掉二项展开式中的高次项就可得到上式. 所以, 从 S_1 和 S_2 到物体上 P 点的光程差为:

$$d_1(x, y, z) = (S_1P + OP) - (S_2P + OP) \approx R_1 - R_2 + \frac{1}{2} [\frac{R_1 - R_2}{R_2R_1}] (x^2 + y^2 + z^2). \quad (5)$$

对于相邻点 $P'(x + \delta x, y, z)$, 光程差 d' 可以表示为:

$$d_2(x + \delta x, y, z) = (S_1P' + OP') - (S_2P' + OP') \approx R_1 - R_2 + \frac{1}{2} [\frac{R_1 - R_2}{R_2R_1}] [(x + \delta x)^2 + y^2 + z^2]. \quad (6)$$

忽略等式中的数值较小项, 则相对光程差的变化 δd 为:

$$\delta d = d_2(x + \delta x, y, z) - d_1(x, y, z) \approx [\frac{R_2 - R_1}{R_2R_1}] x \delta x. \quad (7)$$

假如 $R_2 = R_1 \gg 1$, 则 (7) 式可以重写为:

$$\delta d = \frac{(\delta R)(\delta x)x}{R^2}. \quad (8)$$

δR 是扩束透镜的位移量, R 是扩束透镜与被测目标

之间的距离. 则两束干涉光的相移为:

$$\Delta = \frac{2c}{\lambda} \delta d = \frac{2c(\delta R)(\delta x)x}{\lambda R^2}, \quad (9)$$

λ 是相干光的波长, 条纹与相位变化的关系如下:

$$\Delta = (2n + 1)c = \frac{2c(\delta R)(\delta x)x}{\lambda R^2}, \quad (10)$$

n 是条纹级数, 假如条纹周期为 x' , 等式 (10) 可以重写为:

$$R = \frac{(\delta R)(\delta x)x^{1/2}}{\lambda}, \quad (11)$$

从该等式中可以看出, 只要 δR , δx , λ 和 x' 可知, 距离 R 就可以求出.

2 干涉条纹的细锐化

为了增强散斑条纹的可视性, 增加周期的准确度, 条纹细锐化技术的使用是非常必要的^[7]. 当来自目标的反射光较弱从而导致条纹对比度很低时, 这项技术的使用就显得非常重要了. 从等式 (9) 中可以看出, Δ 直接对应着光源的位移 δR . 如果 δR 每次增加相同的量, 那么等式 (1a) 和 (1b) 总的可以写为:

$$I_m = T_1^2 + T_2^2 + 2T_1T_2\cos(H + (m - 1)\Delta), \quad (12)$$

$m = 1, 2, 3, \dots$ 是所使用数据的数目, 分析二项式系数, 采用 3, 4, 5, 6 数据时的干涉条纹分别是:

$$|(I_1 + I_2)/2 - I_2| = |4T_1T_2\cos(H - \Delta)\sin^2(\frac{\Delta}{2})|, \quad (13)$$

$$|(I_1 - I_4)/3 - I_2 + I_3| = |\frac{16}{3}T_1T_2\cos(H - 3\Delta/2)\sin^3(\frac{\Delta}{2})|, \quad (14)$$

$$|(I_1 + I_5)/6 - 2(I_2 + I_4)/3 + I_3| = |\frac{16}{3}T_1T_2\cos(H - 2\Delta)\sin^4(\frac{\Delta}{2})|, \quad (15)$$

$$|(I_1 - I_6)/10 - 2(I_2 - I_5)/2 + I_3 - I_4| = |\frac{32}{5}T_1T_2\cos(H - 5\Delta/2)\sin^5(\frac{\Delta}{2})|. \quad (16)$$

很显然, 条纹函数直接与 $\sin^{(m-1)}(\Delta/2)$ 相对应, 随着使用数据数目的增加, 条纹的可分辨性也会跟着提高, 从而亮纹宽度就会变得越来越窄, 周期的确定精确度就会得到进一步地提高.

图 3, 图 4, 图 5, 图 6 分别是 (13), (14), (15),

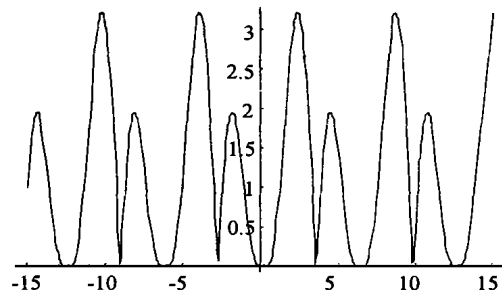


图 3 (13) 式相应函数图

Fig. 3 Corresponding function picture of Formula (13)

(16)式经过 Mathematica软件运算所得到的函数图。为了运算简单起见,这里取 $T_a T_b = 1, H = 2$, 从图中可以进一步地看出采用数据的数目越多,条纹的分辨性就会越高

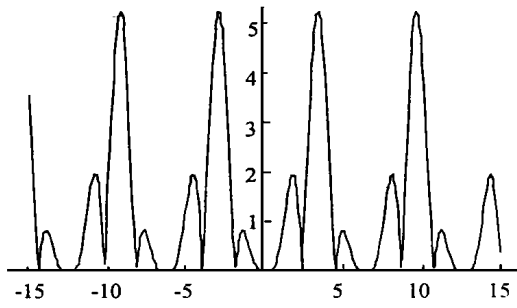


图4 (14)式相应函数图

Fig. 4 Corresponding function picture of Formula (14)

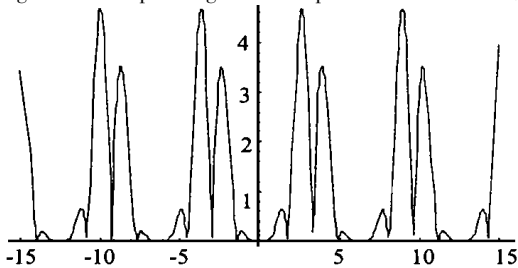


图5 (15)式相应函数图

Fig. 5 Corresponding function picture of Formula (15)

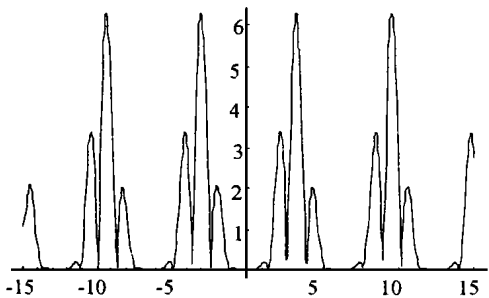


图6 (16)式相应函数图

Fig. 6 Corresponding function picture of Formula (16)

3 实验

在实验中将一平面漫反射物体距扩束透镜 56.5 mm 放置, $\lambda = 6.32 \times 10^{-3}$ mm 和 $\delta x = 7.67$ mm 当 $\delta R = 0.1$ mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm 时得到幅散斑图像。利用 (2) 式及 (13) ~ (16) 式的操作就可得到图 7 所示 x 方向横截面强度分布图。从图 7 可以看出随着所使用的数据帧数目的增多,亮条纹的宽度越来越窄,周期确定的精确度就会越来越高。利用此法测得条纹周期为 26.7 mm, 将其和 $\delta R, \delta x, \lambda$ 代入 (11) 式得到距离为 56.9 mm, 和用尺子测量的值 56.5 mm 相比, 大约是 0.71% 的偏差。当 $\delta R = 50$ mm 时测得目标距离为 569.3 mm, 与用尺子测得的距离 565 mm 相比, 大约是 0.80% 的偏

差。当距离达到 1 000 mm 以上时,由于干涉条纹亮度宽度展宽,周期的确定显得很困难。

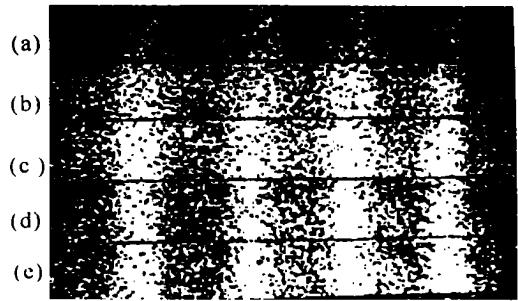


图7 经 (a) 2, (b) 3, (c) 4, (d) 5, (e) 幅数据帧处理的数字散斑剪切条纹图

Fig. 7 Digital speckle shearing interferometry fringe pattern obtained by processing (a) two; (b) three; (c) four; (d) five; and (e) six frames of speckle pattern data.

4 结语

文中我们采用数字散斑剪切干涉测量这一原理,结合条纹细锐化技术,通过在计算机上对多幅散斑数据帧进行处理得到细锐化条纹图形,从图形中即可得到条纹周期,从而根据周期确定被测目标距离。测量的范围还可以随着光源的位移进行调节。该方法特别适用于对漫反射物体距离的测量,且对环境的干扰具有相对非敏感性。结合傅立叶变换技术,距离的测量范围将会得到大大的提高,若能对操作进行完全自动化的设计,该方法极有望成为未来测距中的一项引人注目方法。

参考文献

- 1 Strand T C. Optical three-dimensional sensing for machine vision. *Opt Eng*, 1985, 24: 33-40.
- 2 Takezaki J, Huang Y Y. Direct measurement of flexural strains in plates by shearography. *J Appl Mech*, 1986, 53: 125-129.
- 3 Huang Y Y, Liang C Y. Image-shearing camera for direct measurement of surface strains. *Appl Opt*, 1979, 18: 1046-1051.
- 4 Chau F S, Ng T W. A real-time digital shearing speckle interferometer. *Meas Sci Technol*, 1992, 3: 381-383.
- 5 Ganesan A R, Sharma D K, Kothiyal M P. Universal digital speckle shearing interferometer. *Appl Opt*, 1998, 27: 473-4734.
- 6 Ng T W, Chau F S. A digital shearing speckle interferometry technique for modal analysis. *App Acoustics*, 1994, 42: 175-185.
- 7 Ganesan A R, Jonathan C, Sirohi R S. Sharpening of fringes in digital speckle pattern interferometry. *Appl Opt*, 1988, 27: 2099-3100.

(责任编辑: 黎贞崇)