

二维方向小波构造的新型散斑相位奇异法测量 面内微位移

高毓羚 潘广贞

中北大学计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051

摘要 提出了一种二维方向小波构造的新型散斑相位奇异法测量面内微位移。根据二维方向小波的极化分析能力,选取旋转角度为 $\pi/2$,分别对位移前后的图像进行 x 和 y 方向的极化分析,构造了一种网状结构的分布稳定的相位奇异点图;提出了两步位移测量的新方法,通过两次傅里叶变换和减运算输出的两个相关亮点图像得到初步位移量,由初步位移的半网格宽度和匹配最邻近奇异点对间的位移求待测物体的精确位移;分别进行仿真模拟和激光鼠标定位实验。结果表明,奇异点在不同噪声条件下的正确匹配率在90%以上,实际的鼠标位移和方向与测量值的鼠标位移和方向之间的误差小于0.5 pixel和 1° 。该方法具有奇异点正确匹配率高、测量精度高、对噪声不敏感、稳定性好等优点,能够精确定位激光鼠标的位移和方向。

关键词 测量;二维方向小波;相位奇异;面内微位移;激光鼠标

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1108002

Micro In-Plane Displacement Measurement Using New Speckle Phase Singularities Method Generated by Two-Dimensional Directional Wavelet

Gao Yuling Pan Guangzhen

School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract A new speckle phase singularities method generated by two-dimensional directional wavelet is proposed to measure micro in-plane displacement. A phase singularities image is generated by polarization analysis of two-dimensional directional wavelet, setting the rotation angle be $\pi/2$ in order to analyze the image before and after displacement of x and y directions, which has network structure stable distribution. The new two-step displacement measurement method is proposed. Preliminary displacement is obtained in the output two correlation points image by using twice Fourier transform and subtraction. The precision displacement of object to be measured is calculated by half the grid width of the initial displacement and displacement between the closest matching singular point. It is studied that simulation and laser mouse positioning experiment. Results show that correct matching singularities are still more than 90% under different noise conditions and the error between actual value and measured value of mouse displacement and direction is less than 0.5 pixel and 1° . This method has many advantages, such as high rate of singularity correct matching, high accuracy, insensitive to noise and good stability, which can precisely locate the displacement and direction of the laser mouse.

Key words measurement; two-dimensional directional wavelet; phase singularities; micro in-plane displacement; laser mouse

OCIS codes 030.6140; 120.6150; 350.5030

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-06-29

基金项目: 总装备部预研基金

作者简介: 高毓羚(1986—),女,硕士研究生,主要从事图形图像处理和计算机视觉方面的研究。

E-mail: 839460408@qq.com

导师简介: 潘广贞(1969—),男,博士,副教授,主要从事图形图像处理和计算机仿真方面的研究。

E-mail: Sunland@nuc.edu.cn

1 引 言

面内微位移测量是力学测量中的重要分支,可应用到工程在线检测、精密设备加工、细胞生物测定等各种不同的领域,面内微位移测量技术水平的高低直接影响着各个领域技术水平的发展。散斑是光学中的一种普遍现象,采用散斑图像进行面内微位移测量具有设备简单、非接触等优点,在面内微位移测量中发挥着重要的作用^[1-2]。

目前,国内外的学者一直致力于依据散斑特性进行测量面内微位移测量的研究,并取得了重要成果。自 Pan 等^[3-7]提出数字散斑相关(DSCM)以来,数字散斑相关法不断地应用于面内微位移测量。Yuan 等^[8]在数字散斑相关法的基础上对搜索窗口进行加权,根据位移的大小适当调节加权的搜索窗口,实现了小位移和大位移前后相关点的计算,计算结果的精确度较高,但无法避免大量重复搜索,造成运算时间太长。Wang 等^[9]将光学中的涡旋现象应用到散斑图中,对散斑图滤波生成相位涡旋(也称相位奇异)图,研究了相位涡旋的中心结构参数,将相位奇异点作为待检测的点进行面内微位移测量,降低了运算时间,但无法用于大范围动态搜索,极大地限制了测量范围。吕芳捷等^[10]将数字散斑相关法与相位涡旋相结合,采用相关法对相位涡旋稀疏矩阵进行搜索,既提高了运算速度,又可用于大范围动态搜索,但由于产生的相位涡旋分布不规律,导致变形前后物体的相位奇异点数目相差较大,相关搜索时发生匹配错误,大大降低了测量精度。Vadnjal 等^[11]首次将二维小波变换应用到面内微位移测量中,开拓了新的测量途径,但生成网状奇异点图的网格不均匀,计算的位移值误差很大,且只有在知道大概位移的条件下测量,停留在理论研究水平,不具有实用价值,无法适用于现场测量。

本文采用二维方向小波变换构造新型的、网格均匀的网状相位奇异点图,提出了初步位移和精确位移两步测量的新方法,由初步位移和匹配最邻近奇异点对间的位移计算待测物体的精确位移,仿真模拟和激光鼠标定位实验表明,该方法具有奇异点正确匹配率高、测量精度高、对噪声不敏感、稳定性好等优点。

2 散斑相位奇异的构造理论

根据二维方向小波的具有极化分析的能力,对散斑图像分别进行 x 和 y 轴方向的极化分析,提取小波相位图中互相垂直的实部和虚部零值线,重合零值线图生成相位奇异点图。采用二维方向小波变换构造的网状相位奇异点图,结构非常稳定,对测量环境中的噪声不敏感。

2.1 二维方向小波变换

二维连续小波变换是指将小波母函数进行平面位移、坐标旋转和尺度伸缩,然后与二维信号作内积。表达式为

$$S(a, b, \theta) = \frac{1}{a^2} \int_{R^2} \Psi^* [a^{-1} R_{-\theta}(\mathbf{r} - \mathbf{b})] I(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} = \int_{R^2} \exp(i \mathbf{k} \cdot \mathbf{b}) \hat{\Psi}^* [a R_{-\theta}(\mathbf{k})] I(\mathbf{k}) d^2 \mathbf{k}, \quad (1)$$

式中 a 为尺度因子, $\mathbf{b} = (b_x, b_y) \in R^2$ 为平移参数,表示沿 x 和 y 轴方向的平移量, $\theta \in [0, 2\pi)$ 为旋转角度, $I(\mathbf{r})$ 为二维图像信号, $\mathbf{r} = (x, y) \in R^2$, $\mathbf{k} = (k_x, k_y) \in R^2$ 为频域坐标, Ψ 为小波母函数, $*$ 表示共轭, $\hat{\Psi}$ 表示傅里叶变换, \cdot 表示向量点乘, $R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ 为旋转矩阵。

方向小波是指小波函数经傅里叶变换后,其有效区域都包含在以原点为顶点的锥形区域。二维复 Morlet 小波满足方向小波的条件,所以将其作为方向小波的母函数,其定义为

$$\psi(\mathbf{r}) = \exp(i \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) \exp\left(-\frac{1}{2} |\mathbf{A} \mathbf{r}|^2\right) + \text{corr.term}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} = \text{diag}\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, 1\right)$ 表示 2×2 的各向异性^[12]矩阵,其中 $\varepsilon \geq 1$, $\mathbf{k}_0 = k_0(\cos \theta, \sin \theta)$ 表示平面波矢量用来调制小波, corr.term 是为了满足容许条件 $\hat{\Psi}(0) = 0$, 一般当 $|\mathbf{k}_0| \geq 5.6$ 时,该项可以忽略^[13]。当 $\theta = \pi/2$ 时,平面波矢量 \mathbf{k}_0 垂直于频域幅值等值椭圆图的长轴,此时的角度为最优,可以有效地检测出 x 轴方向的奇异点^[14]。于是(2)式可化解为

$$\psi(r) = \exp(ik_0y) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\varepsilon} + y^2\right)\right]. \quad (3)$$

对(3)式进行傅里叶变换为

$$\hat{\psi}(k) = \sqrt{\varepsilon} \exp\left\{-\frac{1}{2}[\varepsilon k_x^2 + (k_y - k_0)^2]\right\}. \quad (4)$$

采用(4)式的二维方向小波母函数,可以对图像进行 x 轴方向的极化分析,将图像逆时针旋转 $\pi/2$,按以上二维方向小波作变换,将变换后的图像按顺时针旋转 $\pi/2$,实现了 y 轴方向的极化分析。图 1 表示采用二维方向小波变换对 $130 \text{ pixel} \times 130 \text{ pixel}$ 的散斑图分别进行 x 和 y 轴方向的极化分析,其中参数 $a=25, k_0=6, \varepsilon=6$,图 1(a)表示散斑原图像,图 1(b)表示对图 1(a)图像进行 x 轴方向的极化分析的小波相位图,呈周期的水平条纹,图 1(c)表示对图 1(a)图像进行 y 轴方向的极化分析的小波相位图,呈周期的竖直条纹。

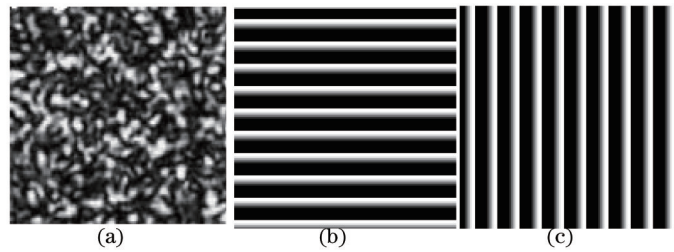


图 1 (a) 散斑原图像; (b) x 轴方向的极化分析的小波变换相位图; (c) y 轴方向的极化分析的小波变换相位图

Fig.1 (a) Original speckle image; (b) wavelet phase diagram of the x -axis direction polarized analysis; (c) wavelet phase diagram of the y -axis direction polarized analysis

2.2 相位奇异的构造方法

利用二维方向小波具有的极化分析能力来构造相位奇异,对散斑图分别进行 x 和 y 轴方向且旋转角度 $\theta = \pi/2$ 的极化分析,得到两幅水平和竖直条纹呈周期性分部的小波相位图,分别提取水平条纹相位图的实部零值线和竖直条纹相位图的虚部零值线,将实部零值线和虚部零值线图进行重合生成一幅零值线相互垂直且交点是相位奇异点的网状图像。将位移前后的图像分别按照上述处理,得到位移前后的相位奇异点图。

图 2 表示相位奇异点图的构造过程,其中图 2(a)表示从图 1(b)中提取的实部零值线,图 2 (b)表示从图 1(c)中提取的虚部零值线,图 2 (c)表示图 2 (a)和图 2 (b)两幅图重合后的图像。

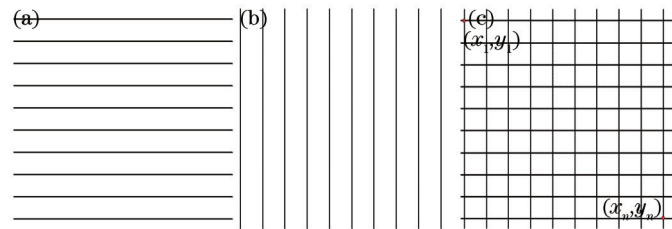


图 2 (a) 从图 1(b)中提取的实部零值线; (b) 从图 1(c)中提取的虚部零值线; (c) 重合(a)和(b)两幅图后的图像

Fig.2 (a) Extracting the real zero line from Fig.1 (b); (b) extracting the imaginary zero line from Fig.1 (c); (c) image after overlapping of Fig.2 (a) and Fig.2 (b)

因为对 x 和 y 轴方向作旋转角度 $\theta = \pi/2$ 的极化分析时,参数 a, k_0 和 ε 的值相同,所以图 2(c)中的网格可以看做是正方形,根据实部零值线和虚部零值线的条数 m_1, m_2 可知围成的完整网格数为 $(m_1 - 1) \times (m_2 - 1)$,所有完整网格的面积由图 2 (c)中交点坐标 (x_1, y_1) 和 (x_n, y_n) 确定,其中 n 为交点的个数,可以计算出每个网格的宽度 $k_d = \sqrt{\frac{|x_1 - x_n| \times |y_1 - y_n|}{(m_1 - 1) \times (m_2 - 1)}}$ 。网格的宽度 k_d 与 a, k_0 和 ε 有关,相互关系见统计结果表 1。图 2(c)中交点即

相位奇异点,寻找交点附近两条零值线的相邻数据点,每条零值线上有 2 个数据点与交点相邻,根据 2 个数据点可以确定直线方程,求解 2 个直线方程的交点,得到相位奇异点较精确的坐标。图 2(c)中的网状相位奇异点图的结构稳定、分布规律,网格形状不会因噪声发生明显变化。

3 两步位移测量法

两步位移测量法包括初步位移测量和精确位移测量,初步位移测量是通过两次傅里叶变换和减运算输出的两个相关亮点图像得到初步位移量,精确位移测量是由初步位移的半网格宽度和匹配最邻近奇异点之间的位移求待测物体的精确位移。该测量方法具有奇异点匹配效率和测量精度高的优点。

3.1 初步位移测量

设想通过得到位移前后的相关亮点图来初步测量位移,根据频域数字散斑相关法^[15]的两次傅里叶变换理论,引用减运算^[16]合成位移前后的图像,得到两个相关亮点的输出图像,通过初步估计两个相关亮点中心位置的坐标得到初步位移量 $(\Delta x', \Delta y')$ 。

在散斑图中任意选取某一点,以该点为中心的周围小区域作为子区域,变形前子区的光照强度为 $i_1(x, y) = i(x, y)$,变形后子区的光照强度为 $i_2(x, y) = i(x - u, y - v)$,其中 u 、 v 是 x 、 y 方向的位移量。引入减运算将变形前后的两幅图进行合成,得到处理后的散斑图,设在该子区其光照强度为 $i_3(x, y) = i_1(x, y) - i_2(x, y)$,将 $i_1(x, y)$ 进行快速傅里叶变换,设变换的域坐标为 f_x, f_y ,则有

$$I_1(f_x, f_y) = |I(f_x, f_y)| \cdot \exp[j\varphi(f_x, f_y)]. \quad (5)$$

取 $I_1(f_x, f_y)$ 的共轭,得到 $I_1^*(f_x, f_y)$ 将其作为滤波器,则有

$$I_1^*(f_x, f_y) = |I(f_x, f_y)| \cdot \exp[-j\varphi(f_x, f_y)]. \quad (6)$$

对 $i_3(f_x, f_y)$ 作傅里叶变换,则有

$$I_3(f_x, f_y) = |I(f_x, f_y)| \cdot \exp[j\varphi(f_x, f_y)] \{1 - \exp[-2\pi j(uf_x + vf_y)]\}. \quad (7)$$

用滤波器 $I_1^*(f_x, f_y)$ 乘以(7)式,实现新散斑图的频谱滤波,则有

$$F(f_x, f_y) = I_1^*(f_x, f_y) I_3(f_x, f_y) = |I(f_x, f_y)|^2 \{1 - \exp[-2\pi j(uf_x + vf_y)]\}. \quad (8)$$

再对 $F(f_x, f_y)$ 作傅里叶变换,即从一次频域 (f_x, f_y) 变换到二次频域 x, y ,则有

$$G(x, y) = \text{FT}[F(f_x, f_y)] = G_1(x, y) - G_1(x, y) \otimes \delta(x - u, y - u) = G_1(x, y) - G_1(x - u, y - u), \quad (9)$$

式中 \otimes 表示卷积运算, $G_1(x, y)$ 和 $G_1(x - u, y - u)$ 是脉冲扩展函数。体现在输出图像上是变形前后的两个相关亮点,初步估计两个相关亮点中心位置的坐标,将两中心坐标作差定义为初步位移量 $\Delta x', \Delta y'$ 。如图3所示,图3(a)表示减运算生成的变形前后的相关亮点图,图3(b)表示图3(a)中的亮点在网状相位奇异点图中的位置。

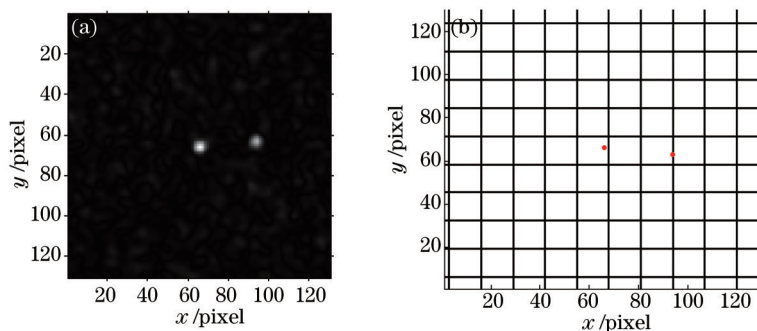


图3 (a) 变形前后的相关亮点图; (b) 亮点在图中的位置

Fig.3 (a) Relevant highlights image before and after deformation; (b) position of highlights in image

3.2 精确位移测量

在初步位移测量的基础上进行精确位移测量,需要定义初步位移的半网格宽度和匹配最邻近奇异点之间的位移两个变量。初步位移的半网格宽度是指将初步位移量取整数个 $1/2$ 网格宽度 k_d , 根据初步位移量 $\Delta x', \Delta y'$ 计算其占 $1/2$ 网格宽度 k_d 的个数 n_1 和 n_3 , 将 n_1 和 n_3 分别与 $k_d/2$ 作积得到初步位移的半网格宽度 $(\Delta x_d, \Delta y_d)$ 为

$$\begin{cases} \Delta x_d = n_1 \times \frac{k_d}{2}, n_1 \leq \frac{\Delta x'}{k_d/2} < n_2 \\ \Delta y_d = n_3 \times \frac{k_d}{2}, n_3 \leq \frac{\Delta y'}{k_d/2} < n_4 \end{cases} \quad (10)$$

通过计算初步位移的网格宽度将匹配最邻近奇异点对间的位移控制在小于 $k_d/2$ 的范围内,在位移前的网状相位奇异点图中任取一奇异点 (x_i, y_i) ,在位移后的网状相位奇异点图中寻找离该点最近的奇异点 (x'_i, y'_i) ,则匹配最邻近奇异点对之间的位移为 $(\Delta x'_d, \Delta y'_d) = (x'_i, y'_i) - (x_i, y_i)$ 。

由初步位移的网格宽度 $(\Delta x_d, \Delta y_d)$ 和匹配最邻近奇异点对间的位移 $(\Delta x'_d, \Delta y'_d)$ 可以得到物体位移的精确值 $\Delta x, \Delta y$ 。

当(10)式中的 n_1 为偶数时 $\Delta x = \Delta x_d + \Delta x'_d$, 当 n_1 为奇数时, $\Delta x = \Delta x_d + \frac{k_d}{2} - \Delta x'_d$; 当(10)式中的 n_3 为偶数时 $\Delta y = \Delta y_d + \Delta y'_d$, 当 n_3 为奇数时 $\Delta y = \Delta y_d + \frac{k_d}{2} - \Delta y'_d$ 。

该测量方法在初步测量时无需进行大量重复的搜索,在精度测量时只对最邻近的点进行搜索,极大地提高了奇异点的匹配效率,位移前后的网状相位奇异点图中的奇异点数基本相等,能使奇异点实现有效的配对,测量结果的精度高。

4 仿真模拟

使用计算机来完成仿真实验,计算机内存 2.0 G,主频为 2.94 GHz,32 位 Win7 操作系统,仿真软件为 MatlabR2012a。根据参考文献[17]中的方法仿真位移前后的散斑图,图像的大小为 512 pixel×512 pixel,散斑点数为 500,散斑点的半径分别为 $s=4$ pixel。

在生成网状相位奇异点图时,需要分别设置参数 a, k_0 和 ε ,不同的参数值对网格的大小和形状有影响,通过对散斑图进行多次参数设置,分析并统计参数 a, k_0 和 ε 与网格图的关系,如表 1 所示。

表 1 参数 a, k_0 和 ε 与网格图的关系

Table 1 Relationship between parameters a, k_0, ε and grid image

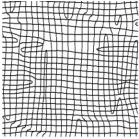
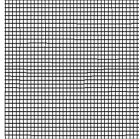
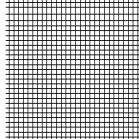
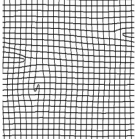
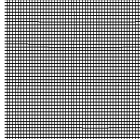
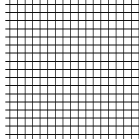
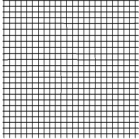
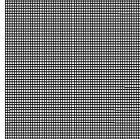
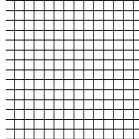
| a | k_0 | ε | Mesh figure | a | k_0 | ε | Mesh figure | a | k_0 | ε | Mesh figure |
|-----|-------|---------------|---|-----|-------|---------------|---|-----|-------|---------------|---|
| 10 | 6 | 1 |  | 10 | 9 | 6 |  | 20 | 15 | 6 |  |
| 10 | 6 | 3 |  | 10 | 12 | 6 |  | 30 | 15 | 6 |  |
| 10 | 6 | 6 |  | 10 | 15 | 6 |  | 40 | 15 | 6 |  |

表 1 中参数值与网格图的关系表明: ε 对网格的形状有影响,随着 ε 增大网格变得越规则,越接近正方形; k_0 和 a 对网格的大小有影响, k_0 越大网格越小, a 越大网格越大。对散斑点半径不同、散斑点数不同的散斑图进行研究分析,也有此结论,该结论对散斑图具有普遍适用性。

根据以上研究结论,以下仿真模拟位移实验时,设置的参数为 $a=30, k_0=12, \varepsilon=6$,计算位移过程中参数值保持不变。在某一次位移中,对原图像沿 x 轴向右移动 14 pixel,沿 y 轴向上平移 4 pixel,得到位移后的图像,采用本文提出的二维方向小波构造相位奇异点(TDWPS)对奇异点进行匹配,且与文献[8]数字散斑相关法

与相位涡旋相结合(DSCPV)的方法进行对比。在 512 pixel×512 pixel 的散斑图中截取 100 pixel×100 pixel, 其对比结果如图 4 所示, 在图中 ● 表示奇异点, ○ 表示位移前奇异点的位置, ■ 表示位移后奇异点的位置, 其中图 4(a)表示采用 TDWPS 法得到的位移前的网格图和奇异点位置, 图 4 (b)表示采用 TDWPS 法得到的位移前后的匹配奇异点对, 图 4 (c)表示采用 DSCPV 法得到的位移前的奇异点位置, 图 4 (d)表示采用 DSCPV 法得到的相关系数大于 0.5000 的匹配奇异点对。

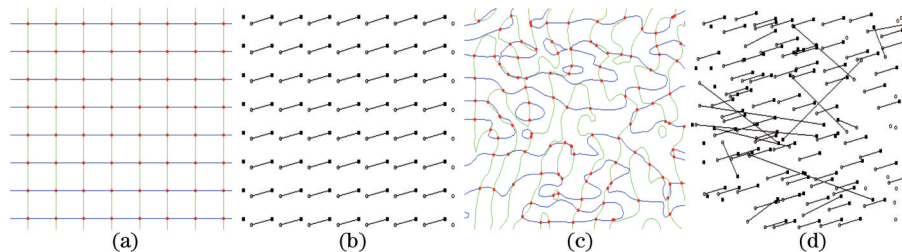


图 4 (a) TDWPS 的网格图及奇异点位置; (b) TDWPS 的匹配奇异点对; (c) DSCPV 的奇异点位置; (d) DSCPV 的相关系数大于 0.5000 的匹配奇异点对

Fig.4 (a) Grid image and position of phase singularities in TDWPS; (b) matching singular points in TDWPS; (c) position of phase singularities in DSCPV; (d) matching singular points of the correlation coefficient greater than 0.5000 in DSCPV

从图中可以看出 TDWPS 法得到的奇异点分布规律, 位移过程中消失的奇异点数和新生成的奇异点基本相同, 凡是匹配的奇异点对, 均实现了正确匹配, DSCPV 法得到的奇异点分布不规则, 位移前后的奇异点数差距很大, 奇异点对匹配时出现很多错误匹配。

为了保证仿真测量位移的精确性, 仿真过程中对同一散斑图分别进行 2 次平移, 每次平移进行 10 次测量, 并计算不同方向位移的平均值和标准差, 计算公式如下:

$$(\Delta\bar{x}, \Delta\bar{y}) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x'_i - x_i), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i) \right], \quad (11)$$

$$(\sigma_x, \sigma_y) = \left[\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta\bar{x})^2}, \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i - \Delta\bar{y})^2} \right], \quad (12)$$

式中 (x_i, y_i) 表示位移前的网状相位奇异点图中的任取一奇异点, x'_i, y'_i 表示位移后的与 (x_i, y_i) 相匹配的奇异点, n 表示正确匹配的奇异点数, $\Delta\bar{x}, \Delta\bar{y}$ 表示 x 和 y 方向的平均位移, (σ_x, σ_y) 表示不同方向位移的标准差。为了进一步分析本文算法抗噪性, 需要在无噪声和不同均方值的高斯噪声条件下进行研究, 表 2 为不同噪声条件下的实验数据, 表中研究的变量有噪声(Noise)、位移(DIS)、网格宽或搜索窗口(WG or SW)、位移半网格数(NDHM)、奇异点数(Singularities)、正确匹配点数(CMP)、正确匹配率(CMR)、平均值(Mean)、标准差(STD)。

表 2 中的数据表明: 与 DSCPV 算法相比, 本算法对噪声不敏感, 在不同噪声条件下, 生成的网状奇异点图的网格宽度变化较小, 初步位移确定的半网格个数几乎不变, 奇异点数不会因噪声发生较大变化, 正确匹配的奇异点保持在 90% 以上, 不同方向的位移平均值非常接近真实值, 并且每次测量的位移偏离平均值的程度很小。由此可知, 该方法具有对噪声不敏感, 测量精度高等优点。

5 激光鼠标定位实验分析

激光鼠标的工作原理是采集鼠标照射粗糙平面的位移前后的图像, 通过图像的变化对鼠标的位移做出判断^[18]。根据鼠标内的激光器照射到粗糙平面上可以形成散斑场, 于是设计实验装置, 采集鼠标位移前后投射的散斑图并将其传输到计算机, 然后采用本文提出的方法计算散斑图的位移, 从而得到鼠标位移和方向。

实验装置如图 5 所示, 主要的设备是 He-Ne 激光器、电控微位移平台和高分辨率的 CCD 相机。He-Ne 激光器的波长为 632.8 nm, 功率为 1 mW, 光束宽为 0.3 mm, 电控微位移平台是 ETS-R-2 系列的二维整体高精度位移平台, CCD 相机的分辨率为 1392 pixel×1040 pixel。He-Ne 激光器发出的激光经过分光镜照射到放置在电控微位移平台上的薄铝板, 在其粗糙表面形成高质量的散斑场, 用 CCD 相机获取电控微位移平台上的散斑图, 通过计算机处理采集到的图像。

表2 不同噪声条件下的实验数据

Table 2 Experimental data under different noises

| Method | Noise | DIS /pixel | WG or SW /pixel | NDHM (n_1, n_2) | Singularities | CMP | CMR | Mean $\Delta x, \Delta y$ /pixel | STD σ_x, σ_y /pixel |
|--------|-------|---------------|--------------------|------------------------|---------------|------|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| TDWPS | 0 | (14,4) | 16.2499 | (1,0) | 1681 | 1599 | 0.9512 | (14.0018, 3.9986) | (0.0124, 0.0116) |
| | | (-12, 9) | 16.2499 | (1,1) | 1681 | 1520 | 0.9042 | (-11.9964, 9.0024) | (0.0257, 0.0152) |
| | 0.005 | (14,4) | 16.2502 | (1,0) | 1640 | 1558 | 0.9500 | (13.9980, 3.9984) | (0.0132, 0.0122) |
| | | (-12, 9) | 16.2502 | (1,1) | 1640 | 1517 | 0.9250 | (-12.0025, 9.0042) | (0.0154, 0.0273) |
| | 0.010 | (14,4) | 16.2487 | (1,0) | 1722 | 1596 | 0.9268 | (13.9958, 4.0065) | (0.0216, 0.0227) |
| | | (-12, 9) | 16.2487 | (1,1) | 1722 | 1555 | 0.9030 | (-12.0068, 8.9912) | (0.0236, 0.0324) |
| DSCPV | 0 | (14,4) | 31×31 | ----- | 2425 | 1927 | 0.7946 | (14.0196, 4.0112) | (0.1204, 0.0672) |
| | | (-12, 9) | 31×31 | ----- | 2517 | 2104 | 0.8359 | (-12.0053, 9.0098) | (0.0396, 0.1025) |
| | 0.005 | (14,4) | 31×31 | ----- | 2583 | 1964 | 0.7604 | (14.0172, 3.9866) | (0.1154, 0.1038) |
| | | (-12, 9) | 31×31 | ----- | 2674 | 2072 | 0.7749 | (-11.9875, 9.0106) | (0.0982, 0.1143) |
| | 0.010 | (14,4) | 31×31 | ----- | 2702 | 1879 | 0.6955 | (13.9784, 4.0075) | (0.1586, 0.0831) |
| | | (-12, 9) | 31×31 | ----- | 2836 | 1948 | 0.6874 | (-11.9799, 8.9851) | (0.2435, 0.1613) |

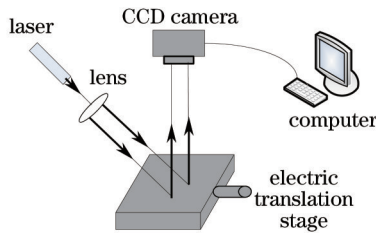


图5 实验装置

Fig.5 Experimental device

实验中 CCD 相机采集图像的大小为 700 pixel×500 pixel, 设置参数为 $a=40, k_0=9, \varepsilon=6$, 控制电动微位移平台上的薄铝板沿 $y=x^2$ 的轨迹移动, 在 $x < 10$ pixel 的范围内进行研究。 $(\Delta x, \Delta y)$ 为鼠标的实际位移, $(\Delta x', \Delta y')$ 为鼠标的测量位移, $\varepsilon_x, \varepsilon_y = (\Delta x', \Delta y') - (\Delta x, \Delta y)$ 为实际位移和测量位移间的误差, $\delta = \arctan(\Delta y / \Delta x)$ 为实际位移的方向, $\delta' = \arctan(\Delta y' / \Delta x')$ 为测量的位移方向, $\varepsilon_\theta = \delta' - \delta$ 为实际位移方向和测量位移方向之间的误差, 表 3 为鼠标位移和方向的实验数据。

表 3 中的数据表明: 鼠标位移的实际值和测量值之间的误差均小于 0.5 pixel, 鼠标位移方向的实际值和测量值之间的误差小于 1°。图 6 中的曲线表明测量得到鼠标的运动轨迹与实际运动轨迹重合, 测量所得运动方向与实际运动方向一致。因此, 本方法能够精确定位激光鼠标的位移和方向。

表 3 鼠标位移和方向的实验数据

Table 3 Experimental data of mouse displacement and direction

| $(\Delta x, \Delta y)$ | $(\Delta x', \Delta y')$ | $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$ | $\delta / (^\circ)$ | $\delta' / (^\circ)$ | $\varepsilon_\theta / (^\circ)$ |
|------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|
| (1,1) | (1.0014,1.0157) | (0.0014,0.0157) | 45 | 45.4061 | 0.4061 |
| (2,4) | (1.9865,4.0236) | (-0.0035,0.0236) | 63.4349 | 63.7239 | 0.2890 |
| (3,9) | (3.0040,8.9942) | (0.0040,-0.0058) | 71.5651 | 71.5310 | -0.0341 |
| (4,16) | (3.9827,16.0538) | (-0.0173,0.0538) | 75.9638 | 76.0671 | 0.1033 |
| (5,25) | (4.9800,24.9985) | (0.0200,-0.0015) | 78.6901 | 78.7735 | 0.0834 |
| (6,36) | (6.0112,35.8944) | (0.0112,-0.1056) | 80.5377 | 80.4929 | -0.0448 |
| (7,49) | (6.9656,49.0112) | (0.0346,0.0112) | 81.8699 | 81.9111 | 0.0412 |
| (8,64) | (7.8842,64.0284) | (-0.1158,0.0284) | 82.8750 | 82.9801 | 0.1051 |
| (9,81) | (8.9886,81.0220) | (-0.0114,0.0220) | 83.6598 | 83.6695 | 0.0097 |

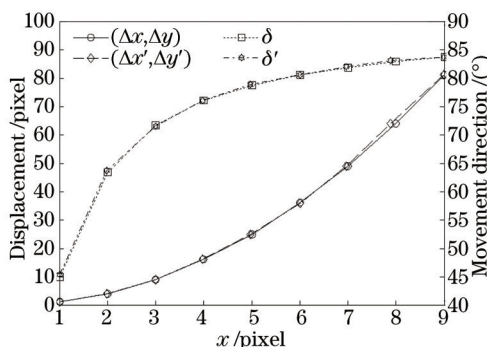


图 6 鼠标运动轨迹与实际轨迹

Fig.6 Mouse trajectory and actual trajectory

6 结 论

采用二维方向小波构造了新型的散斑相位奇异点图,通过两步测量的新方法测量面内微位移测量,通过仿真模拟实验分析不同噪声下该方法的稳定性,并将其应用到激光鼠标定位实验中,对比发现测量运动轨迹和实际轨迹具有高度一致性。该方法具有奇异点正确匹配率高、测量精度高、对噪声不敏感、稳定性好等优点,能够精确定位激光鼠标的位移和方向。开拓了一条生产相位奇异点的新途径,并为测量面内微位移提供了一种新方法,在实际位移测量等领域中有很好的实用价值,为了提升研究的全面性,后期将进一步对本方法与被测物体材质表面的粗糙度间的关系做分析研究。

参 考 文 献

- Zhu Meng, Huang Zhanhua, Wang Xiaojun, *et al.*. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 844-849.
朱 猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 844-849.
- Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong, *et al.*. Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808002.
李建欣,崔艳军,朱日宏,等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808002.
- Bing Pan, Kemao Qian, Huimin Xie, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Meas Sci Technol, 2009, 20(6): 1-17.
- Mudassar A A, Butt S. Improved digital image correlation for in-plane displacement measurement[J]. Appl Opt, 2014, 53(5): 960-970.
- J Huang, X Pan, X Peng, *et al.*. Digital image correlation with self-adaptive Gaussian windows[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(3): 505-512.
- Yu Zhijing, Tao Hongwei. Investigation of the optimal light condition on digital image correlation method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101201.
于之靖,陶洪伟. 数字散斑相关技术最优光照条件研究[J]. 激光与光电子进展, 2014, 51(10): 101201.

- 7 Liang Zhenning, Yin Bo, Wang Shigang. Study on effect of subset size on digital image correlation with a new method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1212005.
梁振宁, 印 波, 王石刚. 研究子窗口对数字散斑相关计算影响的新方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212005.
- 8 Yuan Yuan, Jianyong Huang, Xiaoling Peng, *et al.*. Accurate displacement measurement via a self-adaptive digital image correlation method based on a weighted ZNSSD criterion[J]. *Opt & Lasers in Eng.*, 2014, 52: 75-85.
- 9 Wei Wang, Tomoaki Yokozeki, Reika Ishijima, *et al.*. Optical vortex metrology based on the core structures of phase singularities in laguerre-gauss transform of a speckle pattern[J]. *Opt Express*, 2006, 14(22): 10195-10206.
- 10 Lü Fangjie, Jin Weihua, Li Xinzhong, *et al.*. Micro in-plane displacement measurement using digital speckle correlation method based on phase vortices[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(11): 2180-2185.
吕芳捷, 金伟华, 李新忠, 等. 面内微位移测量的散斑相位涡旋相关方法研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(11): 2180-2185.
- 11 Ana Laura Vадnjаl, Pablo Etchepareborda, Alejandro Federico, *et al.*. Measurement of in-plane displacements using the phase singularities generated by directional wavelet transforms of speckle pattern images[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(9): 1805-1813.
- 12 Wu Yiquan, Ye Zhilong, Wan Hong. Speckle noise suppression of reconstructed image based on dual-tree complex wavelet and anisotropic diffusion[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0409002.
吴一全, 叶志龙, 万 红. 双树复小波和各向异性扩散再现像散斑噪声抑制[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0409002.
- 13 J P. Antoinea, R Murenzib. Two-dimensional directional wavelets and the scale-angle representation[J]. *Signal Processing*, 1996, 52(3): 259-281.
- 14 Alejandro Federico, Guillermo H Kaufmann. Phase retrieval of singular scalar light fields using a two-dimensional directional wavelet transform and a spatial carrier[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(28): 5201-5207.
- 15 Yang Yuhang, Chen Yu, Li He, *et al.*. In-plane micro-displacement measurement based on digital speckle correlation method in frequency domain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1301-1305.
杨宇航, 陈 宇, 李 鹤, 等. 基于频域数字散斑相关方法的面内微位移测量[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1301-1305.
- 16 Yuan Dan, Liu Yi, Hu Yuming. Improvement of two-dimensional displacement measurement based on fast Fourier transform[J]. *Physics Experimentation*, 2013, 33(4): 37-40.
袁 丹, 刘 艺, 胡宇明. 基于快速傅里叶变换的二维位移测量的改进[J]. *物理实验*, 2013, 33(4): 37-40.
- 17 P Zhou, K E Goodson. Subpixel Displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Opt Eng.* 2001, 40(8): 1613-1620.
- 18 Yan Haitao, Wang Ming. Orientation of mouse using digital speckle correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 467-471.
闫海涛, 王 鸣. 数字散斑相关方法实现鼠标定位原理[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 467-471.

栏目编辑: 何卓铭