

## 基于灰度插值的条纹图像位移亚像素检测算法

李舒航<sup>1\*\*</sup>, 高旭<sup>1\*</sup>, 刘兆武<sup>2</sup>, 胡文浩<sup>1</sup><sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 基于光栅干涉条纹的位移测量系统,提出了一种基于灰度插值的条纹图像位移检测算法即灰度极值法。首先,对光学位移测量系统进行了介绍;其次,阐述了灰度极值算法的原理。为了验证算法,对光学系统条纹图像进行了软件仿真,并对其进行了亚像素级定位算法仿真,对比分析了传统图像相关法与光流法,得到了相对误差曲线,所提算法的精度为 1.797 pixel。最后,搭建了光栅干涉式位移测量光学系统,采集移动条纹数据并利用灰度极值算法进行了解调,实现了亚像素级位移解调,大量程下实验精度达到 1.093 pixel。实验结果表明:灰度极值算法在大量程下的测量精度最高,可对位移量进行亚像素级定位,且算法具有计算时间短、受噪声影响小、鲁棒性强的特点。所提方法也可适用于自相干莫尔条纹系统、光电轴角编码器等其他位移测量系统的图像式位移信号解调。

**关键词** 测量; 灰度插值; 条纹图像; 位移; 精密测量

中图分类号 TP23 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1012002

### Algorithm for Sub-Pixel Detection of Fringe Image Displacement Based on Gray-Level Interpolation

Li Shuhang<sup>1\*\*</sup>, Gao Xu<sup>1\*</sup>, Liu Zhaowu<sup>2</sup>, Hu Wenhao<sup>1</sup><sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Based on the displacement measurement system of grating interference fringes, this paper proposed a fringe image displacement detection algorithm based on gray interpolation, i. e. grayscale extreme value algorithm. First, the optical displacement measurement system is introduced. Then, the principle of grayscale extreme value algorithm is explained. In order to verify this algorithm, the fringe image of the optical system was simulated and the algorithm simulation was used to locate the image at sub-pixel level. The traditional image correlation method and the optical flow method were compared and analyzed, and the relative error curve was obtained. The proposed algorithm accuracy is 1.797 pixel. Finally, a grating interferometric optical system was built, and the moving stripe data were collected and demodulated using the grayscale extreme value algorithm to realize sub-pixel level displacement demodulation with an experimental accuracy of 1.093 pixel under a large range. The experimental results show that the grayscale extreme value algorithm possesses a high measurement accuracy in a large range and can be used to realize sub-pixel level positioning. Moreover, it possesses the characteristics of short calculation time, little influence of noise, and strong robustness. The proposed method is also suitable for image-based displacement signal demodulation of other systems, such as self-coherent moire fringe system and photoelectric shaft encoder.

**Key words** measurement; gray interpolation; fringe image; displacement; precision measurement

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-25; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51505078)、中国博士后科学基金(2018M641778)、吉林省科技厅优秀青年人才基金(20180520187JH)、吉林省教育厅“十三五”科学技术基金(JJKH20190544KJ)

\* E-mail: gaox19870513@163.com; \*\* E-mail: kelly\_lee1215@163.com

## 1 引言

在信息化时代,高精度的测量是高端设备制造的关键。随着测量技术的发展,光栅作为实现高精度、大量程、高分辨率位移测量的手段之一,已被逐渐应用于精密仪器、超精加工等领域。目前,垄断高端光刻机市场的 ASML、NIKON 等厂商均采用光栅测量技术来代替激光干涉测量,这就需要光栅测量系统所产生的条纹信息进行解调<sup>[1-6]</sup>。传统的条纹解调采用光电检测法,通过光电检测元件将条纹的变化转变为电信号的变化,通过对电信号的处理,完成干涉条纹的自动计数和显示。但光电检测法有移相测量的需求,光路部分添加了光学镜组和光电转换电路,这将会产生噪声,影响测量精度。同时,基于准正弦波的光电信号模型所包含的信息量少,不利于进一步提高位移测量的性能指标<sup>[7]</sup>。随着机器视觉技术的飞速发展,图像式位移测量系统逐步替代传统电学系统。与传统式电信号位移测量技术相比,图像式位移测量系统的信号包含更多特征点信息,具有分辨力高、体积小、重量轻的优势,并且在信号的处理上更为直观。随着图像式位移测量系统的推广,图像解调方法也逐步得到广泛研究<sup>[8-9]</sup>。

图像位移的解调是计算机视觉、图像处理以及模式识别的重要研究内容,针对不同的应用范围并根据不同的基础原理,研究者已提出多种图像位移解调方法。陈信华等<sup>[10]</sup>基于特征点的检测与匹配,研究了 SIFT 算法特征点的提取。吴萍萍等<sup>[11]</sup>根据模板匹配的原理,提出了一维灰度投影模板匹配算法。Lucas 等<sup>[12]</sup>通过光流场的计算,提出了 Lucas-Kanade(L-K)光流算法。Yamaguchi 等<sup>[13]</sup>根据图像匹配原理,提出了数字图像相关方法,又称数字散斑相关法。研究者还基于插值理论提出了灰度插值法<sup>[14-16]</sup>等。基于特征点匹配的方法可处理遥感图像和无人机图像等,但在其他领域受到了测量范围、噪声、计算时长等因素的制约。而传统灰度插值法是对灰度图片进行邻域插值计算,然后在插值后的图像中进行像素搜索,以获取目标的最佳匹配点。该方法主要用于图像的边缘检测,适用于大部分灰度图像,但大量的邻域插值和匹配计算增加了时间成本,且其对噪声敏感<sup>[17-19]</sup>。

本文针对灰度条纹图像,根据其特有的周期性

和灰度连续性,提出了灰度极值算法,并实现了灰度条纹图像的亚像素级定位与位移解调。首先,对光栅干涉式位移测量光学系统的成像模型进行了仿真,验证了算法的可行性并分析了测量范围;然后,与典型的光流法和数字相关算法进行了对比,并对测量精度、抗干扰性和计算时间等进行了对比分析;最后,搭建了实际的位移测量系统,对算法进行了验证。结果表明:灰度极值算法可以对条纹图像式位移量进行有效解调。

## 2 光学系统的测量原理

光栅测量系统以波长为基准,对被检测对象进行测量,具有精度高、抗干扰性强的优点。利用衍射干涉原理将微小位移放大,通过条纹的移动表征被测测量信息,可实现光学系统的细分效果。本文基于光栅干涉光叠加原理,搭建了精密位移测量系统,如图 1 所示。

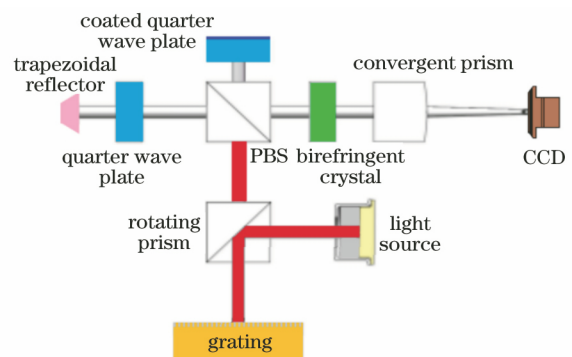


图 1 位移测量系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of displacement measurement system

光源发出单色激光,光束通过折转棱镜垂直射出至光栅,选取 $\pm 1$ 级衍射光束,再次利用折转棱镜,使光束垂直射入偏振分光棱镜(PBS)。以 $+1$ 级衍射光的反射光分量为例,反射光通过 $1/4$ 波片后,经过梯形回射器与 $-1$ 级衍射光反射分量重合,再次利用 $1/4$ 波片改变光束偏振态,光束透过偏振分光棱镜进入双折射晶体。同理, $-1$ 级衍射光的透射光与反射光也经过双折射晶体。双折射晶体元件将重合的具有不同偏振态的两束光分离,光束经过会聚棱镜后在电荷耦合器件(CCD)像面重合,形成两组干涉条纹,两组条纹进一步叠加形成虚拟叠栅条纹。

根据衍射干涉原理及光栅方程,可得到虚拟叠栅条纹信号为

$$I' = 4I \cos[4q\pi x(D_1 - D_2)/D_1D_2], \quad (1)$$

式中:  $I$  是衍射光光强;  $D_1$ 、 $D_2$  分别是光栅移动前后的干涉条纹周期;  $q$  是衍射级次;  $x$  是光栅位移。虚拟叠栅条纹信号表现为三角函数形式, 其仿真图像如图 2 所示。通过解调条纹图像信息, 可实现位移的精密测量。

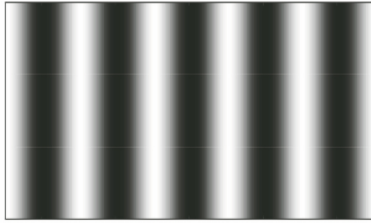


图 2 虚拟叠栅条纹仿真图像

Fig. 2 Simulated image of virtual moire fringe

### 3 灰度极值算法介绍

#### 3.1 算法原理

当 CCD 接收到的条纹图像以数字的形式存储于计算机中时, 图像的最小单位为像素(pixel)。为了最大限度地提高检测精度, 本文针对条纹图像位移的解调问题, 根据条纹的周期性及灰度连续且不变性, 提出了灰度极值算法。以图像灰度信息作为对象, 对图像进行插值细分, 寻找极值点, 即可快速得到目标图像的亚像素定位信息, 其算法整体流程图如图 3 所示。

首先, 对干涉条纹图像进行有效区域选取, 截取条纹清晰部分的图像进行研究。其次, 进行灰度化、滤波去噪的初始处理, 得到清晰待解调的原始图像。然后提取像素点  $k$  的位置及灰度信息即  $(x_k, y_k, z_k)$ , 其中  $x_k, y_k$  为条纹图像像素点坐标,  $z_k$  为像素点灰度值。为了实现亚像素级别测量, 通过插值操作将离散的数字图像进行灰度重构, 原来的灰度条纹图像变为近似连续的亚像素图像。经典图像插值是对像素矩阵  $F(x_k, y_k)$  进行乘积运算, 得到更加连续的图像  $F(x'_k, y'_k)$ 。该乘积运算可表示为

$$F(x'_k, y'_k) = \sum_{ij} F(x_k, y_k) \cdot N_{ij}(x_k, y_k), \quad (2)$$

式中:  $N_{ij}(x_k, y_k)$  为插值函数;  $i=1, 2, \dots, m$  和  $j=1, 2, \dots, n$  分别为图像的行编号和列编号, 其中  $m$  和  $n$  分别为图像的总行数与总列数。为了减少计算量、节约计算时间, 需用较少的点表征整个曲线的变化趋势。由于条纹图像的周期性特点及求解条纹图像位移的目的, 无需考虑纵向插值。因此本文选用三次样条函数作为插值函数:

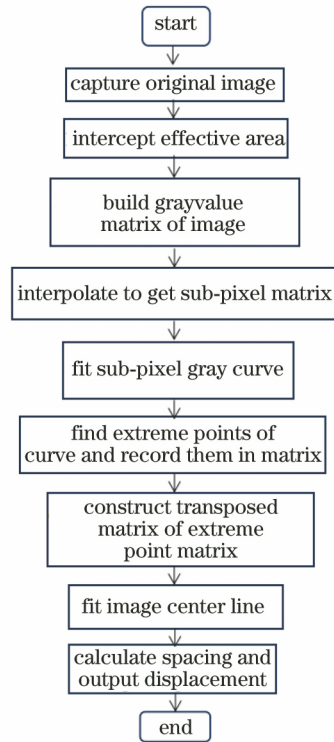


图 3 灰度极值法的流程图

Fig. 3 Flow chart of grayscale extreme value algorithm

$$S_l(x) = M_l \frac{(x_{l+1} - x)^3}{6h_{l+1}} + M_{l+1} \frac{(x - x_l)^3}{6h_{l+1}} + \left(z_l - \frac{M_l h_{l+1}^2}{6}\right) \frac{x_{l+1} - x}{h_{l+1}} + \left(z_{l+1} - \frac{M_{l+1} h_{l+1}^2}{6}\right) \frac{x_{l+1} - x_l}{h_{l+1}}, \quad (3)$$

式中:  $h_{l+1} = x_{l+1} - x_l$ ;  $M_l (l=0 \sim n)$  满足

$$\begin{bmatrix} 2 & \alpha_0 & 0 \\ \beta_1 & 2 & \alpha_1 \\ 0 & \beta_2 & 2 \\ & & \ddots \\ & & & 2 & \alpha_{n-2} & 0 \\ & & & \beta_{n-1} & 2 & \alpha_{n-1} \\ & & & 0 & \beta_n & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n-2} \\ d_{n-1} \\ d_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha_l = \frac{h_{l+1}}{h_{l+1} + h_l}$ ;  $\beta_l = 1 - \alpha_l = \frac{h_l}{h_{l+1} + h_l}$ ;  $d_l =$

$$\frac{6}{h_{l+1}+h_l} \left( \frac{z_{l+1}-z_l}{h_{l+1}} - \frac{z_l-z_{l-1}}{h_l} \right)。$$

插值后得到图像的亚像素灰度矩阵。根据亚像素灰度信息拟合图像的灰度变化曲线,计算曲线极值点并将信息记录于新的矩阵中,即亚像素灰度极值矩阵。矩阵中离散点的坐标即为各条纹中心线的亚像素坐标。在实际实验中,干涉条纹图像往往有多条灰度条纹且条纹存在一定的倾角,在计算条纹位移量时需针对每一条条纹进行图像间的对比并计算位移。为了减少计算时间,实现条纹信息的最大化利用,并补充非最优拟合阶数造成的图像定位精度误差,进一步采用改进的最小二乘算法,针对灰度插值后产生的亚像素灰度坐标信息,设计拟合图像定位中心线。

首先将亚像素坐标的横纵坐标互换:

$$\begin{cases} X_{ij} = y_{ij} \\ Y_{ij} = x_{ij} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $(x_{ij}, y_{ij})$  为原坐标;  $(X_{ij}, Y_{ij})$  为转换后坐标。

然后运用最小二乘法拟合曲线得到条纹的中心线方程,即

$$X\beta = Y, \quad (6)$$

式中:  $\beta$  的表达式为

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (7)$$

式中:  $X$  的矩阵元为  $X_{ij}$ ;  $Y$  的矩阵元为  $Y_{ij}$ 。

综上,拟合后的直线可表征整幅条纹图像的最终位置信息,通过计算连续两帧图像的定位中心线位移即可得到条纹图像的位移量。

### 3.2 算法仿真

#### 3.2.1 算法性能的仿真

为了验证算法对条纹灰度图像的认识性能,利用 Zemax 软件仿真干涉条纹信号。设置光源为矩形光源,两光栅刻线密度分别为 830 line/mm 和 828 line/mm,光源波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。为了得到清晰的干涉条纹,过滤 0 级衍射光,选取 -1 级和 +1 级衍射光进行计算仿真,设置 -1、0、1 级衍射光的能量占比分别为 50%、0、50%,得到干涉条纹图像。由角谱理论可知,当衍射级次为  $(+1, 0)$  和  $(0, +1)$  的衍射光发生干涉时,条纹在  $\gamma$  方向上的光强分布呈余弦函数分布:

$$I = |a_1 b_0|^2 + |a_0 b_1|^2 + 2 |a_1 b_0 a_0 b_1| \cdot \cos[2\pi(f_1 - f_2)\gamma + 2\pi f_1 \Delta\gamma + \varphi_{+1,0} - \varphi_{0,+1}], \quad (8)$$

式中:  $f_1, f_2$  为两光栅的刻线密度;  $\gamma$  为光强变化方向上的空间位置;  $a_0, a_1, b_0, b_1$  分别为两束衍射光在两光栅上产生的衍射光幅值;  $\Delta\gamma$  为光栅沿  $\gamma$  方向的相对位移;  $\varphi_{+1,0}, \varphi_{0,+1}$  分别为两束衍射光的相位。截取明亮程度不同的两条干涉条纹,如图 4(a) 所示。利用 Matlab 软件构造像素级灰度矩阵  $A(x_i, y_i)$ ,将图像各像素单位的灰度值作为  $z$  轴信息,构造的灰度三维模型如图 4(b) 所示,其中  $X, Y$  分别为条纹图像中像素对应的横、纵坐标,  $Z$  为像素对应的灰度值。以图象第一行为例,对像素级灰度矩阵  $A(x_i, y_i)$  进行插值计算,将插值结果拟合为曲线  $f(x, y)$ ,如图 4(c) 所示,其中  $x'$  为光栅位移。对比

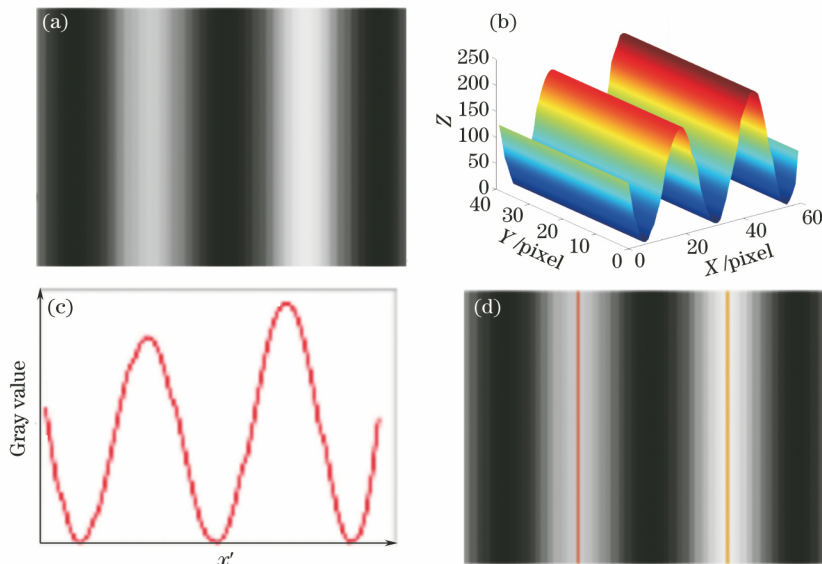


图 4 仿真实验。(a)干涉条纹;(b)灰度三维模型;(c)灰度插值拟合曲线;(d)亮条纹亚像素中心线

Fig. 4 Simulation experiment. (a) Interference fringe; (b) gray three-dimensional model; (c) gray interpolation fitting curve; (d) bright fringe sub-pixel center line

图4(a)可见,插值结果符合图像灰度分布规律。最后寻找插值极值点并拟合条纹中心线,将其显示在原条纹图像中,如图4(d)所示。拟合直线位置为  $x_1 = 18.245 \text{ pixel}$ ,  $x_2 = 41.510 \text{ pixel}$ , 实现了条纹的亚像素级定位。

### 3.2.2 算法性能的对比

为了验证算法对灰度条纹图像亚像素位移的解调能力,改变三角函数的相位差,使条纹图像发生位移,利用算法计算条纹位移,对比真实值与计算值,验证算法的有效性。

由仿真条纹结果可知,两相邻亮条纹间的距离为  $68 \text{ pixel}$ ,取  $\pi/50$  为相位步长,相位每增加  $\pi/50$  采集一次图像,则相邻两图像的相位差为  $\pi/50$ 。在  $[0, 2\pi]$  相位范围内,以  $\pi/50$  为相位步长取 100 幅条纹图像,用于算法亚像素位移解调的验证实验,对应的条纹位移量步长为  $0.68 \text{ pixel}$ 。截取的 28 幅图像如图 5 所示。

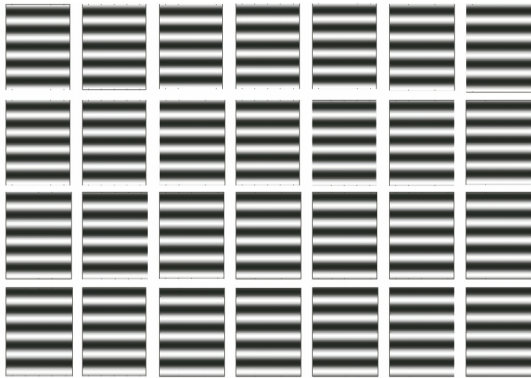


图5 以  $\pi/50$  为相位步长的 28 幅条纹图像

Fig. 5 28 fringe images with phase step of  $\pi/50$

基于连续多幅条纹位移图像,利用灰度极值法解调条纹的移动量。采用相对误差  $E$  表征算法的准确性:

$$E = \frac{x_c - \bar{x}}{\bar{x}}, \quad (9)$$

式中:  $x_c$  为计算值;  $\bar{x}$  为测量值。

选择典型的光流法与图像相关法进行实验对比。其中,图像相关法以整像素为步长进行相关模板的移动与匹配,设条纹图像上任意一个点  $P$  的灰度值为  $P(x_P, y_P)$ , 移动前图像目标点  $P_1$  和移动后图像目标点  $P_2$  的灰度值分别为  $P_1(x_{P_1}, y_{P_1})$ 、 $P_2(x_{P_2}, y_{P_2})$ , 定义  $P_1$  和  $P_2$  的相关系数  $\gamma_{P_1, P_2}$  为

$$\gamma_{P_1, P_2} = \frac{2P_1(x_{P_1}, y_{P_1}) \cdot P_2(x_{P_2}, y_{P_2})}{P_1^2(x_{P_1}, y_{P_1}) + P_2^2(x_{P_2}, y_{P_2})}. \quad (10)$$

由此计算得到一序列的相关系数值,通过取极

值点的对应位置,获得图像运动的位移大小。

光流法是利用图像序列中像素在时间域上的变化以及相邻帧之间的相关性,计算出相邻帧之间物体的运动信息。根据引入的不同约束条件,计算方法可分为基于梯度、匹配、频率、相位等四种。该方法适用于亮度恒定不变的微小位移的测量。其中,基于梯度的 L-K 光流算法较为常用,因此本文选择该方法进行比较。

L-K 光流算法的约束条件是在目标像素邻域  $m_1 \times m_1$  内,每个像素均具有相同的光流矢量。设在  $t$  时刻,条纹图像上任意一点  $P$  处的灰度值为  $I(x_P, y_P, t)$ , 则

$$I(x_P, y_P, t) = a(x_P, y_P, t) + b(x_P, y_P, t) \cos \varphi(x_P, y_P, t), \quad (11)$$

式中:  $a(x_P, y_P, t)$  为背景光强;  $b(x_P, y_P, t)$  为振幅;  $\varphi(x_P, y_P, t)$  为条纹图的相位值。光流基本方程为

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0, \quad (12)$$

式中:  $\Delta \omega$  为位移变化量;  $\Delta z$  为灰度值变化量;  $\Delta t$  为时间变化量。结合 L-K 算法的约束条件,即图像微小移动前后背景光强  $a(x_P, y_P, t)$  与振幅  $b(x_P, y_P, t)$  不变,得到

$$\Delta \varphi(x_P, y_P, t) = -(2\pi f_{ix} u + 2\pi f_{iy} v) \Delta t, \quad (13)$$

式中:  $u = \frac{\Delta x_P}{\Delta t}$ ;  $v = \frac{\Delta y_P}{\Delta t}$ ;  $f_{ix}$  和  $f_{iy}$  是像面上点  $(x_P, y_P, t)$  处  $x$  方向和  $y$  方向的条纹频率;  $\Delta \varphi$  为相位的变化。最后,根据相位的变化,可推导出位移信息。

综上,实验对比了三种算法的位移解调性能,相对误差-相位曲线如图 6 所示。其中,灰度图像三维图如图 6(a)所示。

由图 6(b)可见,灰度极值法的相对误差随着相移的增大而减小,即随着量程的增加,测量精度逐渐升高。利用多项式拟合该算法的相对误差趋势曲线,如图 6(b)中虚线所示,可以看出,相位值越大,相对误差越小,测量越精准。对比分析图 6(c)、(d),可以看到,传统图像相关法的相对误差随着相移量的增大而减小,即随着量程的增加,测量精度逐渐升高,但受算法的限制,图像测量中的最小分辨距离为  $1 \text{ pixel}$ ,无法精确到亚像素级;L-K 光流法的测量相对误差值随着相移量的增大而发生突变性升高,即随着量程的增加,测量精度将出现急剧的下降。由此可知,本文算法更适用于大量程高精度测量系统的条纹图像位移解调。

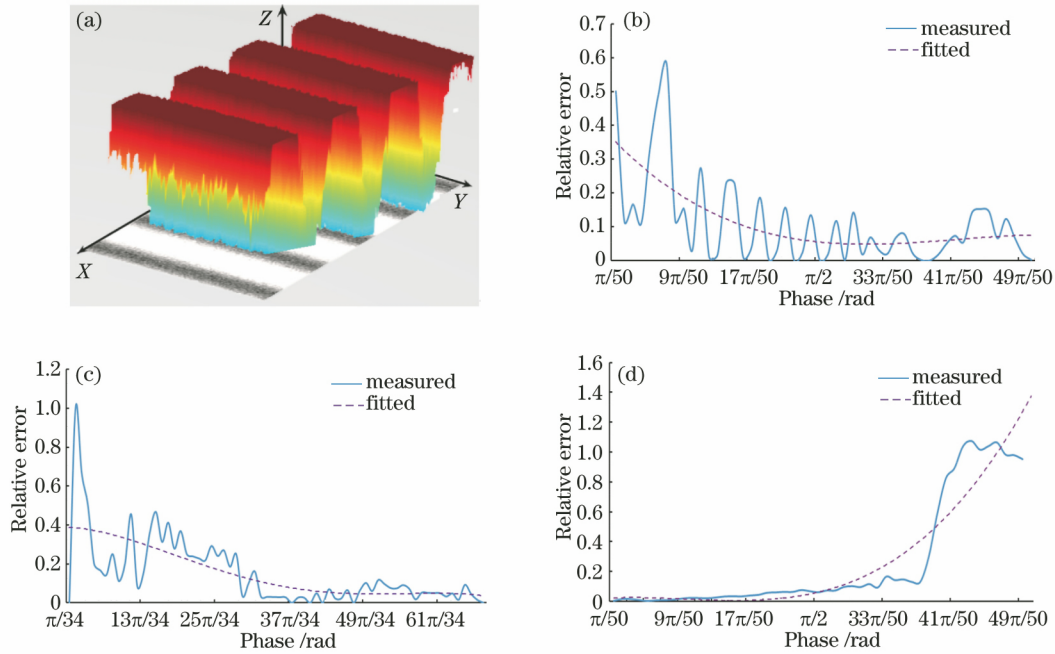


图 6 灰度图像和不同算法的相对误差-相位曲线。(a)灰度图像三维图;(b)灰度极值法;(c)图像相关法;(d) L-K 光流法  
Fig. 6 Grayscale image and relative error versus phase under different algorithms. (a) Three-dimensional grayscale image ; (b) grayscale extreme value method ; (c) image correlation method ; (d) L-K optical flow method

为了对比本文算法和光流法的计算结果与真实值的接近程度,计算两种算法的位移解调精度  $\sigma$  :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i'=1}^N (\Delta x_{i'} - \Delta x_t)^2}, \quad (14)$$

式中:  $\Delta x_{i'}$  为位移量测量值中的第  $i'$  个数据理论值;  $N$  为测量值的数据个数;  $\Delta x_t$  为测量值。在量程  $[0, 2\pi]$  范围内,光流法的测量精度为  $\sigma_1 = 14.049$  pixel,灰度极值法的测量精度为  $\sigma_2 = 1.797$  pixel,即在大量程测量条件下,灰度极值法的测量精度高于光流法。

此外,针对相同图像,利用相同处理器和不同算法进行位移计算,比较不同算法的运算时长。相对计算时长百分比如图 7 所示。结果表明,针对灰度条纹图像的计算,灰度极值算法的相对计算时间最短。

综上所述,灰度极值法可用于大量程高精度条纹图像位移的解调。对比典型图像解调算法可知,灰度极值法与光流法都可进行亚像素级位移解调,但灰度极值法在位移解调量程上优于光流法,并且在算法计算时间上远少于光流算法;本文算法相比于传统图像相关算法,虽两个算法的计算用时相近,但本文算法的测量精度为亚像素级,高于相关算法的像素级测量精度。

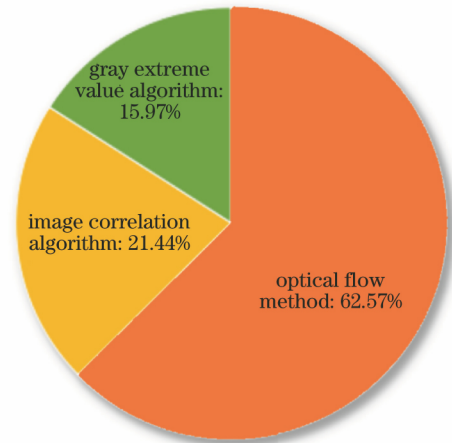


图 7 相对计算时间  
Fig. 7 Relative calculation time

## 4 实验验证

为了进一步验证灰度极值法的位移解调性能,搭建了图 8 所示的干涉位移测量实验装置。系统采用 GH25-12V 反射式全息光栅,光栅刻线密度为 1200 line/mm,对应栅距为 833 nm;采用型号为 MER-500-14U3C 的 CCD 作为探测器,其相机像素物理尺寸为  $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ ,光学尺寸为 1/2.5 inch(1 inch=2.54 cm)。将光栅固定于型号为 XMS210-S 的压电陶瓷(PZT)位移台上,使用氦氖激光器作为光源,进行位移图像信号的采集。

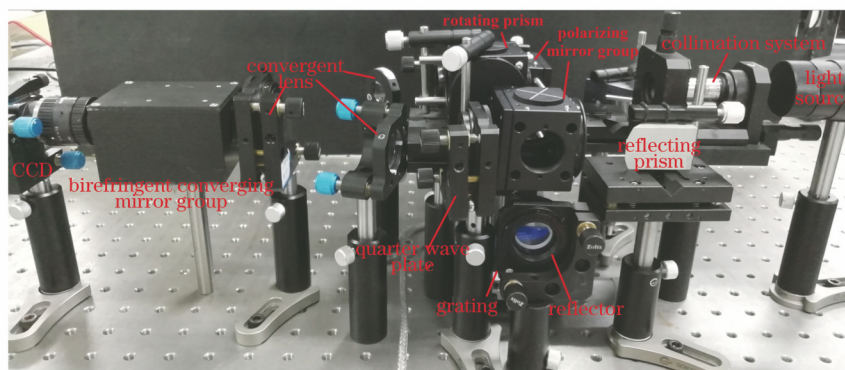


图 8 干涉位移测量实验的装置

Fig. 8 Experimental device for interference displacement measurement

在理论上,光栅每移动 4.165 nm,对应的条纹图像移动 5.71 pixel,实验令位移台以 4.2 nm 的步距运动 10 次,重复实验 10 次并记录数据,获得的步长-位移曲线如图 9(a)所示。绘制了测量位移值与

理论位移值的对比散点图,如图 9(b)所示。绘制了对应的残差图,如图 9(c)所示。最终选择 11~50 frame 图像的测量值,绘制相对误差-位移量针状图,如图 9(d)所示。

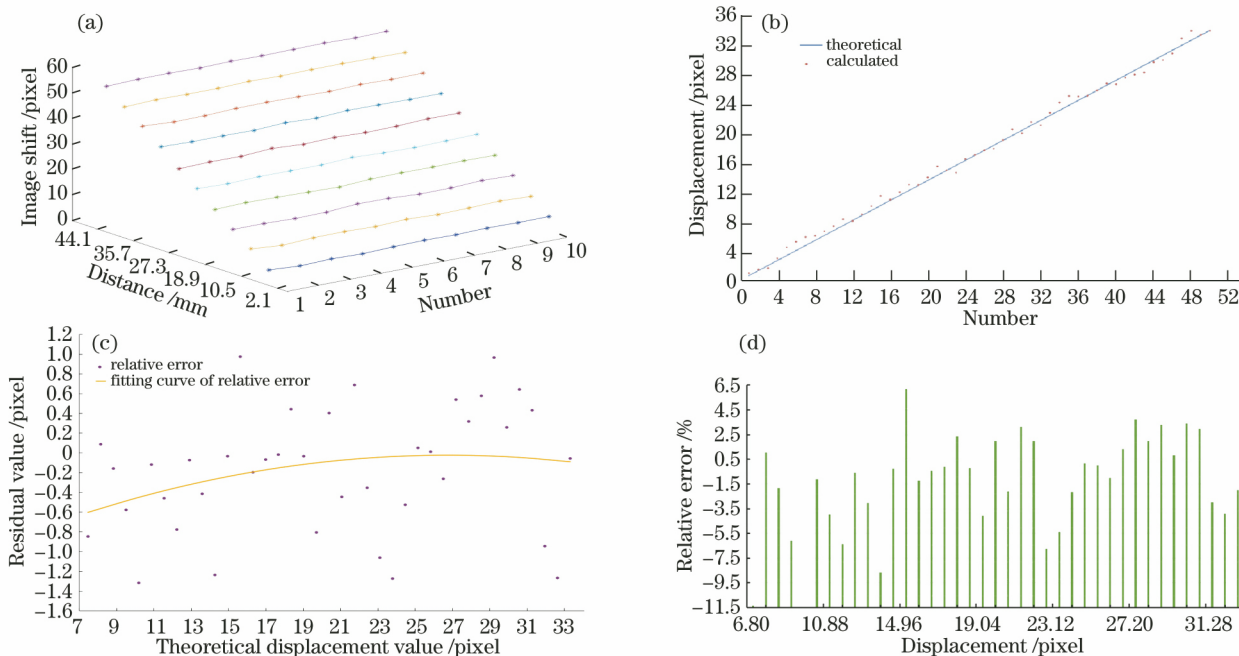


图 9 实验数据图。(a)步长-位移图;(b)测量值散点图;(c)残差图;(d)相对误差-位移量针状图

Fig. 9 Experimental data graphs. (a) Step-displacement graph ; (b) scatter plot of measured values ; (c) residual diagram ; (d) relative error-displacement needle plot

结果显示,本文方法可对条纹位移图像进行亚像素级解调,且位移测量结果接近理论真值,能实现几十纳米范围内的位移解调;计算的位移值散点聚集在理论值直线周围,散点分布靠近直线;残差值点在 0 附近随机波动,变化幅度近似在一条带内。通过进一步拟合残差曲线,得到  $y = -0.0019x^2 + 0.0992x - 0.9822$ ,其中二次项系数-0.0019 近似为零,因此残差曲线可简化为  $y = 0.0992x - 0.9822$ 。再

结合残差图可以看出,随着理论测量距离的增加,残差的波动范围基本保持稳定,残差均匀分布在 0 附近,说明本文提出的灰度极值算法模型的回归性良好。最后,通过相对误差-位移量针状图,得到所提方法在测量范围内的精度为  $\sigma = 1.093$  pixel,去除粗大误差后的平均误差为 0.0624 pixel,对应的像素物理尺寸误差大小为 0.1374  $\mu\text{m}$ 。

以上实验结果表明了本文所提方法的可行性与

有效性。此外,光栅移动过程中的偏摆、镜组的对位偏差、平台的振动等因素会对系统图像产生影响,进而影响位移解调精度。关于以上因素对测量结果的影响,在后续的工作中会进一步研究。

## 5 结 论

提出了用于条纹灰度图像位移解调的灰度极值方法。利用图像灰度信息进行插值细分,寻找灰度极值点以拟合灰度条纹中心线;利用最小二乘法拟合图像位置线,并采集连续位移图像,获得亚像素级位移解调结果。通过仿真干涉条纹,进行了三种典型位移解调算法的对比分析,验证了所提方法的灰度识别性及较高的位移计算精度。在此基础上,搭建了位移测量系统,通过改变光栅的位移量,采用所提方法对提取的图像进行位移解算,进一步验证了所提方法具有较好的一致性和回归性。结果表明:所提方法在较大量程下的精度可达到 1.093 pixel,平均误差为 0.0624 pixel,像素物理尺寸误差大小为 0.1374  $\mu\text{m}$ 。相比传统图像相关法与光流场算法,所提方法提高了大量程范围下的测量精度,且计算时间较短。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Z S, Jiang Z Z, Yang R J, et al. Advances and applications of new test technologies [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(1): 16-19.  
刘正升, 蒋志忠, 杨日杰, 等. 测试领域新技术的发展及应用[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(1): 16-19.
- [2] Gao X, Li S H, Ma Q L, et al. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. Chinese Optics, 2019, 12(4): 741-752.  
高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 741-752.
- [3] Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. Review of ultra-precision optical interferential grating encoder displacement measurement technology for immersion lithography scanner [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(9): 1909-1918.  
王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 面向浸没式光刻机的超精密光学干涉式光栅编码器位移测量技术综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1909-1918.
- [4] Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. Ultraprecision control of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system [J]. Optics and

Precision Engineering, 2017, 25(5): 1213-1221.

王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 零差频移式干涉图形相位锁定系统的超精密控制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1213-1221.

- [5] Wang L J, Zhang M, Zhu Y, et al. Ultra precision phase shift locking system for scanning interference lithography[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1765-1773.

王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 扫描干涉光刻机的超精密移相锁定系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1765-1773.

- [6] Wang Z X, Ji C, Wang J, et al. Precision displacement measurement with nanometer resolution based on transmissive laser air-wedge interference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0904006.

王子轩, 冀聪, 王晶, 等. 基于透射式激光空气干涉的纳米分辨率精密位移测量[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0904006.

- [7] Di J J. Design of high-precision displacement measurement system based on diffractive grating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

邱晶晶. 基于衍射光栅的高精度位移测量系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

- [8] Beemaraj R K, Chandra S M S, Vijayan V, et al. Computer vision measurement and optimization of surface roughness using soft computing approaches [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(13): 2475-2481.

- [9] Qian W. Research on image registration based on corner feature[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.

钱为. 基于角点特征的图像配准技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

- [10] Chen X H. Application of SIFT feature matching in UAV low altitude remote sensing image processing [J]. Geology and mineral mapping, 2008(2): 10-12  
陈信华. SIFT 特征匹配在无人机低空遥感影像处理中的应用[J]. 地矿测绘, 2008(2): 10-12.

- [11] Wu P P, Guan Y D. Recognition algorithm for horizontal and vertical bar code of altered coins based on template matching [J]. Computer Engineering, 2006(10): 183-185

吴萍萍, 关宇东. 基于模板匹配的变造币横竖条码识别算法[J]. 计算机工程, 2006(10): 183-185.

- [12] Lucas B, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [J]. Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981, 2: 674-679.

- [13] Yamaguchi I, Kato J, Ohta S, et al. Image formation in phase-shifting digital holography and



- applications to microscopy[J]. Applied optics, 2001, 40(34): 6177-6186.
- [14] Meng X, Liu L, Jiang S, et al. Detection and revision of interference spectral signals based on wavelet transforms[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0930007.  
孟鑫, 刘磊, 江升, 等. 基于小波变换的干涉光谱信号检测与校正方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0930007.
- [15] Gong C L, Yang D T. Improved image zooming algorithm based on bilinear interpolation[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(8): 899-901.  
龚昌来, 杨冬涛. 一种改进的双线性插值图像放大算法[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 899-901.
- [16] Panigrahy C, Seal A, Mahato N K, et al. Quantitative texture measurement of gray-scale images: fractal dimension using an improved differential box counting method[J]. Measurement, 2019, 147: 106859.
- [17] Dai Y, Yi B S, Xiao J S, et al. Object detection of remote sensing image based on improved rotation region proposal network [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111020.  
戴媛, 易本顺, 肖进胜, 等. 基于改进旋转区域生成网络的遥感图像目标检测[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111020.
- [18] Wang H H, Zeng N, Lu W, et al. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 903-906.  
王海虹, 曾妮, 陆威, 等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 903-906.
- [19] Wang B, Wang X, Chen F, et al. Pavement crack recognition based on aerial image [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0810004.  
王博, 王霞, 陈飞, 等. 航拍图像的路面裂缝识别[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0810004.