

分区间曲线拟合的干涉条纹中心点提取方法

张瑞峰, 刘畅*

天津大学微电子学院, 天津 300072

摘要 提出一种分区间曲线拟合方法来准确获取干涉条纹的中心点。该方法根据干涉条纹图灰度值分布规律, 首先对干涉条纹 R 值图进行高斯低通滤波, 在保留原始条纹信息的基础上去除噪声; 然后, 在滤波后的图像中选取法线方向的一系列像素值, 得出灰度分布曲线; 最后, 截取邻近峰值的一段图像, 对增、减两个区间进行分段曲线拟合, 求得两段曲线拟合函数的交点即为干涉条纹中心。实验证明, 该方法具有较好的曲线拟合效果, 其速度相对于 Steger 算法提高了近 10 倍。该算法能有效地根据干涉条纹灰度分布规律得到干涉条纹中心点, 具有运算简便、精度高、抗干扰的特点。

关键词 测量; 干涉位移测量; 中心点提取; 区间拟合; 高斯滤波

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0812002

Interference Fringe Center Point Extraction Method Based on Interval Curve Fitting

Zhang Ruifeng, Liu Chang*

School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract To accurately obtain the center point of interference fringes, a method based on interval curve fitting was established. According to the gray value distribution of the interference fringe pattern, we first obtain the R value graph of the interference fringe and perform Gaussian low-pass filtering; then, we remove various noises while retaining the original fringe information. Thereafter, we consider the filtered image as a list of pixel values in the normal direction to obtain a gray distribution curve. Finally, we intercept the image near the peak to perform segmental curve fitting in the increasing interval and the decreasing interval and obtain the intersection point of the two curve fitting functions, which is the center point of the interference fringe. Experimental results show satisfactory curve fitting effect. Compared with the Steger algorithm, the speed of the proposed method is increased nearly ten times. The proposed method can be used to effectively obtain the center point of interference fringes according to the gray distribution law of interference fringes with a simple operation, high precision, and anti-interference characteristics.

Key words measurement; interference displacement measurement; center point extraction; interval fitting; Gaussian filtering

OCIS codes 120.3180; 110.2650; 150.1135

1 引言

干涉位移测量系统是精密位移测量中常用的系统之一。干涉位移系统能够在激光波长测量精度的

基础上根据物理特性检测位移, 主要用于表面粗糙度分析、材料膨胀实验和气体浓度测量等方面^[1-5]。气体浓度测量主要依据气体浓度变化使干涉条纹移动, 再根据相关计算将条纹移动量换算成气体浓度

收稿日期: 2020-08-24; 修回日期: 2020-09-23; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项(8YFF01013203)

* E-mail: 17862979390@163.com

变化^[6],因此条纹移动量的计算是干涉位移测量系统的核心。目前,检测干涉条纹移动的方法主要有条纹中心线法和全灰度法^[7]。条纹中心线法是对条纹图进行直接测量的方法,相比于全灰度法,此方法快捷、有效,可以显著提高测量精度^[8]。条纹中心线法的核心是提取干涉条纹中心点,以此为基准,便可以计算干涉条纹的移动量。

传统的条纹中心位置提取方法主要有灰度阈值法、几何中心法和极值法等,特点是方法简单、快速,但精度不高^[9-11]。此后在传统方法的基础上提出了一些改进算法:Steger^[12]利用 Hessian 矩阵得到条纹图法线方向,将法线方向上的极值点作为条纹中心,该方法的精度高,鲁棒性强,但运算量大,无法应用于实时性要求高的场合;李涛涛等^[13]提出基于高斯-洛伦兹分峰拟合的中心提取方法,该方法的适用性强,精度高,但耗时长;Li 等^[14]提出一种基于多高斯信号拟合的条纹中心提取算法,该方法的精度较高,但需要拟合的高斯信号较多,计算量大;蔡怀宇等^[15-16]提出一种基于主成分分析,利用大津阈值法提取图像,在条纹法线方向进行二阶泰勒展开,实现结构光条纹中心提取的方法,但该方法没有充分考虑条纹的灰度分布,存在一定误差;Yin 等^[17]采用分段拟合的方法获得光滑连续的激光条纹中心线,但该方法局限于单个条纹的中心提取,需要对整个图像进行卷积运算。此外,研究人员还提出阈值轮廓跟踪算法^[18]、二次平滑算法^[19]、密度聚类算法^[20]等。

上述方法虽在一定程度上提高了条纹中心提取的准确度,但适用性较低,存在一定的局限性,计算过程复杂、耗时长。本文提出一种基于分区间曲线拟合的干涉条纹中心点提取方法。该方法通过上位机实现,利用条纹灰度分布规律,在条纹法线方向上截取条纹灰度曲线邻近峰值的一段,分成递增与递减两个区间,进行两个方向曲线拟合,求得两段曲线拟合函数的交点即为干涉条纹中心点。

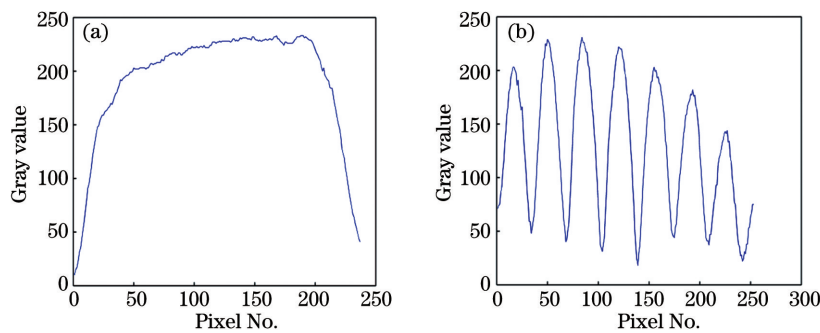


图 1 干涉条纹图灰度分布。(a)切线方向;(b)法线方向

Fig. 1 Grayscale distribution of interference fringe. (a) Tangential direction; (b) normal direction

2 基本原理

2.1 干涉条纹图特性

各种干涉条纹图的光强(灰度)分布可表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos \varphi(x, y) + I_{ARN}(x, y), \quad (1)$$

式中: $I_0(x, y)$ 为背景光强; $I_1(x, y)$ 为条纹幅值; $\varphi(x, y)$ 为相位场; $I_{ARN}(x, y)$ 为加性随机噪声。

干涉条纹图的分布具有以下特征:

1) $I(x, y)$ 是唯一可测量的量,下文采用 $3 \times N$ 的像素矩阵形式。

2) 干涉条纹图是对相位场 $\varphi(x, y)$ 的余弦调制结果,余弦调制即表现为条纹分布。由于 $\cos \varphi(x, y)$ 具有周期性,只能测量出相位场的 2π 主值。当只考虑 $\cos \varphi(x, y)$ 的影响时,条纹的中心骨架线点的相位为 π 的整数倍。余弦调制的结果表现在图形上即为明暗条纹,本实验选取亮条纹中心点,即寻找灰度图像的最大值^[21]。

3) 相位场 $\varphi(x, y)$ 的物理意义取决于所使用的实验技术,本实验选取雅满干涉仪形成的干涉条纹图。

条纹方位分布表示相位变化的梯度方向,对于条纹切线方向 t ,则有

$$\frac{d\varphi(x, y)}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dI(x, y)}{dt} = 0. \quad (3)$$

对于条纹法线方向 n ,则有

$$\frac{d\varphi(x, y)}{dn} = \max \left[\frac{d\varphi(x, y)}{d\rho} \right], \quad (4)$$

$$\frac{dI(x, y)}{dn} = \max \left[\frac{dI(x, y)}{d\rho} \right], \quad (5)$$

式中: ρ 为某个求导方向。从(2)~(5)式可以得出:条纹切线方向上,相位场与灰度变化近似为零;在条纹法线方向上,相位场与灰度梯度变化最大(图 1)。

当灰度提取方向平行于条纹方向时,即图 1(a)所示的切线方向,曲线变化幅度较小,无法运用曲线拟合法求出条纹的中心点坐标;当灰度提取方向垂直于条纹时,即图 1(b)所示的法线方向,曲线拟合能达到最佳效果。因此,本实验选择从条纹法线方向的条纹灰度数据中提取干涉条纹中心点。

2.2 傅里叶级数曲线拟合

对于条纹中心附近区域,(1)式可改写为

$$I(x) = A + B\cos(x), \quad (6)$$

式中: A 为平均光强; B 为干涉条纹幅值。根据(2)式并比较多种曲线拟合方法,决定采用傅里叶级数拟合曲线,其拟合函数形式如下:

$$f(x) = a_0 + a_1\cos(\omega x) + b_1\sin(\omega x) + a_2\cos(2\omega x) + b_2\sin(2\omega x). \quad (7)$$

可以利用 $f(x)$ 近似 $I(x)$ 替代,并且对于确定干涉条纹中心点问题,即 $x=0$ 时, $f(x)$ 和 $I(x)$ 的右端皆为常量,这是进行曲线拟合的理论基础。

(7)式中系数 $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \omega$ 均可用最小二乘法求解^[22]。最小二乘法的误差和可表述为

$$\Phi = \sum_{i=1}^m f_i^2(a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \omega), \quad (8)$$

$$f_i = y_i - f(x) = y_i - [a_0 + a_1\cos(\omega x_i) + b_1\sin(\omega x_i) + a_2\cos(2\omega x_i) + b_2\sin(2\omega x_i)], \quad (9)$$

式中: x_i 和 y_i 分别表示 m 对拟合数据中第 i 对拟合数据的横、纵坐标值。

对(9)式进行一阶泰勒展开,可得

$$\varphi_i = \nabla f_i(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{x} - [\nabla f_i(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{x}^{(k)} - f_i(\mathbf{x}^{(k)})], \quad (10)$$

式中: \mathbf{x} 是由待测参数 $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \omega$ 组成的向量; $\mathbf{x}^{(k)}$ 表示解 \mathbf{x} 的第 k 次近似; $\nabla f_i(\mathbf{x}^{(k)})$ 是 f_i 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的梯度; $f_i(\mathbf{x}^{(k)})$ 表示 f_i 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的取值。用(10)式近似求解(9)式,则(8)式可表示为

$$\Phi = \sum_{i=1}^m \varphi_i^2(\mathbf{x}), \quad (11)$$

$$\text{令 } \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \nabla f_1(\mathbf{x}^{(k)})^T \\ \vdots \\ \nabla f_n(\mathbf{x}^{(k)})^T \end{bmatrix}, \mathbf{f}^{(k)} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}^{(k)}) \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \nabla f_1(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{x}^{(k)} - f_1(\mathbf{x}^{(k)}) \\ \vdots \\ \nabla f_n(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{x}^{(k)} - f_n(\mathbf{x}^{(k)}) \end{bmatrix}, \text{则 } \mathbf{b} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{f}^{(k)},$$

因此(11)式可以表示为

$$\Phi = (\mathbf{A}_k \mathbf{x} - \mathbf{b})^T (\mathbf{A}_k \mathbf{x} - \mathbf{b}). \quad (12)$$

通过(12)式可以直接求解误差函数 Φ 取最小

值时 $\mathbf{x}^{(k)}$ 的值。函数 Φ 在最小值点处满足线性方程:

$$\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k (\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)}) = -\mathbf{A}_k^T \mathbf{f}^{(k)}. \quad (13)$$

当 \mathbf{A}_k 为列满秩矩阵时,(13)式的解为

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - (\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k)^{-1} \mathbf{A}_k^T \mathbf{f}^{(k)}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{x}^{(k+1)}$ 表示(12)式的最优解在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的一阶近似值。(14)式可化简为

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{H}_k^{-1} \nabla \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}), \quad (15)$$

式中: $\mathbf{H}_k = 2\mathbf{A}_k^T \mathbf{A}_k$ 是(11)式的 Hessian 矩阵; $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) = 2\mathbf{A}_k^T \mathbf{f}^{(k)}$ 。因此,通过(15)式可以确定(7)式中的参数 $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \omega$ 。

2.3 图像预处理

本实验采用雅满干涉仪产生干涉条纹图,利用 STM32F407FZG 开发板控制 ALIENTEK OV2640 摄像头采集所需图像,采集到的干涉图像分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。在实验采集的图像中不可避免地存在噪声,这对于条纹灰度图的分析是不利的。因此,为了减小实验误差,要对图像进行滤波处理,以滤去噪声^[23]。本实验选取图像 RGB 模型中的 R 值图像进行滤波处理,滤波器采用高斯低通滤波器,在保留原始条纹信息的基础上去除部分噪声。滤波前、后的图像如图 2 所示。

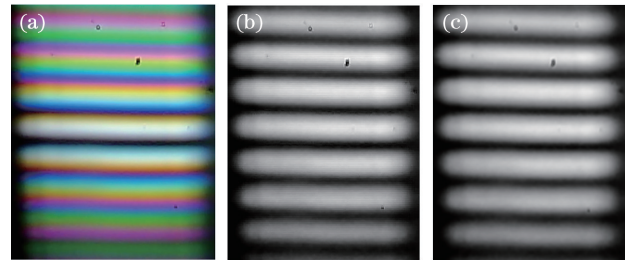


图 2 干涉条纹图。(a)原图像;(b)R 值图;(c)高斯滤波图
Fig. 2 Interference fringe patterns. (a) Original image; (b) R-value image; (c) Gaussian filter image

3 实验与分析

3.1 高斯滤波

在干涉条纹图像 R 值图中截取法线方向的灰度分布图。由于噪声的存在,该灰度图像存在较多毛刺,极值点附近更甚,如图 3(a)所示。R 值图像经高斯滤波滤去噪声后,图像变得平滑,尤其是最大值点附近,噪声造成的误差减小,如图 3(b)所示。

3.2 分区间拟合

干涉条纹中心点理论上位于干涉条纹灰度图极大值处,但由于噪声对图像极值点影响较大,如果直接对曲线进行拟合,得出的结果误差很大;对滤除噪

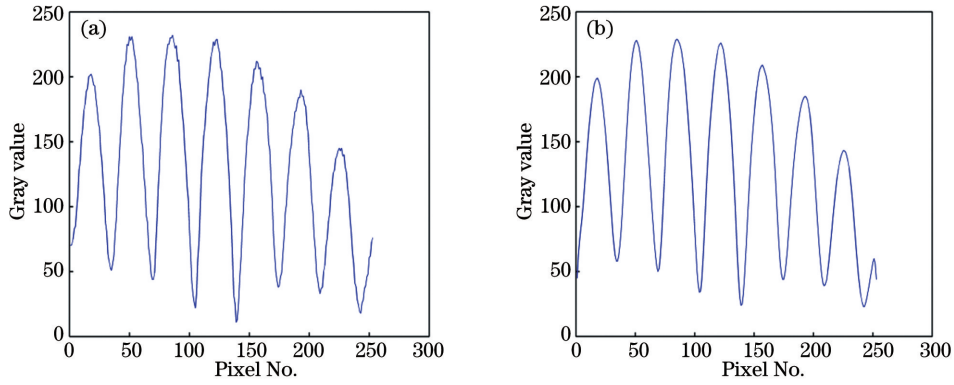


图 3 法线方向灰度图。(a)原图;(b)高斯滤波后

Fig. 3 Grayscale along normal direction. (a) Original image; (b) after Gaussian filtering

声后的图像来说,误差也较大。因此,为了减小误差,使结果更精确,本实验在高斯滤波后图像中截取部分曲线进行分区间拟合,如图 4 所示。

1) 利用 MATLAB 软件编程,找出整段曲线的极值点横坐标值;

2) 某一极大值点的横坐标为 a ,其左右两边极小值点处横坐标值为 b, c ;

3) 对递增区间 $[b, a]$ 和递减区间 $[a, c]$ 分别进行曲线拟合,得出 2 段拟合函数,如图 5 所示,将图 5(a)所示的图像函数表达式记为 $f_1(x)$,图 5(b)所示的图像函数表达式记为 $f_2(x)$ 。

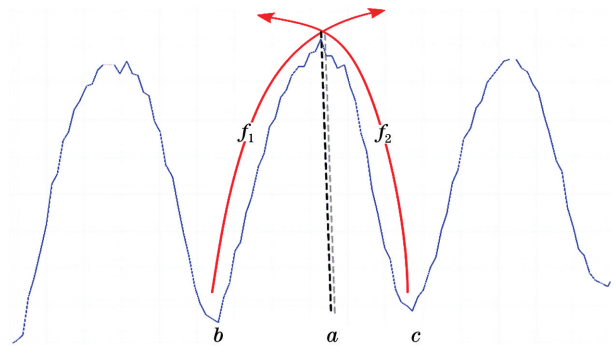


图 4 区间拟合示意图

Fig. 4 Schematic of interval fitting

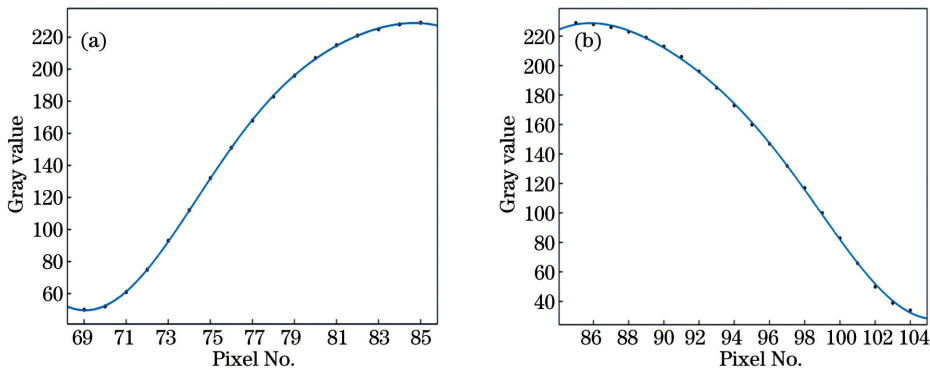


图 5 曲线拟合结果。(a) $f_1(x)$;(b) $f_2(x)$

Fig. 5 Results of curve fitting. (a) $f_1(x)$; (b) $f_2(x)$

3.3 提取条纹中心点

将拟合函数 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的定义域扩展至 $[b, c]$,如图 6 所示,然后对拟合后的两段曲线做差,靠近极大值的零点处即为所求干涉条纹的中心点。令 $f(x) = f_2(x) - f_1(x)$,并做出 $f(x)$ 的图像,如图 7 所示。最终干涉条纹中心点提取结果如图 8 所示,提取结果用二值图形式表现。

3.4 数据对比与分析

为证明本文方法的优势,在 CPU 为 Pentium E5500,内存为 3 GB 的主机上,利用 MATLAB

2014a 开发环境,选用几种典型算法对大小为 $418 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的图像进行处理。表 1 所示为 3 种曲线拟合方法的统计参数对比,其中 SSE 为曲线拟合的和方差, RMSE 为方均根,二者越小,均表明拟合效果越好; R_{square} 为曲线确定系数; $R_{\text{Adj-sq}}$ 为调整后确定系数,其值越接近于 1 表示曲线的拟合程度越好。从表 1 可以看出,分段曲线拟合的效果很好,拟合度能达到 0.99。而本文方法的傅里叶拟合和方差(SSE)比高斯拟合方法小,并且远远小于多项式拟合的结果;傅里叶拟合的方均根(RMSE)

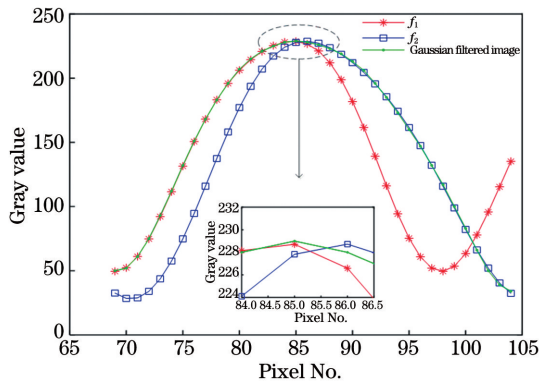


图 6 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 图像和滤波后图像

Fig. 6 Images of $f_1(x)$ and $f_2(x)$ and filtered image

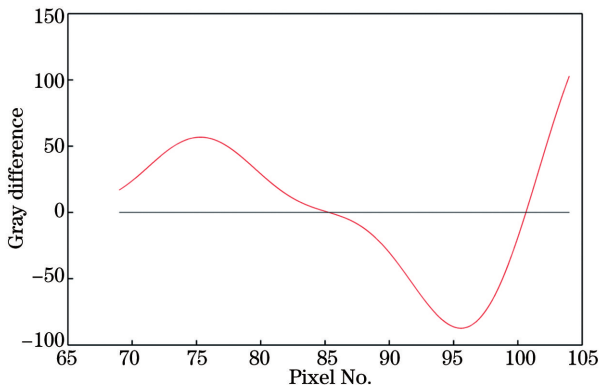


图 7 $f(x) = f_2(x) - f_1(x)$ 的图像

Fig. 7 Image of $f(x) = f_2(x) - f_1(x)$

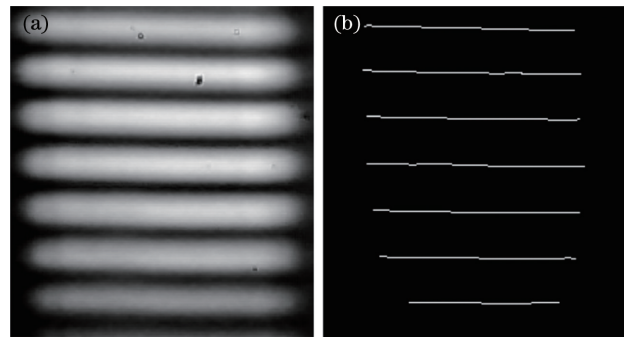


图 8 提取结果。(a) 干涉条纹图; (b) 中心线提取结果

Fig. 8 Extraction results. (a) Interference fringe pattern; (b) centerline extraction result

表 1 3 种曲线拟合方法统计参数对比

Table 1 Comparison of statistical parameters of three curve fitting methods

Fitting method	SSE	RMSE	R_{square}	$R_{\text{Adj-sq}}$
Gaussian curve fitting	218.7985	3.9533	0.9971	0.9965
Polynomial curve fitting	1187.9	9.2112	0.9835	0.9812
Proposed method	141.458	3.2970	0.9980	0.9976

略小于高斯拟合, 小于多项式拟合; 而傅里叶拟合方法的调整后确定系数 ($R_{\text{Adj-sq}}$) 优于其他两种拟合方法, 因此傅里叶拟合法整体效果较好。拍摄不同浓度条件下的干涉条纹图像, 如图 9 所示, 利用灰度阈

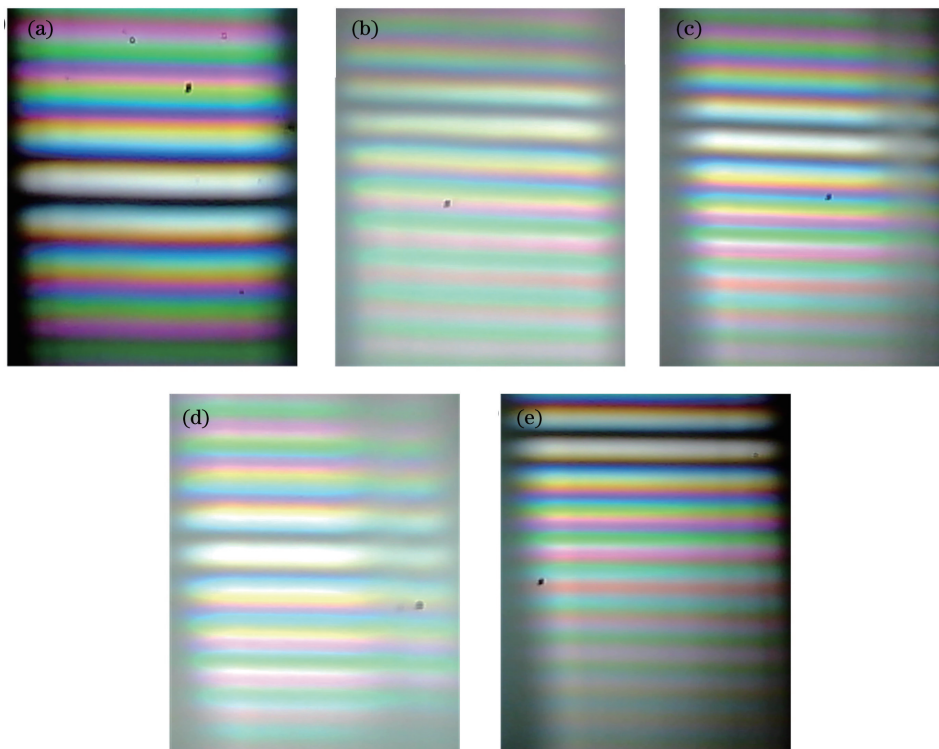


图 9 干涉条纹图。(a) 图像 1; (b) 图像 2; (c) 图像 3; (d) 图像 4; (e) 图像 5

Fig. 9 Interference fringe patterns. (a) Image 1; (b) image 2; (c) image 3; (d) image 4; (e) image 5

值法、Steger 法、灰度重心法与本文方法进行处理, 平均处理时间如表 2 所示。可以看出, 本文方法在处理时间上略慢于灰度重心法, 略快于灰度阈值法,

但比 Steger 法约快 10 倍。

为进一步验证所提方法的精度, 利用计算机绘制出 5 幅形态不同, 中心线已知的条纹图, 如图 10 所示。

表 2 4 种方法提取结果平均处理时间对比

Table 2 Comparison of average processing time of extracting results by four methods

Algorithm	Average processing time /s				
	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4	Image 5
Gray threshold algorithm ^[8]	0.8201	0.9554	0.9841	0.9344	0.8406
Steger algorithm ^[12]	6.8448	7.7812	8.2662	8.6523	7.0884
Gray-gravity algorithm ^[22]	0.3250	0.4390	0.4006	0.4305	0.2977
Proposed algorithm	0.6415	0.7981	0.7807	0.8347	0.6306

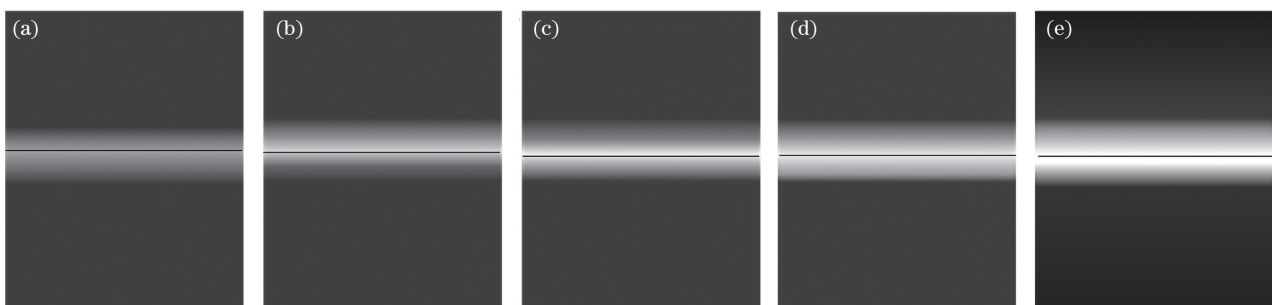


图 10 中心线已知的图像。(a)图像 6;(b)图像 7;(c)图像 8;(d)图像 9;(e)图像 10

Fig. 10 Known centerline images. (a) Image 6; (b) image 7; (c) image 8; (d) image 9; (e) image 10

运用灰度阈值法、Steger 法、灰度重心法以及本文方法分别对图 10 所示的 5 幅图进行中心线提取, 计算每种方法提取出来的条纹中心与标准中心的 RMSE, 计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看

出, 灰度重心法与灰度阈值法的精度较差, Steger 法提取精度较高, RMSE 为 0.0489~0.0642 pixel, 而本文算法的精度略高于 Steger 法, 为 0.0195~0.0463 pixel。

表 3 4 种方法提取结果与标准值的方均根误差对比

Table 3 RMSE comparison between the extraction results of the four methods and the standard value

Algorithm	RMSE /pixel				
	Image 6	Image 7	Image 8	Image 9	Image 10
Gray threshold algorithm ^[8]	0.9840	1.6773	2.5175	1.5126	1.4967
Steger algorithm ^[12]	0.0521	0.0642	0.0489	0.0562	0.0601
Gray-gravity algorithm ^[22]	0.3930	0.5581	0.2589	0.4374	0.4895
Proposed algorithm	0.0424	0.0441	0.0195	0.0463	0.0449

4 结 论

为获取干涉条纹中心点, 提出一种分区间曲线拟合的方法。通过对原始图像进行高斯低通滤波, 滤去噪声, 减小一部分误差; 对干涉条纹图法线与切线方向进行对比, 法线方向的相位场与灰度梯度变化最大, 便于进行曲线拟合; 通过比较, 选取了傅里叶级数进行曲线拟合, 并对两段拟合函数做差求零点, 从而得到干涉条纹中心点。实验结果表明: 分段

曲线的拟合效果更好, 能消除部分噪声的影响, 精度较高, 运算量小, 运算速度快; 相对于 Steger 算法, 本文算法的速度提高了近 10 倍, 能更稳定、准确地提取干涉条纹中心。本文算法可用于工业光干涉甲烷检测仪中, 满足快速、准确、非接触测量的要求。

参 考 文 献

- [1] Bocekci V G, Varol H S. Michelson interferometer based displacement measurement using video

- processing[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2015, 127(4): 934-936.
- [2] Lu J, Chen J J, Xie J, et al. A novel automatic method of fringe counter for equally tilting fringe[J]. *Optik*, 2013, 124(15): 2062-2066.
- [3] Hu Y, Fang S P. Extraction method of light stripe center of linear structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0112005.
胡杨, 方素平. 线结构光条纹中心提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0112005.
- [4] Wang Q, Xia J, Liu X, et al. Novel method of detecting movement of the interference fringes using one-dimensional PSD[J]. *Sensors*, 2015, 15(6): 12857-12871.
- [5] Wu S L, Hu H R, Zhong S M, et al. Automatic extraction of speckle interference fringe regions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212004.
吴双乐, 胡慧然, 钟诗民, 等. 散斑干涉条纹区域的自动提取[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212004.
- [6] Shen Y, Shao K M, Wu J, et al. Optical gas detection: key technologies and applications review[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190280.
沈英, 邵昆明, 吴靖, 等. 气体光学检测技术及其应用研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(4): 190280.
- [7] Chen R G, Chen H X. A new method for interference fringe skeletonizing and thinning[J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 40-41.
陈瑞改, 陈怀新. 干涉条纹中心线提取与细化的新方法[J]. *激光杂志*, 2005, 26(5): 40-41.
- [8] Song A Q. Study of precise location of interference fringe centerlines based on the sub-pixel in digital image[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008: 32-45.
宋爱群. 基于亚像素的干涉条纹精确定位技术的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008: 32-45.
- [9] Cai H Y, Yu Y, Huang Z H, et al. A new method of extracting the center interference fringes based on polynomial fitting[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(1): 115-118.
蔡怀宇, 于毅, 黄战华, 等. 一种基于曲线拟合提取干涉条纹中心点的新方法[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(1): 115-118.
- [10] Farooq M, Aslam A, Hussain B, et al. A comparison of image processing techniques for optical interference fringe analysis[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 304-311.
- [11] Zhao G X, Chen H Q, Yang G G. Data-fitting method of interference stripes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 797-800.
赵光兴, 陈洪璆, 杨国光. 干涉条纹的数据拟合方法[J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 797-800.
- [12] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [13] Li T T, Yang F, Li S G, et al. Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071201.
李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条纹中心的提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 071201.
- [14] Li C L, Ye X F, Gong Y, et al. A center-line extraction algorithm of laser stripes based on multi-Gaussian signals fitting[C]//2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), August 1-3, 2016, Ningbo, China. New York: IEEE Press, 2016: 189-194.
- [15] Cai H Y, Feng Z D, Huang Z H. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308006.
蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308006.
- [16] Sha C S, Hou J, Cui H X. A robust 2D Otsu's thresholding method in image segmentation[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 41: 339-351.
- [17] Yin X Q, Tao W, Feng Y Y, et al. Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2653-2660.
- [18] Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304002.
李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304002.
- [19] Yang Y, Yan B, Dong D W, et al. Method for extracting the centerline of line structured light based on quadratic smoothing algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101504.
杨毅, 闫兵, 董大伟, 等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101504.
- [20] Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204004.
周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(12):

- 1204004.
- [21] Liu J, Liu L H. Laser stripe center extraction based on Hessian matrix and regional growth[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2):021203.
刘剑, 刘丽华. 基于海森矩阵与区域增长的激光条纹中心提取[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021203.
- [22] Wu Q H, Zhou Y, Li Z Q, et al. Extracting method for light strip center of linear structural light based on dual frequency curve fitting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141502.
吴庆华, 周阳, 李子奇, 等. 双频曲线拟合线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141502.
- [23] Shi Y S, He Y L, Shi D F, et al. Extraction of the characteristic information from 2-D multi-beam interferogram [J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(5):58-61.
师月山, 贺渝龙, 是度芳, 等. 二维多光束干涉图特征信息的提取[J]. 光电工程, 2001, 28(5): 58-61.