

文章编号 1004-924X(2025)10-1515-09

基于干涉条纹区域生长算法的 平板玻璃平行度测量

王明军¹, 黄一凡^{1,3}, 刘世杰^{2*}, 李梁玮^{1,3}, 李蓬勃^{1,3}, 李俊达^{1,3},
吴福林³, 徐学科³, 邵竹锋⁴

- (1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 精密光学制造与检测中心, 上海 201800;
3. 恒迈光学精密机械(杭州)有限公司, 浙江 杭州 311421;
4. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024)

摘要: 为了实现平板玻璃平行度高精度、快速测量, 提出了一种利用区域生长算法对干涉条纹图进行分割处理的测量新方法。采用非索干涉仪采集平板玻璃前后表面反射产生的自干涉条纹, 利用区域生长算法对采集的自干涉条纹进行区域分割, 提取出自干涉条纹, 统计出测量口径内的干涉条纹明条纹数目, 从而实现平行度的测量。将区域生长算法与 Sobel 算法对比后发现, 区域生长算法在干涉条纹提取方面表现更优。利用该算法对不同类型的干涉条纹进行测量, 并将测量结果与 ZYGO 的测量结果对比, 结果显示, 基于区域生长算法的平行度测量误差小于 1"。利用该图像处理的干涉测量方法, 可以方便快速地对平板玻璃的平行度进行测量, 提高了平板玻璃的检测效率, 同时具有较高的测量精度。

关键词: 平板玻璃; 平行度; 区域生长; 干涉测量

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253310. 1515 **CSTR:** 32169. 14. OPE. 20253310. 1515

Parallelism measurement of flat glass based on an interferometric fringe region growth algorithm

WANG Mingjun¹, HUANG Yifan^{1,3}, LIU Shijie^{2*}, LI Liangwei^{1,3}, LI Pengbo^{1,3}, LI Junda^{1,3},
WU Fulin³, XU Xueke³, SHAO Zhufeng⁴

- (1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China;
2. Precision Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
3. Hengmai Optical Precision Machinery (Hangzhou) Co. Ltd, Hangzhou 311421, China;
4. China Academy of Building Materials Science, Beijing 100024, China)

* Corresponding author, E-mail: shijieliu@siom.ac.cn

Abstract: In order to achieve high-precision and fast measurement of parallelism of flat glass, a new mea-

收稿日期: 2025-01-16; 修订日期: 2025-03-04.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目 (No. 92052106); 国家自然科学基金 (No. 61771385)

surement method using an area growth algorithm to segment the interference fringe map was proposed. A Fischer interferometer was used to collect the self-interference fringes generated by reflections from the front and back surfaces of the flat glass, and an area growth algorithm was used to segment the collected self-interference fringes, extract the self-interference fringes, and statistically count the number of interfering fringes within the measurement aperture, so as to realize the measurement of the degree of parallelism. After comparing the region growing algorithm with the Sobel algorithm, it was found that the region growing algorithm performed better in the extraction of interference fringes. Measurements of different types of interference fringes using this algorithm and comparisons of the measurement results with those of ZYGO showed that the error of parallelism measurement based on the region growing algorithm was less than $1''$. Using this interferometric method of image processing, the parallelism of flat glass can be measured easily and quickly, which improves the inspection efficiency of flat glass, and at the same time has a high measurement accuracy.

Key words: plate glass; parallelism; region growing; interference measurement

1 引言

在光学和电子设备的制造中,常常会用到由两个平面构成的玻璃平行平板或相当于平行平板的光学零件,而这类光学零件对平行度有较高的要求^[1-4]。平行度测量不仅仅是制造工艺中的一个关键环节,更是保证产品质量、提高生产效率和可靠性的手段之一,因此,对平行度进行测量是非常有必要的^[5-6]。

目前对于平行平板平行度的测量可分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量通常采用千分尺和平行尺等来测量样品平行度,但是该测量方法可能会划伤样品表面,且测量速度较慢^[7-9]。非接触式测量通常使用自准直法和干涉法测量样品平行度^[10-13]。林旺^[14]等利用两平面不平行时,光束照射到两平面后会反射回两个不重叠的光斑,通过分析两光斑圆心之间的距离确定两平面间的夹角,该方法测量误差为 $2'$,且适用于测量大角度的平行度。Kerobyan^[15]等提出采用相位步进干涉法测量步进量规表面平行度,该方法主要用于测量微型平面光学元件的平行度。Lin^[16]等利用低相干移相剪切干涉仪求得透明样品的最大和最小相对厚度,根据基准平面到样品表面的最大和最小距离之差来计算平行度,该方法需要复杂的数据处理算法来分析干涉图。

针对上述方法存在的不足,本文提出了一种利用菲索干涉仪测量样品前后表面产生的自干涉条纹,然后通过区域生长算法对采集的自干涉

条纹图进行分割处理,提取出干涉条纹,利用连通区域分析确定干涉条纹数目。所提干涉测量方法可以方便快速地对平板玻璃的平行度进行测量,简化了测量步骤,提高了测量效率和测量精度。

2 测量原理

实验系统设计如图 1 所示,激光器发出的光经扩束镜会聚在光阑上,光经过光阑到达分光棱镜后,分光棱镜将光分成两束,一束作为参考光,另一束经过被测物体反射后再与参考光重合,形成干涉条纹^[17]。在进行平行度检测时,去掉参考镜,将被测件放置在工作台上,利用被测件前后表面反射的光形成的自干涉条纹进行检测。若待测件前后表面严格平行,将得到亮度均匀的干涉场,在 CCD 上看不到干涉条纹;若待测件前后表面之间有一定的小倾角,则在 CCD 上能看到

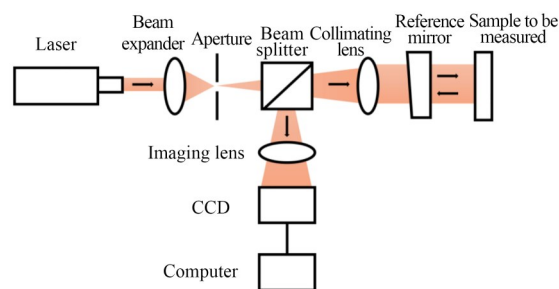


图 1 菲索干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the fizeau interferete

干涉条纹。

假设在 CCD 上采集的干涉条纹如图 2 所示,在测量口径为 D 的范围内有 m 个条纹,且测量口径 D 一端的待测件厚度为 h_1 ,另一端厚度为 h_2 ,则:

$$2n(h_1 - h_2) = m\lambda. \quad (1)$$

则平行度 θ 为:

$$\theta = \frac{h_2 - h_1}{D} = \frac{m\lambda}{2nD} 206\,265'', \quad (2)$$

其中:206 265'' 是角度转换比值, n 为待测样品折射率, λ 为光源的波长。

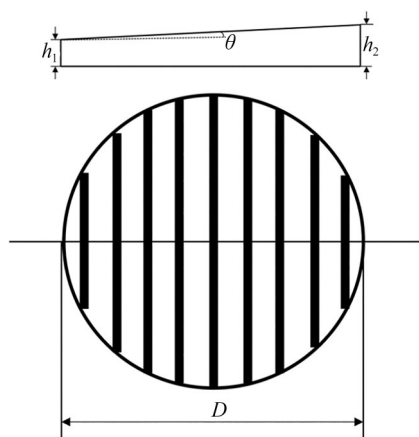


图 2 干涉条纹图

Fig. 2 Interference fringe image

利用该方法测量平行度时,当干涉场内的干涉条纹数 $m < 1$ 时,干涉场内无干涉条纹,所以可测的平行度最小为 $\theta_{\min} = \lambda/2nD$ 。当干涉场内的干涉条纹太密,无法分辨时,即为可测得平行度的最大值。假设人眼的分辨能力是 0.3 mm,当样品折射率 $n = 1.52$,测量口径 $D = 30$ mm,波长 $\lambda = 632.8$ nm 时,则平行度测量的最大值 $\theta_{\max} \approx 143''$ 。

3 区域生长算法

区域生长算法是根据预先设定好的相似性准则进行区域扩展,对于噪声影响和光照不均匀导致干涉条纹灰度值波动的图像,区域生长算法可以根据图像特征灵活地选择种子点,通过设定干涉条纹图像的灰度相似性条件,将属于同一条纹的像素准确的聚合在一起,清晰地界定出每一

条条纹的区域范围,避免相邻条纹产生混淆。

由于干涉仪采集的干涉条纹不可避免地存在各种噪声,噪声会影响测量结果的准确性,在对干涉条纹处理前,需要先对图像进行预处理。中值滤波以干涉条纹图中的每一个像素点为中心,选择 3×3 的滤波窗口,将该窗口中 9 个像素点的灰度值进行排序,取中间值作为该像素点的灰度值,利用中值滤波可以滤除干涉条纹图中的大部分噪声。为进一步提升干涉条纹图质量,通过提取条纹图像不同位置处的灰度值,根据灰度直方图自适应寻找一个最佳的分割阈值向量,从而调整干涉条纹图的对比度^[18-19]。

利用区域生长算法对已经预处理的干涉条纹图进行图像分割,提取出感兴趣的区域。区域生长算法是一种基于区域的传统图像分割算法,根据预先定义的生长规则将一个像素不断组合为更大区域的过程。首先是选取合适的初始种子点,对于种子点的选取,根据灰度直方图,统计各个像素点出现的频次,将灰度频数较小的像素点置为 0,其次找出灰度值最大的像素点,最后采用高斯拟合的方法,对最大像素点周围符合要求的像素点所对应的频数进行拟合,从而找出一组像素点作为种子点。获得初始种子点后,依据像素间灰度值的差值来判断是否将周围像素合并到当前生长区域,即:

$$|I(p) - \tilde{I}(p)| < T, \quad (3)$$

其中: $I(p)$ 为待判断像素点的灰度值, $\tilde{I}(p)$ 为初始种子点像素值, T 为设定的灰度阈值。

区域生长算法的关键是生长阈值的确定,在进行阈值选取时,首先进行初始阈值估计,根据灰度差阈值公式确定初始阈值:

$$T_{\text{gray}} = \mu_s \pm k\sigma_s, \quad (4)$$

其中: μ_s 为种子点邻域灰度均值, σ_s 为种子点邻域灰度标准差, k 为经验系数,通常取 1.5~3。然后固定种子点,以初始阈值运行区域生长算法,根据条纹分割情况,逐步调整阈值,若欠分割,则按步长 $\Delta T = \sigma_s/2$ 逐步增大阈值;若过分割,则按 $\Delta T = -\sigma_s/3$ 逐步减小阈值。最后通过对多幅图进行测试,即重复上述过程,验证阈值选取是否合适。当设定的阈值能完整地分离出干涉条纹时,则此时的阈值为最优值。

区域生长时像素的扩展方向和范围有两种

方式。一种是四邻域生长,假设当前像素点的位置为 (i, j) ,它的四邻域指的是当前像素点的上、下、左、右四个邻域的像素,位置分别为 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$;另一种是八邻域生长,在四邻域生长的基础上还包含了对角方向上的四个相邻像素点,八邻域像素点的位置分别为 $(i-1, j-1)$, $(i-1, j)$, $(i-1, j+1)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j-1)$, $(i+1, j)$, $(i+1, j+1)$ 。四邻域生长适用于目标区域规整、形状简单的图像,八邻域生长能够更好适应形状复杂、边界不规则的目标区域分割。因此选择八邻域生长方式,基于8邻域的区域生长规则如下:

(1)确定种子点,遍历整幅图像,找到第一个没有进行生长的像素点,以该像素点为中心,判断该像素点的8个邻域的像素值是否满足生长条件(像素值与种子点像素值之间的差值小于设定的阈值),若满足则将该点标记为“1”;

(2)将新生长的点作为新的种子点,重复步骤1;

(3)直至遍历完整幅图像,生长终止。

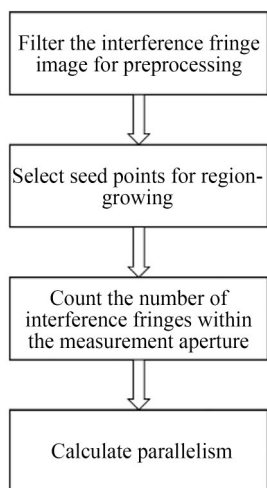


图3 平行度检测过程

Fig. 3 Parallelism detection process

利用连通区域分析经图像分割处理后的干涉条纹,即对图像进行扫描,根据八连通分析,将图像中标记为“1”的所有连通区域的数目统计出来,即为干涉条纹图中明条纹个数,从而实现平行度的测量。

4 模拟分析

在平行度测量过程中,影响平行度测量结果的主要因素是待测样品在测量口径内的干涉条纹数目。如何准确识别干涉条纹数目是平行度测量的关键,本节将对区域生长算法与常用的干涉条纹边缘检测 Sobel 算法进行对比^[20-22]。Sobel 算法是利用离散差分算子来近似计算图像中像素点的灰度梯度,通过检测灰度变化剧烈的区域进行图像分割,采用水平方向和垂直方向的两个 3×3 算子检测水平方向和垂直方向的灰度变化。水平方向 G_x 和垂直方向 G_y 的算子如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将水平与垂直方向的算子分别与灰度图像进行卷积运算,获得水平和垂直方向的梯度分量:

$$G_x(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 G_x(m, n) \times I(i+m, j+n),$$

$$G_y(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 G_y(m, n) \times I(i+m, j+n), \quad (6)$$

其中: $G_x(m, n)$, $G_y(m, n)$ 分别为水平和垂直方向算子中对应的元素, $I(i+m, j+n)$ 为条纹图中对应位置处的像素值。获得梯度分量后根据下式计算每个像素点的梯度幅值和方向:

$$G(i, j) = \sqrt{G_x(i, j)^2 + G_y(i, j)^2}, \quad (7)$$

$$\theta(i, j) = \arctan \left(\frac{G_y(i, j)}{G_x(i, j)} \right). \quad (8)$$

通过对多幅图像处理比较,设置一个合适的阈值,当 $G(i, j) \geq T$ 时,则认为该像素点为边缘像素,当 $G(i, j) < T$ 时,则认为该像素点为非边缘像素。Sobel 算法通过上述处理实现图像分割。

利用 Matlab 仿真生成 3 组不同形状、灰度范围为 0~255 的灰度干涉条纹图,干涉图大小为像素 512 的矩形,各干涉条纹图的数学表达式可以写为:

$$I(i, j) = I_0 + \gamma(i, j) \cos[A \times B(i, j) + \varphi(i, j)], \quad (9)$$

其中: I_0 为背景光强, $\gamma(i, j)$ 调制对比度, A 为条

纹密度,用于调整条纹间距和数量,设置为 15, $B(i, j)$ 用于生成不同形状的条纹, $\varphi(i, j)$ 为条纹的初始相位, 设置为 $\frac{\pi}{2}$ 。

由于在实际测量过程中,得到的干涉条纹图并不是十分理想,因此仿真时引入标准差为 0.2 的高斯噪声。利用本文所提的区域生长算法和传统的边缘检测 Sobel 算法分别对 3 组干涉条纹进行图像分割,识别干涉条纹数目,处理结果如图 4 所示,第一列为 Matlab 仿真生成的干涉条纹图,第二列为利用本文所提区域生长算法对条纹进行分割处理的结果,第三列为利用 Sobel 算法对条纹进行分割处理的结果。

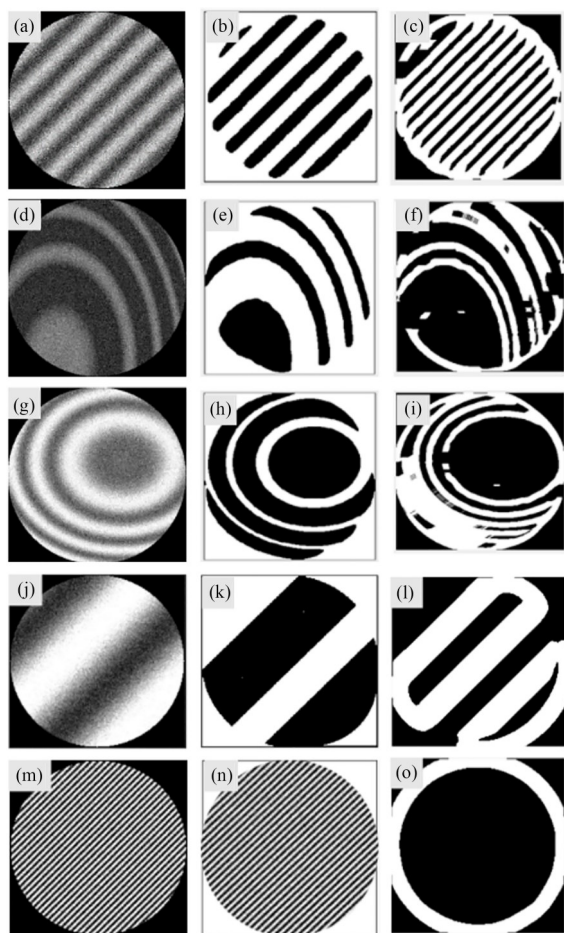


图 4 区域生长算法与 Sobel 算法对比

Fig. 4 Comparison of region-growing algorithm and Sobel algorithm

为验证噪声对条纹分割的影响,仿真时,通过加入不同标准差的高斯噪声观察区域生长算法和 Sobel 算法的抗噪能力。图 5 所示为不同噪

声下区域生长算法和 Sobel 算法的条纹分割结果,其中 (a) 为不添加噪声时的条纹图, (d) 为添加了标准差为 0.1 的高斯噪声的条纹图, (g) 为添加了标准差为 0.2 的高斯噪声的条纹图, (b) (e) (h) 为区域生长算法分割结果, (c) (f) (i) 为 Sobel 算法分割结果。从图中可以看出随着噪声变多,区域生长算法有较好的抗噪声能力,而 Sobel 算法对条纹的分割效果不理想。

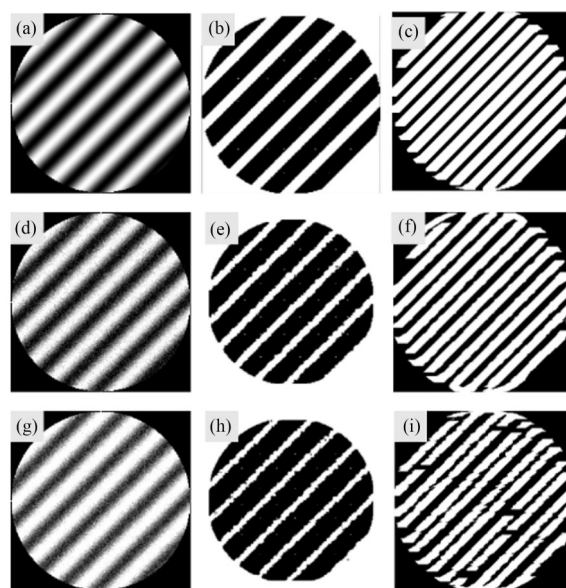


图 5 不同噪声下区域生长算法与 Sobel 算法对比

Fig. 5 Comparison between the region growing algorithm and Sobel's algorithm under different noises

由上述图像处理结果可以看出,本文所提区域生长算法对不同形状的干涉条纹有较好的分割效果,而 Sobel 算法对于圆弧形干涉条纹的分割效果不理想,图像中噪声较多时,会导致 Sobel 算法梯度计算错误。区域生长算法通过设置合适的阈值能够很好地抵抗噪声对图像分割的影响。

5 实验数据验证

实验测量装置采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为光源,按照实验原理调试好光路,选择平板玻璃作为待测样品,利用酒精将待测样品前后表面擦拭干净,并将其垂直放置在样品夹持器上,去掉参考镜,在 CCD 上采集待测样品前表面与后表面产生的自干涉条纹,如图 6 所示为非索式干涉仪检测平行度实验装置图。

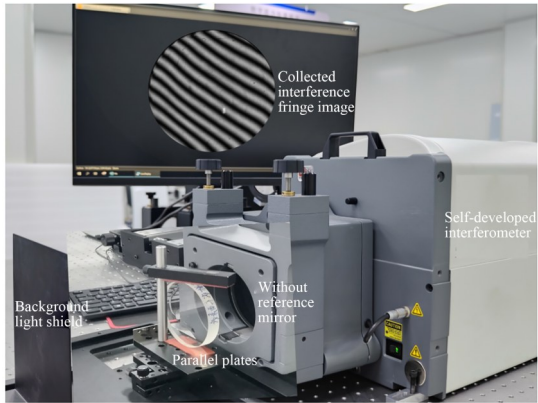


图6 菲索式干涉仪检测平行度实验装置图。

Fig. 6 Diagram of the experimental setup for detecting parallelism by Fischer-type interferometer

图7所示为区域生长测量结果,其中(a)为CCD采集的折射率为1.52的平板玻璃的自干涉条纹图,(b)为利用区域生长算法对干涉条纹图进行分割,(c)为提取出测量口径80 mm的干涉条纹图,并统计出明条纹数目。从图中可以看出,该待测样品在口径为80 mm范围内共有9条干涉条纹,计算出的平行度为4.830″。

为验证该算法的正确性,使用ZYGO干涉仪对同一元件的平行度进行检测并对比结果。ZYGO公司生产的商用干涉仪是目前业界公认的精度最高、最权威的测量仪器之一。ZYGO的测量结果如图8所示,该待测样品的平行度为4.530″。

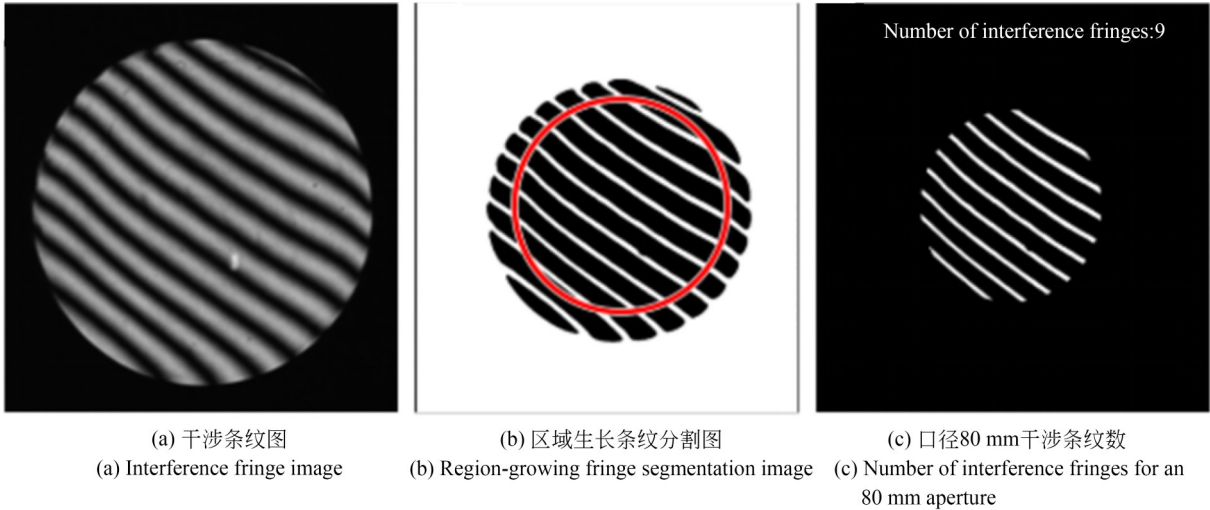


图7 区域生长测量结果

Fig. 7 Region-growing measurement results

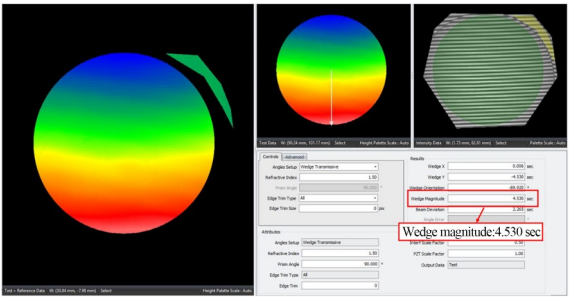


图8 ZYGO测量结果。

Fig. 8 ZYGO measurement results

为验证算法的鲁棒性以及在不同类型条纹的适用性,在实验过程中选取了5片厚度不同,尺寸不一的样品,且样品的自干涉条纹密度不同、

测量口径不同以及条纹形状不同的平板玻璃进行实验,各条纹图如图9所示,并将该算法结果与ZYGO结果进行对比,结果如表1所示。从结果可以看出该算法误差小于1″,表明该算法在误差允许范围内具有良好的鲁棒性,且对不同类型的条纹有很好的适用性,可以达到实际应用要求。

该算法的误差主要来源于测量环境误差和测量系统误差。测量过程中空气流动和外界振动等会使干涉条纹出现抖动、模糊等情况,给条纹数目统计带来困难;CCD相机的分辨率会影响条纹的成像质量,分辨率不足会无法清晰分离相邻的条纹。

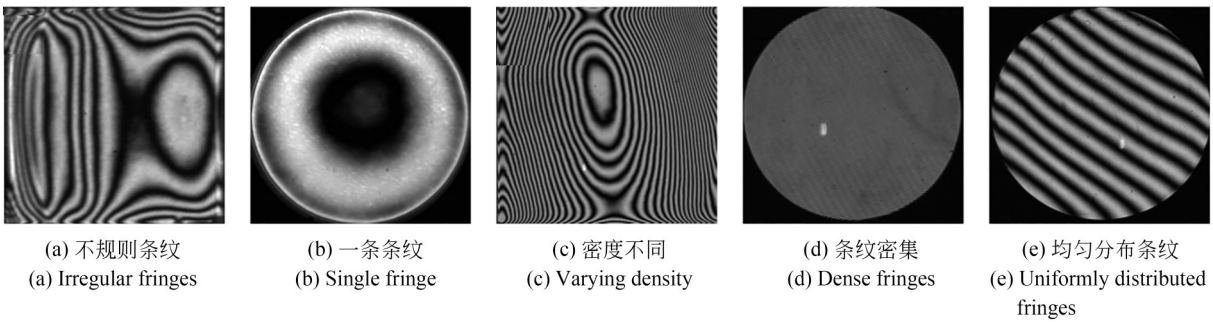


图9 不同类型条纹
Fig. 9 Different types of fringes

表 1 不同条纹密度被测件所提算法与 ZYGO 结果对比

Tab. 1 Comparison of the proposed algorithm results with ZYGO results for different fringe densities

Fringe types	Measured object's aperture D/mm	Number of interference fringes within the measurement aperture m/Strip	Proposed algorithm $\theta/''$	ZYGO interferometer $\theta/''$	Error $\theta/''$	Percentage error
(a)	27	5	7.951	8.255	0.304	0.037
(b)	45	1	0.954	0.882	0.072	0.082
(c)	65	23	15.193	14.672	0.521	0.036
(d)	75	109	62.400	62.841	0.441	0.007
(d)	45	66	62.972	62.841	0.131	0.002
(e)	80	9	4.830	4.530	0.300	0.066
(e)	45	5	4.771	4.530	0.241	0.053

6 结 论

针对样品平行度的测量,本文提出一种利用区域生长算法对图像进行分割处理的干涉测量方法。使用菲索干涉仪采集样品的自干涉条纹,利用区域生长算法对采集的自干涉条纹图进行图像分割,统计出干涉条纹数目,从而计算出平行度。实验结果表明:经过多次测量,该方法与 ZYGO 干涉仪测量结果相比较,其平行度差值小于 1",验证了该算法的有效性,且该方法可以方便快速地对平板玻璃的平行度进行测量,避免了繁琐的光路调试过程,同时测量过程中存在较小的误差,具有良好的应用价值。

参考文献:

[1] 柯金昌. 平板玻璃的平行度快速检测研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2012: 8-15.
KE J C. Study on Rapid Detection of Parallelism of Flat Glass[D]. Fuzhou: Fujian Normal University,

作者贡献声明:

王明军:获取资助,指导;
黄一凡:论文构思,数据管理,调查研究,方法论,软件,验证,初稿写作;
刘世杰:论文构思,指导,审核与编辑写作;
李梁玮:调查研究,初稿写作;
李蓬勃:调查研究,初稿写作;
李俊达:调查研究,初稿写作;
吴福林:论文构思,指导,提供资源,项目管理;
徐学科:论文构思,提供资源;
邵竹锋:论文构思,指导。

2012: 8-15. (in Chinese).
[2] 柯金昌, 梁秀玲. 基于 MATLAB 的平板玻璃不平行度快速检测设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34 (12): 92-96.
KE J C, LIANG X L. Design of rapid detection of

- flat glass non-parallelism based on MATLAB [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2011, 34(12): 92-96. (in Chinese)
- [3] MOONA G, SHARMA R, KIRAN U, *et al.* A comparative investigation for flatness and parallelism measurement uncertainty evaluation using laser interferometry and image processing [J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2024, 31(1): 261-267.
- [4] 王之江. 光学技术手册-上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 798-799.
WANG Z J. *Handbook of Optical Technology-Volume I* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 798-799. (in Chinese)
- [5] 吴新民. 光干涉测试中的抗振技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002: 5-20.
WU X M. *Research on Anti-Vibration Technology in Optical Interference Testing* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002: 5-20 (in Chinese).
- [6] 贺和好, 叶露, 周兴义, 等. 平行度测试仪原理及其测量精度分析[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 52-56.
HE H H, YE L, ZHOU X Y, *et al.* Theory and precision analysis of testing apparatus of parallel depth [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(5): 52-56. (in Chinese)
- [7] DE GROOT P, BIEGEN J, CLARK J, *et al.* Optical interferometry for measurement of the geometric dimensions of industrial parts [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 3853-3860.
- [8] ZHAO J L, SANG Y, DUAN F H, *et al.* High-precision surface parallelism measurement using digital image correlation method [J]. *Optical Engineering*, 58(9): 1.
- [9] SHARMA S, NYSTEN J, LASSILA A, *et al.* Phase-stepping interferometry for parallelism measurement of step gauge faces [J]. *Metrologia*, 2023, 60(5): 055004.
- [10] 张立颖. 平行度检测仪的分析及研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2006: 1-28.
ZHANG L Y. *Analysis and Research on Parallelism Detector* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 1-28 (in Chinese).
- [11] 曲卫东, 雷萍, 薛挺, 等. 大口径平行光管用于光轴平行度测量的实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S2): 1528-1529.
QU W D, LEI P, XUE T, *et al.* Realization of large-aperture collimator to measure of optical axis parallelism [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(S2): 1528-1529. (in Chinese)
- [12] 古万煜, 史铿鸿, 王紫薇, 等. 基于彩色图像合成的互补线移条纹高动态范围三维测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(22): 3288-3299.
GU W Y, SHI K H, WANG Z W, *et al.* High dynamic range 3D measurement with complementary line-shifting strips based on color image synthesis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(22): 3288-3299. (in Chinese)
- [13] 康乐谦, 杨鹏程, 吕秋娟, 等. Tsallis 相对熵引导的包裹相位修补[J]. 光学精密工程, 2024, 32(8): 1130-1139.
KANG L Q, YANG P C, LÜ Q J, *et al.* Wrapping phase repair method based on Tsallis Relative Entropy evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(8): 1130-1139. (in Chinese)
- [14] 林旺, 贾宏志. 平行平板平行度的检测[J]. 光学仪器, 2016, 38(1): 16.
LIN W, JIA H Z. Parallelism detection of parallel flat [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(1): 16. (in Chinese)
- [15] M KERBYAN, A GYULASARYAN, S SOGHOMONYAN, *et al.* An interference method for measuring parallelism of miniature optical components [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(10): 808-813.
- [16] LIN S T, YE H S L, TRINH X H. Low-coherence phase-shifting shearing interferometer for measuring parallelism of parallel surfaces of transparent samples [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106155.
- [17] 兰斌, 冯国英, 张涛, 等. 用于透明平板平行度和均匀性测量的单元件干涉仪[J]. 物理学报, 2017, 66(6): 355-364.
LAN B, FENG G Y, ZHANG T, *et al.* A single-element interferometer for measuring parallelism and uniformity of transparent plate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(6): 355-364. (in Chinese)
- [18] 王妍, 王履程, 郑玉甫, 等. 基于区域生长的极光图像分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(23): 190-195, 212.

- WANG Y, WANG L C, ZHENG Y F, *et al.* Aurora image segmentation method based on region growing [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(23): 190-195, 212. (in Chinese)
- [19] 王福斌, 刘贺飞, 王蕊, 等. 线结构光条纹中心亚像素自适应提取算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(3): 350-356.
- WANG F B, LIU H F, WANG R, *et al.* Sub-pixel adaptive center extraction of line structured light stripe[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(3): 350-356. (in Chinese)
- [20] 周战荣, 张清华, 王莲芬, 等. 干涉条纹边缘检测方法的比较与改进[J]. *光学技术*, 2007, 33(S1): 133-134.
- ZHOU Z R, ZHANG Q H, WANG L F, *et al.* Improvement and comparison of algorithms for interference fringe edge detection[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 133-134. (in Chinese)
- [21] 曲阳, 曹显莹, 孙纪勃. 基于图像识别的干涉条纹计数方法研究[J]. *物理通报*, 2021(S1): 129-133, 136.
- QU Y, CAO X Y, SUN J B. Research on interference fringe counting method based on image recognition[J]. *Physics Bulletin*, 2021(S1): 129-133, 136. (in Chinese)
- [22] 杨庆江, 杨硕, 王卫鑫. 光干涉位移测量的 Sobel 改进算法[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2020, 30(2): 183-186.
- YANG Q J, YANG S, WANG W X. Improved Sobel algorithm for optical interference displacement measurement [J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2020, 30(2): 183-186. (in Chinese)

作者简介:



王明军(1979—),男,陕西旬阳人,博士,教授,博士生导师,2001年于陕西理工大学获得学士学位,2004年和2008年于西安电子科技大学获得硕士和博士学位,主要研究方向为激光散射与传输、激光雷达和光电信号检测等方面的研究。E-mail:wmjxd@aliyun.com



黄一凡(1998—),女,陕西渭南人,硕士研究生,2021年于陕西科技大学获得学士学位,主要研究方向为半导体高效、高精度检测方面的研究。E-mail:yifan_huang1006@163.com