

基于 Matlab 图像处理的光学干涉实验测量研究

薛瀚宸^{1,2} 童童¹ 张俊武¹ 高博¹ 毛胜春¹ 翟立朋¹

(¹ 西安交通大学物理学院, 大学物理国家级实验教学示范中心, 陕西 西安 710049;

² 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

摘要 文章基于 Matlab 软件及图像处理技术, 编写了简明且易于操作的 GUIDE 交互界面, 对光学实验中静态实验测量和动态实验测量情况下拍摄的干涉条纹图样, 分别进行计算处理并完成实验测量目标。图像处理程序采用了高斯模糊、二值化等方法凸显重要信息, 利用算法构建表面三维图亦或实现条纹移动特征的探测、建立三维模型, 精确计算出相应实验结果。此方法适用于各种复杂的实验测量情景, 为光学干涉实验测量实验教学创新设计提供了一种可视化的思路。

关键词 光学; 干涉; Matlab; GUI; 图像处理; 图像测量

RESEARCH ON OPTICAL INTERFERENCE EXPERIMENT MEASUREMENT BASED ON MATLAB IMAGE PROCESSING

XUE Hanchen TONG Tong ZHANG Junwu GAO Bo MAO Shengchun ZHAI Lipeng

(¹ School of Physics, National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049;

² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049)

Abstract Based on Matlab GUIDE software and image processing technology, a concise and easy to operate GUIDE interactive interface was compiled to calculate and process the interference fringe pattern images taken in the case of static and dynamic optical experimental measurements. The experimental measurement objectives were completed. The image processing program uses Gaussian blur, binarization and other methods to highlight important information, and further uses the algorithm to construct a three-dimensional surface map, realize the detection of fringe movement characteristics or establish a three-dimensional model, and accurately calculate the corresponding experimental results. This method is suitable for various complex experimental measurement situations, and provides a visualized idea for the innovative design of optical interference experimental measurement experimental teaching.

Key words optics; interference; Matlab; GUI; image processing; image measurement

光的干涉现象广泛应用于各个领域, 其中, 根据光的特性实现物理参量精确测量的案例数不胜数。基础物理实验作为本科生实验教学的入门课程, 涵盖了数个利用光学干涉现象对距离、位移、角度进行测量的实验, 这些光学实验可按照实验测量过程划分为静态实验与动态实验。静态实

验中, 测量过程中光路、样品均不发生改变, 通过测量光强的分布得到相关物理参数; 动态实验中, 当光路、样品发生变化时, 测量光强等参数的变化的趋势, 并研究相关物理量。

基础物理光学类实验中, 斜劈空隙夹角的测量与牛顿环曲率的测量作为典型的静态实验, 传

收稿日期: 2022-01-25

基金项目: 2020 年西安交通大学本科教学改革研究项目(拔尖专项)(20BJ01Z)。

通讯作者: 童童, 女, 工程师, 主要从事物理实验教学和研究工作, tongtong_phy@xjtu.edu.cn。

引文格式: 薛瀚宸, 童童, 张俊武, 等. 基于 Matlab 图像处理的光学干涉实验测量研究[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 133-137.

Cite this article: XUE H C, TONG T, ZHANG J W, et al. Research on optical interference experiment measurement based on Matlab image processing[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 133-137. (in Chinese)

统的测量方法颇为繁琐且仅记录了一个维度上的数据信息,处理数据时利用的逐差算法又降低了数据的利用率,造成有效信息的浪费^[1]。目前已有研究小组使用 Matlab 软件对 CMOS 拍摄的干涉图样进行处理,取得了较高精度的实验结果^[1-6,8]。本文基于 Matlab 平台,结合图像处理与数值运算方法根据二维图像构建出表面三维图,实现样品参数的精确测量。动态实验亦在大学物理实验中占有重要地位,本文以压电陶瓷电压相位曲线测量和等倾干涉干涉条纹三维模型构建作为示例,展示了图像处理与数字运算方法在动态实验测量中的极大应用前景。

1 静态实验测量

在光学干涉测量实验过程中,实验者测量样品的干涉图样并进行数据处理得出相关结果,光路在测量的过程中未经调整,此即静态实验测量,典型的样例有测定牛顿环的曲率半径。传统的测量方法通过测量干涉条纹的宽度半径等几何参数来计算出某结构(如空气薄膜)表面的梯度与曲率半径,但该方法仅仅适用于厚度分布规律的样品,且仅利用了一个维度(一条直线)上的数据信息。相比之下,采用 CMOS 拍摄完整的干涉图像并进行处理的方案更具优越性,处理过程中利用信息量远超传统方法。凭借计算机强大的运算能力,Matlab 与 GUIDE 人机交互程序可批量处理图像数据,运用干涉条纹计算能够提取出复杂样品表面的梯度、曲率信息。

1.1 图像处理及数据计算方案

高像素密度的 CMOS 相机结合优良的成像系统能以高分辨率记录干涉条纹信息。通过处理图像定位到亮纹或暗纹的骨骼线,计算机根据骨骼线进行插值运算构建出包含样品厚度信息的表面三维图,进行后续数据处理及数学运算。若均匀样品的光学面分别为平面与曲面,则样品的厚度分布将直接反映样品曲面的形状,进一步运算便可得出样品表面各点的梯度与曲率信息。

传统的位图由像素构成,可读取为矩阵,对图像的处理亦可等效为矩阵运算。为了能从图片中准确地提取出所需要的信息,首先需要对图像进行预处理以排除不必要的噪声。导入图片后,第一步使用 `rgb2gray` 函数将读入的彩色图片转化为黑白图片,除去与明度信息无关的颜色信息,压

缩数据量。第二步为了排除灰尘与背景光分布因素对后续工作的影响,使用 `imfilter` 函数结合 `gaussian` 函数对图片矩阵进行小范围与大范围的卷积运算(进行高斯模糊),分别得到仅模糊灰尘等高频信息的图片与模糊干涉条纹、反映整体光照分布的图片,两张图片相除,得到无污点、整体曝光均匀的预处理图像。第三步使用 `im2uint8` 函数对图像进行二值化,阈值可视实际情况取为矩阵中位数或矩阵最大值最小值之间的任一值。预处理后的图像仅有纯黑与纯白的像素,对比分明,方便接下来的骨骼线选取工作以准确构建样品表面三维图,如图 1 所示。

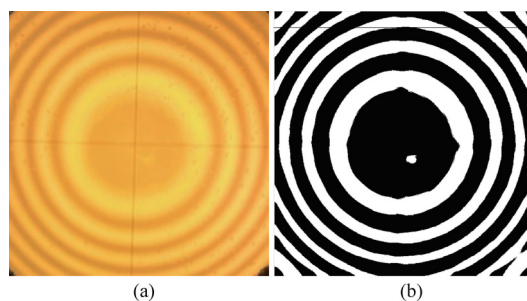


图 1 原图与预处理后的牛顿环照片
(a) 牛顿环原图;(b) 预处理后的牛顿环图像

考虑到实际情况的复杂性,程序采用了手动与自动结合的选取骨骼线方案确定骨骼线。在预处理后的图片上调用 `ginput` 函数手动点击几条亮纹或暗纹线粗选骨骼线中心点,程序分析每个粗选参考点附近条纹分布情况后计算出修正后的骨骼线中心点,这些骨骼线中心点能极好地反映干涉条纹的位置及分布,如图 2 所示。调用 `cftool` 扩展包的 `fit` 函数基于各组骨骼线参考点进行插值运算绘制表面三维图,如图 3 所示。在绘制表面三维图之前需预先对 CMOS 进行标定,确定图片中单个像素对应的实际尺寸,结合介质折射率、介质通光次数、光波长等信息,统一所有变量单位,执行插值计算操作。插值使用的薄板样条插值法(TPS)能得到连续可导且导数连续的结果,较为准确地还原样品表面的几何特征。

在进行梯度与曲率计算时,首先需对插值结果离散化,即将表面三维图转换为格点组成的矩阵,提取所需矩阵元素,进一步执行梯度与曲率计算。使用 `ginput` 函数选择梯度与曲率的计算点后,取选定点周围 11×11 的插值结果生成矩阵计算梯度与曲率,同时参考矩阵中心 5×5 的计算值,输出并显示最终的梯度与曲率结果,如图 4 和图 5 所示。

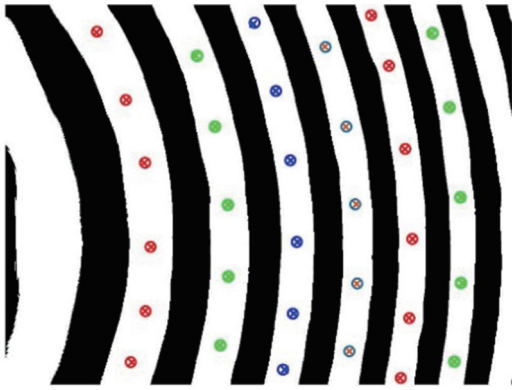


图2 骨骼线选取
(圆为粗选点,叉为修正点)

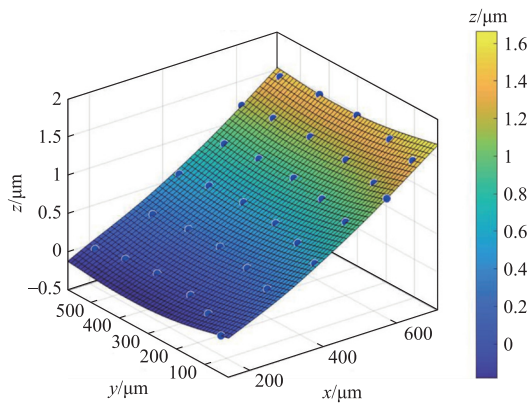


图3 表面三维图

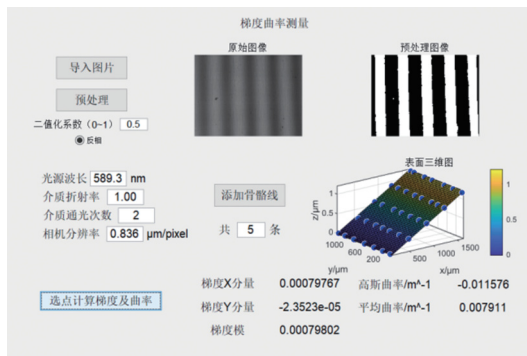


图4 斜劈表面某点斜率与曲率运算结果

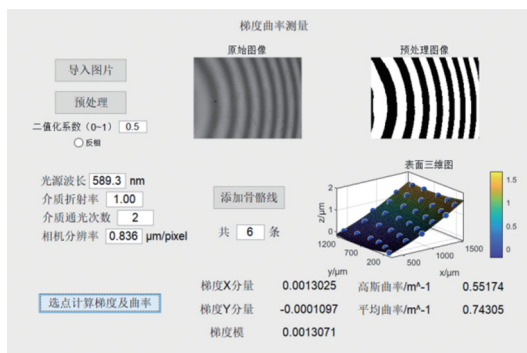


图5 牛顿环表面某点斜率与曲率运算结果

传统的测量方法仅适用于一些规则样品的测量,对于不同的样品的测量需应用不同的测量公式,泛用性极差。而上述图像处理法具有极广的泛用性,对于不同类型曲面的样品,只要能够拍摄到干涉条纹,即可利用干涉条纹照片构建出表面三维图,进而得到三维图上任意位置的斜率与曲率参数。

1.2 实验结果分析及对比

测量斜劈空气隙梯度时,利用传统方法测量结果为 $k = (7.90 \pm 0.05) \times 10^{-4}$,使用新测量方法选取九个测量点得到测量结果为 $k = (7.91 \pm 0.06) \times 10^{-4}$,与传统方法测得的结果高度符合。

表1 斜劈空气隙梯度采样测量数据

测量次数	梯度模 gradient
1	0.000794
2	0.000795
3	0.000790
4	0.000785
5	0.000785
6	0.000788
7	0.000802
8	0.000792
9	0.000785

测量平凸透镜的曲率分别使用了传统方法与新测量方法。实验所测平凸透镜标称曲率 $\rho_0 = 1/R_0 = 0.70 \text{ m}^{-1}$,使用传统方法测得平凸透镜的曲率为 $\rho_T = 0.72 \pm 0.01 \text{ m}^{-1}$,使用新测量方法选取十六个测量点得到测量结果为 $\rho_E = 0.71 \pm 0.03 \text{ m}^{-1}$,相比传统方法测量结果涨落稍大,测量结果仍与标称值符合。

表2 平凸透镜曲率采样测量数据

测量次数	曲率 m^{-1}	测量次数	曲率 m^{-1}
1	0.673	9	0.721
2	0.668	10	0.670
3	0.716	11	0.756
4	0.740	12	0.676
5	0.686	13	0.759
6	0.695	14	0.706
7	0.732	15	0.692
8	0.753	16	0.733

实验测量精度的上限取决于拍摄图像的分辨率,本次实验图片的尺寸统一为 2048×1536 像素,由分辨率引入的误差不超过 $1/1536$,所以前文

测量结果的精度有三位有效数字。基于图像的分析测量必定离不开光学成像系统,而光学成像系统总是存在各种像差,其中,图像畸变(图像边缘发生扭曲)严重影响图像测量的精度。梯度与曲率的计算对畸变极其敏感,若使用成像畸变大的显微镜进行拍摄并测量需注意对图像作畸变修正,否则将引入显著的误差。除此之外,标定的精度能直接影响测量结果的精度,故需重复、精确地进行标定。当前程序未能实现自动确定骨骼线,需手动放置参考点,在使用计算机程序对手动放置的参考点进行修正,在这一处理中,图片中大污点等尚未消除的噪声会影响计算机修正结果的准确性,引入一定误差。

2 动态实验测量

许多光学实验在实验过程中会对光路进行调整,通过观测干涉条纹的变化来计算出关注的物理量。对于特定的实验,使用图像处理技术并加以计算分析能简单快捷地处理好这一类实验的数据,得出精确的结果。压电陶瓷电压相位曲线测量正是动态实验测量的一个典型样例。激光器发出激光经由扩束装置形成准直光束,准直光束由分光镜分成两束,一束由静止平面镜反射,另一束由固定在压电陶瓷上的平面镜反射,两束反射光发生干涉,将出现干涉条纹。压电陶瓷在电压改变时发生位移,两束光的光程差便会发生变化,干涉条纹将发生移动。对干涉条纹的移动情况进行分析,可得出压电陶瓷电压相位曲线。

本文动态实验测量部分将首先以压电陶瓷电压相位曲线测量实验作为典例加以分析讨论,随后以构建等倾干涉干涉条纹三维模型为例展现 Matlab 图像处理程序在光学实验中的更多可能。

2.1 图像处理及数据计算方案

压电陶瓷电压相位曲线测量实验中,干涉条纹随着压电陶瓷上施加电压的变化而移动,CCD 高频次地记录下不同电压下条纹的分布图像,将图像编号并导入 Matlab 进行分析。压电陶瓷的位移量与干涉条纹移动量直接相关,因此处理该实验图片数据的关键为测定各干涉条纹的位置。将图片进行二值化与细化操作后,能够得到各条干涉条纹的位置信息,但是采用细化操作算法会进行多次迭代,耗时极高,本文使用了另一种更为

简易且不失一般性的方法对图片进行分析。

导入需要分析的图片后,预处理得到二值化图片,程序自动根据图像的尺寸选择数条进行分析的参考线,沿着参考线侦测亮度突变的参考点,根据参考点的数量大致判断条纹的走向,并选择与条纹更为垂直、亮度突变次数更多的参考线进行分析,确保此条参考线能经过数条亮纹或暗纹。分析出各张图片各条参考线上亮纹中心与暗纹中心的位置后,比较各图像同一参考线上亮纹中心与暗纹中心的位移,得知条纹的位移,结合条纹的宽度,得出两张图片中条纹相位相对变化。最后将计算所得数据进行简单处理绘图,即得压电陶瓷的电压相位曲线,如图 6 所示。

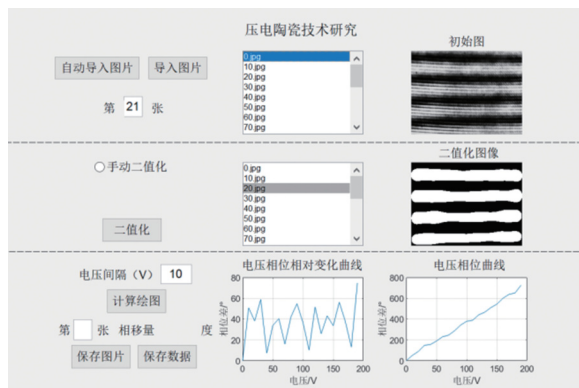


图 6 Matlab GUIDE 界面:压电陶瓷电压相位曲线测量

2.2 实验结果分析及对比

尽管在实验过程中实验装置受到外界振动、空气湍流等影响条纹抖动严重,导致偶尔相邻两张图片相位变化较小甚至为负,需要多次重复实验。整体上,压电器件的相位变化值随着电压的增大而线性增大,符合压电器件在线性区域的工作特性。该程序能够对横向条纹、竖向条纹、斜向条纹图片集进行分析,计算得出压电器件的压电模量分别为 3.354nm/V , 3.110nm/V , 3.547nm/V , 相对误差分别为 $E_1 = 4.8\%$, $E_2 = 2.8\%$, $E_3 = 11\%$, 与标称值 3.200nm/V 相符。

2.3 等倾干涉中干涉条纹三维模型构建

与 2.1 节中压电陶瓷电压相位测量实验相似,在迈克耳孙干涉仪等倾干涉实验中,随着干涉臂长度的改变,干涉图样将出现亮暗环吞吐的现象。借助 Matlab 软件对实验中拍摄的一系列照片进行分析处理,可提取出每张照片中干涉环的信息并构建出形象的干涉条纹三维模型。

图7为实验中拍摄到的一系列干涉图样以拍摄时干涉臂移动长度作为 z 轴叠加得到的图片,图8为Matlab从各图片中提取并使用图7相同的规则绘制的暗纹三维模型。可以看出,共有7组暗纹随着干涉臂的移动而发生吞吐。若干涉臂的变化为随时间变化的待测量,使用上述类似的方法能以极高的灵敏度实现待测量变化的探测——甚至包括引力波。

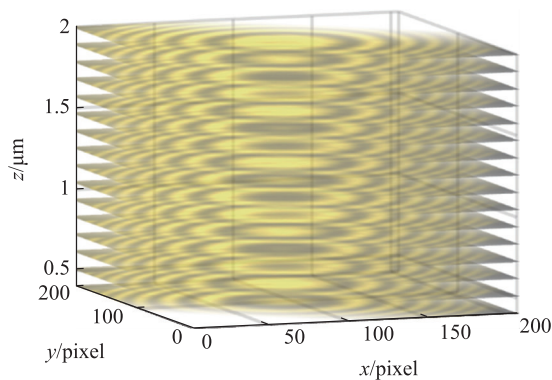


图7 等倾干涉图样叠加图

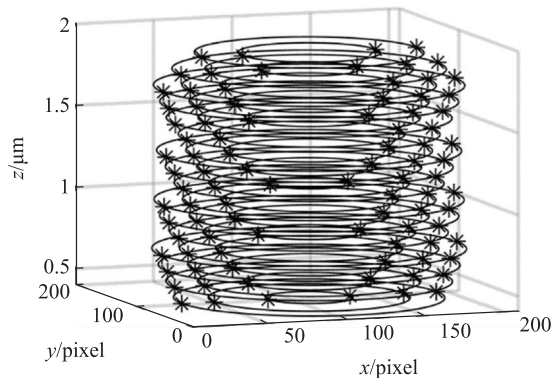


图8 等倾干涉图样暗纹三维模型

3 结语

本文基于Matlab图像处理对光学干涉实验数据处理进行了研究和实践,测量斜劈空气隙梯度、牛顿环曲率、压电陶瓷电压相位曲线及构建等倾干涉干涉条纹三维模型,计算结果精确。新的实验测量方法对于静态测量实验泛用性强,对于动态测量实验抗干扰性好。新的测量方法在保证实验结果可靠性的同时,能够显著提高测量效率,适合目前基础物理实验中光学干涉实验创新发展的要求。

参 考 文 献

- [1] 王红理,俞晓红,肖国宏. 大学物理实验[M]. 西安:西安交通大学出版社,2014.
- [2] 朱晓梅,向伟铭,姜向东. 牛顿环实验的数据处理改进及图像分析[J]. 物理与工程,2019,29(3): 55-58, 62.
ZHU X M, XIANG W M, JIANG X D. Data processing's improvement and image analysis of newton ring experiment [J]. Physics and Engineering, 2019, 29(3): 55-58, 62. (in Chinese)
- [3] 梁燕旋,梁建新,傅征,等. 基于 Mathematica 数学软件的玻尔共振实验综合研究[J]. 大学物理,2019,38(4): 37-41.
LIANG Y X, LIANG JX, FU Z, et al. A comprehensive analysis of Bohr resonator experiment based on Mathematica simulation[J]. College Physics, 2019, 38(4): 37-41. (in Chinese)
- [4] 王晴,杜春正,蓝婕婕,等. 应用 MATLAB 与 CCD 测量牛顿环曲率半径[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版),2019,45(4): 71-73.
WANG Q, DU C Z, LAN J J, et al. Measurement of newton's ring curvature radius by MATLAB and CCD[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2019, 45(4): 71-73. (in Chinese)
- [5] 潘振邦,王明,谭鑫,等. 光的等厚干涉图像数据处理系统[J]. 大学物理实验,2019,32(5): 84-87.
PAN Z B, WANG M, TAN X, et al. Optical isopach interference image data processing system[J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(5): 84-87. (in Chinese)
- [6] 宫德维,王晓鸥,赵远. 迈克耳孙干涉在电场-应变效应测量中的应用[J]. 大学物理,2019,38(8): 46-49.
GONG W D, WANG X O, ZHAO Y. Measuring electric field-strain effect by Michelson interferometer[J]. College Physics, 2019, 38(8): 46-49. (in Chinese)
- [7] 欧艺文,张飞,成纯富. Matlab GUI 在迈克尔逊干涉实验教学中的应用[J]. 创新创业理论与实践,2020,3(24): 13-15.
OU Y W, ZHANG F, CHENG C F. Application of Matlab GUI in Michelson interference experiment teaching[J]. The Theory And Practice Of Innovation And Entrepreneurship, 2020, 3(24): 13-15. (in Chinese)
- [8] 井晨睿,亓协兴,马宝红. Matlab 在牛顿环实验数据预处理中的应用[J]. 教育教学论坛,2020,(52): 391-392.
JING C R, QI X X, MA B H. Application of Matlab in Newton's ring experiment[J]. Education teaching forum, 2020, (52): 391-392. (in Chinese)
- [9] 侯森春,王凤鹏,陈莹,等. 基于无镜头数码相机的牛顿环实验[J]. 大学物理实验,2020,33(5): 1-4.
HOU M C, WANG F P, CHEN Y, et al. Newton's ring experiment based on lensless digital camera[J]. Physical Experiment of College, 2020, 33(5): 1-4. (in Chinese)