

文章编号: 1005-5630(2013)01-0065-05

基于 MATLAB 的球面干涉仪图像处理系统设计*

兰明强, 林 健, 王 敏, 詹明媚

(福建师范大学 物理与光电信息科技学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 采用泰曼-格林干涉原理设计研制了一种非接触在线球面干涉仪, 该干涉仪中的 CCD 摄像头可产生分辨率比较高的干涉条纹图像。重点介绍了用 MATLAB 图像处理软件对该干涉条纹图像进行数字化处理的基本方法, 通过对干涉条纹图像进行预处理、提取骨架, 最后用 Zernike 多项式拟合出被检球面的波面函数, 计算出 PV 和 RMS。通过 MATLAB 编程实现了对该球面干涉仪检测信号的自动化处理。

关键词: 泰曼-格林球面干涉仪; 干涉条纹图像; Zernike 多项式; PV; RMS; 自动化处理

中图分类号: TH 744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.01.013

The image processing system design of spherical interferometer based on MATLAB

LAN Mingqiang, LIN Jian, WANG Min, ZHAN Mingmei

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine,
School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A kind of non-contact online spherical interferometer has been designed and developed with Twyman-Green interferometry principle in the laboratory. The CCD camera lens in this interferometer can produce relatively high resolution image of the interference fringe. This paper mainly focuses on the basic method for using MATLAB image processing software to digitize the interference fringe, and through the pretreatment of this interference fringe and the extraction of the skeleton, finally the wavefront function of the detected spherical surface was fitted by adopting the Zernike polynomial; through the MATLAB programming, the automated processing of the detection signal of this spherical interferometer was realised.

Key words: Twyman-Green spherical interferometer; interference fringe; Zernike polynomial; PV; RMS; automated processing

引 言

干涉仪以其高的测量精度在现代高科技中扮演着重要的角色, 而且由于其非接触无损在线检测使其在光学镜片加工车间中更具有优越性。随着目前电子产品对光学元件需求的快速增长, 光学零件的需求数量迅速提高, 同时对产品的性能指标也有了更高更严格的要求, 这就对干涉仪的自动化检测质量和速度提出了更高的要求。虽然目前很多国外进口的干涉仪的性能和技术可以满足这一需求, 但由于国外干

* 收稿日期: 2012-05-12

基金项目: 福建省科技计划重点资助项目(2009H0020)

作者简介: 兰明强(1986-), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事光电信息处理方面的研究。

涉仪价格昂贵而促使许多光学冷加工企业迫切需要自主研发自动化程度相对较高的干涉仪,以实现既能降低生产成本又能提高生产效率的双赢经营理念。在干涉仪器中,干涉图像的采集和处理是其自动化检测的核心环节,直接决定着干涉仪性能的优劣。针对本实验室研制的干涉仪采集到的干涉图像用 MATLAB 软件进行数字化的处理,最后用 Zernike 多项式拟合出被检球面的波面函数,通过 MATLAB 编程实现对该球面干涉仪检测信号的自动化处理。

1 干涉仪的原理与结构

非接触在线干涉仪是在泰曼—格林干涉(图 1)的理论基础上研制而成,图 2 为实验室研制的干涉仪图片。图 3 为干涉仪的基本结构简图,右边虚线框内为光线传播系统,主要由激光器、空间滤波器、扩束镜、分光棱镜、样板透镜、待测镜片、接收屏等元件组成,其主要工作原理是把光学样板紧靠在待测镜片底座的上端面上,从激光器射出的细平行光经过滤波器打到扩束镜的前端镜片上,光束被扩束到适应于检测口径的光束直径,然后光束入射到分光棱镜的半透半反表面上被分成两束光,一束光沿着光轴 x 方向射向光学样板的基准面上,经反射后返回,形成参考波前。另一束光沿光轴 y 方向射向待测镜片底座上待测镜片的基准面,经反射后返回,形成测试波前。参考波前与测试波前经分光棱镜汇合后形成干涉,接收屏处可以观察到干涉条纹。左边虚线框内为数据处理部分,数据采集卡把 CCD 接收到的干涉条纹数据存入计算机中^[1]。

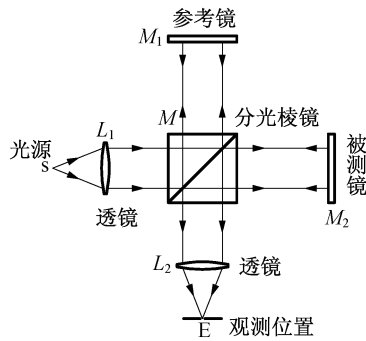


图 1 泰曼—格林干涉原理

Fig. 1 Twyman-Green interferometry principle

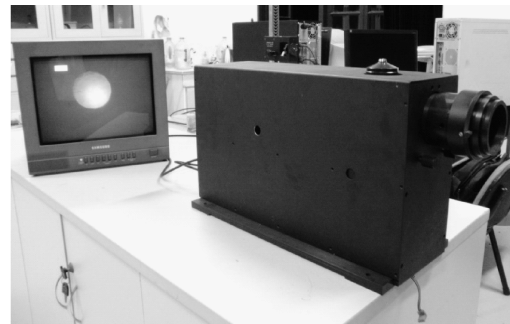


图 2 干涉仪样机图片

Fig. 2 Picture of interferometer prototype

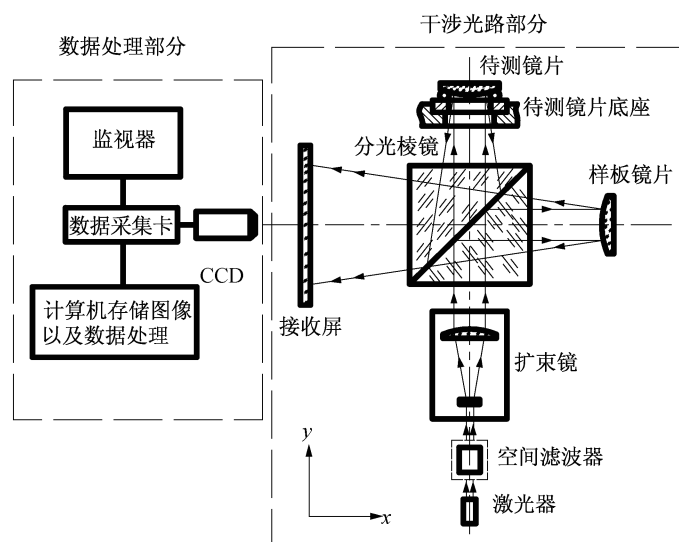


图 3 干涉仪结构简图

Fig. 3 Interferometer structure diagram

2 干涉仪图像处理系统设计

实验室研发的干涉仪的数据处理系统如图 4 所示,主要包括 7 大模块:干涉图像数据采集模块、干涉图像预处理模块、干涉图像骨架提取模块、干涉图像骨架修复模块、干涉条纹跟踪标记模块、Zernike 波面拟合模块以及面形偏差计算模块^[2]。这 7 大模块环环相扣,每一模块的处理都是为下一模块做准备打基础。后 6 个模块全是用 MATLAB 编写。

2.1 干涉图像数据采集模块

实验室使用的数据采集卡型号为 DH-CG300, DH-CG300 是基于 PCI 总线的高性能视频采集卡,可进行高质量彩色/黑白图像的实时采集。DH-CG300 可将输入的彩色或黑白视频信号,经数字解码器、模/数转换器进行比例缩放、裁剪、采集、色度空间变换等处理,通过 PCI 总线传送到 VGA 卡上实时显示或传送到计算机内存中实时存储^[3]。图 5 为本实验室研发的干涉仪采集到的三幅不同曲率半径 R 镜片的干涉条纹图像。

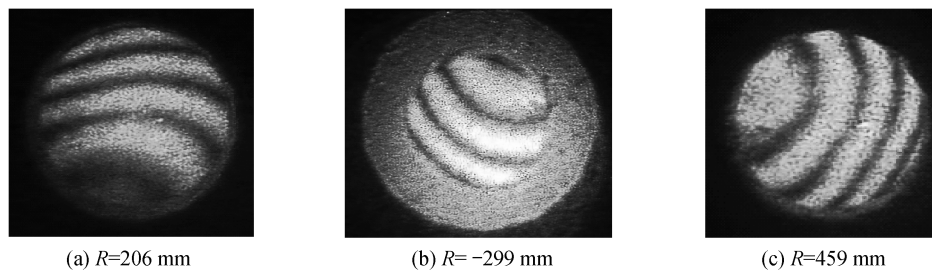


图 5 干涉图像

Fig. 5 Interference image

2.2 干涉图像预处理模块

干涉图像预处理工作是为下一步中轮廓提取做准备的,所以图像的预处理至关重要。干涉图像预处理模块主要的处理流程如图 6 所示。采集到的干涉图像中存在着一度度的噪声干扰,比如:振动和空气流动,所以滤波去噪是这一模块中非常重要的一步。在干涉仪的图像预处理中,灰度图像首先经过两次中值滤波(MATLAB 中的 medfilt2 函数^[4]);然后再经过一次自适应滤波(MATLAB 中的 wiener2 函数^[4]);最后利用小波去噪(MATLAB 中的 wrcoef2 函数),以获得含噪声较少的图像^[5]。图 7 为经过预处理模块后得到的干涉图像。

2.3 干涉图像骨架提取模块

干涉图像骨架提取模块就是通过数字图像处理技术提取干涉条纹的主干,为后面的波面拟合打下基础。这一模块中图像依次经过了开运算、膨胀、腐蚀、开运算、细化几个处理过程。其中细化是最关键的一步,它直接关系到后面的波面拟合质量。通过综合比较 Hilditch、Pavlidis、Rosenfeld 细化算法以及 Zhang 和 Suen 提出的 ZS 算法之后,最终系统采用 ZS 算法细化条纹^[6]。图 8 为细化模块处理的结果。

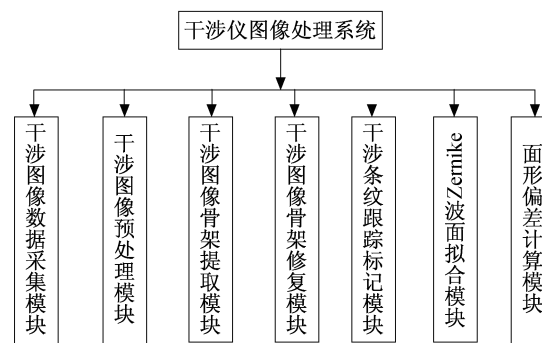


图 4 干涉仪图像处理系统的构成

Fig. 4 The components of interferometer image processing system

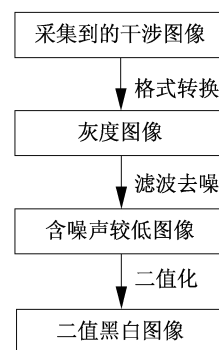


图 6 预处理流程图

Fig. 6 Pretreatment flowchart

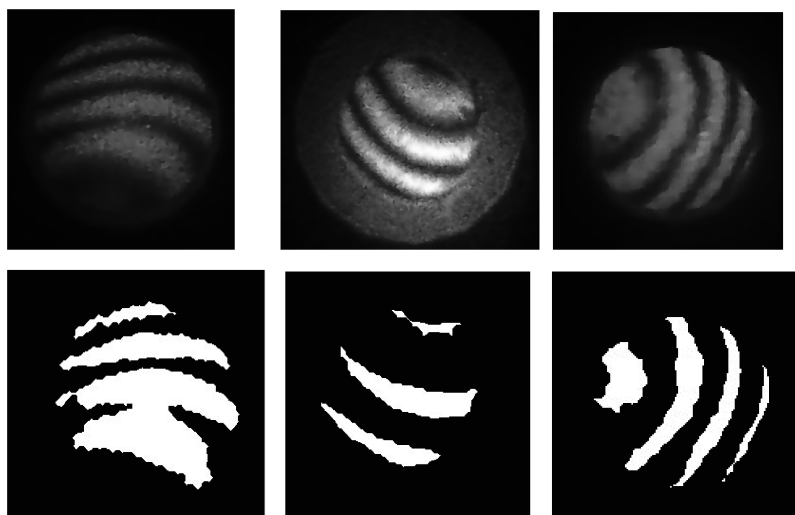


图 7 去噪图像和二值图像

Fig. 7 Denoising image and two value image

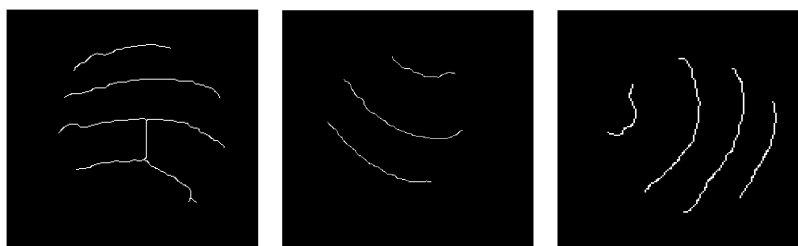


图 8 骨架图

Fig. 8 Skeleton image

2.4 干涉图像骨架修复模块

经过细化模块处理后的骨架图有时会出现分叉,这些分叉大致可以分为以下三种:十字分叉,三叉分叉,丁字分叉。选用一个 3×3 模块从左到右从上到下依次扫描整个骨架图像,首先找出这些分叉点,然后判断分叉点的类型,根据分叉点类型的不同做出不同的处理。一般扫描一次之后还会出现有分叉点,所以这一步需要 $2 \sim 3$ 次的连续扫描才能基本上删除这些分叉。骨架修复之后的图像如图9所示。



图 9 骨架修复图像

Fig. 9 Skeleton restoration image

2.5 干涉条纹跟踪标记模块

条纹级次的确定是处理单幅静态干涉图像很重要的步骤。计算机对细化后的条纹采点时,不能确定所采的点属于哪个干涉级次,所以必须对干涉条纹进行追踪并标记级次。本系统的条纹标记适用于无闭合的干涉条纹。具体标记方法如下:从第一行开始逐行扫描骨架图像,直到找到第一个灰度值为255的点(条纹像素点的灰度值为255,背景的灰度值为0),改变它的灰度值为某一灰度值(比如1),然后继续往

下扫描,如果遇到灰度值为 255 的点,判断其周围的 3×3 领域中是否存在灰度值不为 0 的点,如果存在则读取该灰度值并把该灰度值赋值给该点;若不存在,不改变灰度值,继续扫描完整幅图像,完成第一条条纹的标记。重复该方法,完成剩余的条纹的标记。这种标记方法一般需要多次重复扫描图像,才能保证每一灰度值为 255 的点都被标记到。

2.6 Zenike 波面拟合模块

干涉波面的拟合,就是对离散的干涉条纹上的数值进行数学处理,把这些包含着被测表面信息的干涉波面上的离散点拟合成一个与实际的干涉波面尽可能一致的波面函数。

在众多类似的研究中,绝大多数研究者最终都选择了 Zernike 多项式作为对被测光学波面拟合的基底函数系。理由如下:(1) Zernike 多项式在单位圆上正交;(2) Zernike 多项式自身所特有的旋转对称性,使它在光学问题的求解过程中,一般均具有良好的收敛性;(3) Zernike 多项式与初级像差有着一定的对应关系^[7]。这一部分的处理过程如图 10 所示。Zernike 多项式的拟合方法有最小二乘法、Gram-schmidt 正交法以及 Householder 变换法等,现采用稳定性比较好的 Gram-schmidt 正交法^[8]。图 11(a)~图 11(c)分别为图 5(a)~图 5(c)通过拟合模块得到的波面图。

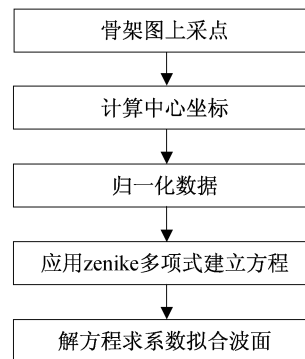


图 10 波面拟合流程图

Fig. 10 Wavefront fitting flowchart

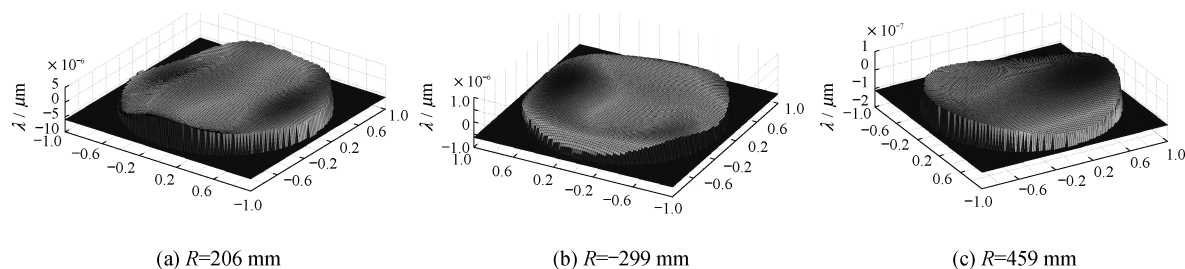


图 11 三维波面图

Fig. 11 The 3D wavefront

2.7 面形偏差计算模块

这一模块依据上面波面拟合的结果对面形偏差的两个指标进行计算,即镜片面形 PV 值以及 RMS 值两个指标。

PV 值表示待测波面相对于参考波面的峰谷值之差,用公式表示为:

$$E_{PV} = E_{\max} - E_{\min} \quad (1)$$

RMS 值表示待测波面相对于参考波面各点偏差 E_i 的均方根值,用公式表示为:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N E_i^2} \quad (2)$$

3 测量结果与分析

表 1 为实验室研制样机测试的三组数据,样机采用的激光器波长为 632.8 nm。

从表 1 的测量结果可以看出 PV 值和 RMS 值达到了 μm 级,根据光学测量方面的经验可知一个光圈大约相当于 0.5 个波长,那么根据上面测量的

表 1 样机测试数据

Tab. 1 The test data of prototype

干涉图	(a)	(b)	(c)
镜片类型	凸	凹	凸
曲率半径/mm	206	-299	459
PV 值/ μm	0.413 4	0.130 2	0.247 8
RMS 值/ μm	0.094 7	0.035 3	0.054 2

(下转第 74 页)

监听 TCP 502 端口的连接请求,最后调用函数 `mbserver_accept()`接收并产生一个新的线程处理连接,然后分析 `netconn_recv()`读取的报头并处理请求,等待请求成功或关闭连接。

5 结 论

介绍了在实时嵌入式操作系统 uC/OS-II 和 ARM7 内核的软硬件平台上,结合 Modbus/TCP 协议实现通信处理器模块信号传输的方法。将 uC/OS-II 实时操作系统移植到 ARM7 AT91R40008 系列的处理器内核上,再将嵌入式 TCP/IP 协议栈 LwIP 移植到该操作系统,实现了一种多线程的实时应用协议栈。在通讯应用层上,则在将 Modbus 信息帧嵌入到 TCP 帧中,分析研究 Modbus/TCP 协议通信结构模型,最终简单可靠地实现了嵌入式 Modbus/TCP 客户端/服务器端之间的通信。

参考文献:

- [1] 王海,张娟,朱晓阳,等. TCP/IP 协议族[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2011:300—319.
- [2] 王可鹏. 基于 Modbus TCP/IP 通信的实现[J]. 电脑知识与技术,2008,4(3):553—555.
- [3] 司马莉萍,贺贵明,陈明榜. 基于 Modbus/TCP 协议的工业控制通信[J]. 计算机应用,2005,25(S1):29—31.
- [4] 金青,戴胜华,欧阳劲松. 基于 Modbus/TCP 的工业以太网通信[J]. 仪器仪表标准化与计量,2006(1):22—24.
- [5] 宋玉贵,康婷颖. 基于 ZigBee 的天幕靶信号处理装置的设计与研究[J]. 光学仪器,2012,34(1):55—58.
- [6] 王晓鸣,王树新,张宏伟. 实时操作系统 uC_OS-II 在 ARM 上的移植[J]. 机电一体化,2007,13(1):56—58.
- [7] 阙大顺,王近涛. LwIP 协议在 uC/OS-II 系统上的移植与实现[J]. 舰船电子工程,2006,26(4):89—91.
- [8] DUNKELS A. TCP/IP 协议栈 LwIP 的设计与实现[M]. 焦海波,译. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:1—12.

~~~~~  
(上接第 69 页)

PV 值可以估算出三个干涉图的局部光圈  $\Delta N$  分别为:1.3、0.4、0.8,这个数值与直接用肉眼判定的局部光圈值基本上吻合,这就说明干涉图像的处理结果基本上达到了样机预期的目标。接下来要做的就是将本样机测量的数据与市场干涉仪测得的数据进行对比,经行全面的误差分析,做适当的改进,进一步提高精度。

## 4 结 论

本系统应用数字图像处理技术,通过 MATLAB 图像处理软件编程,实现了对本实验室研制的球面干涉仪检测信号(干涉图)的自动化处理,可以绘出三维波面图以及计算出被检镜片的面型数据 PV 值和 RMS 值。该算法相比空域相位测量法中的傅里叶变化(FFT)算法和空间载波相移法(SCPS)算法虽然在精度上略低一筹,但 SCPS 算法需要复杂的修正处理,而 FFT 算法需要大量复杂的计算,所以文中干涉图像处理算法相对简单。对目前大多数光学企业来讲,市面上现有的干涉仪由于价格昂贵、操作繁琐、体积庞大等原因仅仅使用在镜片的终检环节上,且不适合大批量的在线检测。而文中算法需要的设备简单,操作方便,可以更好地满足镜片加工企业大批量生产时非接触在线面形的检测要求。

## 参考文献:

- [1] 韩振华,林 健,卓金寨,等. 一种球面在线检测系统及其结构设计[J]. 光学仪器,2012,32(1):76—80.
- [2] 李全臣. 干涉图数据处理的一种方法[J]. 计量技术,1999,3(6):3—6.
- [3] 鄢静舟,雷 凡,周必方,等. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学 精密工程,1999,7(5):119—128.
- [4] 龚 纯,王正林. MATLAB 语言常用算法程序集[M]. 北京:电子工业出版社,2008:115—141.
- [5] WILLIAM K P. 数字图像处理[M]. 邓鲁华,张延恒,译. 北京:机械工业出版社,2005:158—433.
- [6] 朱 昊,解 波,黄振宇,等. 泰曼-格林干涉仪干涉条纹计算机图像处理试验系统[J]. 大学物理,2007,26(2):42—44.
- [7] 鄢静舟,雷 凡,周必方,等. 干涉图特征信息自动采集方法[J]. 光学技术,2000,26(1):70—75.
- [8] 张 伟,刘剑峰,龙夫年,等. 基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术,2005,3(5):674—677.