

学校编码: 10384
学号: 18220051301726

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

基于亚像素的干涉条纹精确定位
技术的研究

Study of Precise Location of Interference Fringe Centerlines
Based on the Sub-Pixel in Digital Image

宋爱群

指导教师姓名: 黄元庆 教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

基于亚像素的干涉条纹精确定位技术的研究

宋爱群

指导教师: 黄元庆 教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日

导师签名： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

干涉条纹处理方法作为激光干涉系统的核心，一直以来倍受人们的关注。在激光干涉测量中，测量精度在很大程度上取决于条纹信号处理方法。为达到微米甚至纳米级的测量精度，毫无例外的都需要对干涉条纹信号进行细分，细分的精度决定了测量精度。在条纹细分技术中，计算机软件法，是一种非接触的测量方式，它不需要对器件本身做任何的处理，具有测量快速、费用低、测量精度高等优点。而迈克尔逊干涉仪作为许多现代干涉仪的原型，其结构简单、光路直观、精度高，其调整和使用具有典型性。

鉴于此，本文提出了一种基于迈克尔逊干涉仪结构获取干涉条纹的激光干涉图像处理系统。利用编写的图像处理算法软件对干涉条纹进行细分，从而提高测量精度。

本文重点阐述了干涉条纹数字图像的预处理、旋滤波、条纹中心线提取、亚像素定位。干涉条纹小数部分的实验表明，本方案中的条纹图像处理算法具有去除噪声能力强，定位精度高的优点。

本文的主要工作有以下几点：

1. 对旋滤波算法进行了改进，先对条纹图进行巴特沃斯低通滤波，然后根据滤波后的图像求条纹方位，在条纹切线方向做均值滤波。
2. 引入边缘检测算子来提取导数符号二值图的条纹边界，避免了采用领域微分法时需对一些双值点单独考虑的情况，同时避免因人为的干预降低算法的自动化程度。利用边缘检测算法改进导数符号二值图法，使整个提取中心线的过程自动的完成，提高了处理速度。
3. 用三次样条插值法拟合条纹灰度，对条纹中心线进行亚像素精确定位，并在此基础上提出了一种计算干涉条纹小数部分的方法。

此外，本文还分析了该系统的软硬件部分可能会给测量结果带来的一些误差，给出了实际测量结果，并提出了一些提高测量精度的方法。

关键词：条纹中心线；旋滤波；亚像素

ABSTRACT

Methods of processing and analysing interference fringes are always being studied as the core of laser interferometric system, and mostly determine the precision of laser interferometric system. In order to reach the precision level of micron(μm), even nanometer(nm), interference fringes need to be subdivided, and the subdivision level determine measuring precision. Among fringe-subdivision methods, computer software method need not to touch an object and change parts of any apparatus in measuring system when working, so it has the advantages of high speed, low cost and high measuring precision. And Michelson interferometer, as the prototype of many modern interferometers, has simple structure and high precision, it is a typical interferometer and used widely.

For this, a digital image processing system of laser interference measuring based on Michelson interferometer was designed in this dissertation, and the interference fringes were subdivided by a image processing software written with Visual C++ to enhance measuring precision.

This dissertation mainly discussed general preprocess, spin filter, extracting fringe centerlines, sub-pixel location, and the method of working out the fractional displacement of fringes, and experiment results show that the method of processing interference fringes proposed in this dissertation has the characteristics of little breaking, little impacted by noise and processing fast. The main work in this dissertation include some points as follows:

1. making improvement to spin filter, first preprocessing the fringes with Butterworth low-pass filter, then average filtering at a tangent.

2. Using edge detection to getting edges of black-white fringes which figured the sign of derivative of intensity variations in interference fringes. this can avoid man-made value for some special points, and enhance the measuring speed with the whole work done automatically.

3. Using cubic spline interpolation to fit intensity variations in interference

fringes, and getting the fringe skeletons with high precision by finding the maximum or minimum. Then figure out the fractional displacement of fringes.

Furthermore, all types of possible error in which brought by the system software and hardware are analyzed, the actual measurement results are presented and means to reduce or eliminate the errors are suggested.

Key words: Fringe skeletons; Spin filtering; Subpixel

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 选题的意义	1
1.2 干涉条纹图像的国内外研究现状	1
1.3 本文的主要研究内容和工作	3
第 2 章 激光干涉图像处理系统的方案设计	5
2.1 干涉条纹图的形成原理及性质	5
2.1.1 光学干涉原理及条纹图的形成	5
2.1.2 干涉条纹图的特性	9
2.1.3 迈克尔逊干涉条纹的特点	11
2.2 方案设计	12
2.2.1 系统的组成框图	13
2.2.2 系统的图像处理流程	13
2.2.3 系统设计的主要内容和实现的功能	15
2.3 本章小结	16
第 3 章 数字干涉图像预处理分析	17
3.1 图像噪声的分类	17
3.2 图像预处理	18
3.2.1 图像的采集、截取与存储	18
3.2.2 图像噪声的消除与增强	20
3.3 旋滤波算法及其改进	25
3.3.1 旋滤波的基本原理	25
3.3.2 常用的几种旋滤波	26
3.3.3 改进的旋滤波算法	29
3.4 各种滤波方法的效果比较	30

3.5 本章小结	31
第 4 章 干涉条纹的中心线提取处理	32
4.1 灰度阈值法	32
4.2 自动跟踪光强最小值法	36
4.3 二维导数符号二值图法	40
4.4 本章小结	45
第 5 章 基于亚像素细分的条纹精确定位方法	46
5.1 亚像素基本原理	46
5.2 亚像素定位的可行性	47
5.2.1 CCD 像元空间细分的可行性	47
5.2.2 亚像素算法的选用条件	49
5.3 亚像素细分算法	50
5.3.1 矩方法	50
5.3.2 拟合法	52
5.3.3 多项式插值法	54
5.3.4 样条插值法	55
5.4 本章小结	58
第 6 章 干涉图像处理系统的实现	59
6.1 干涉图像处理系统的硬件部分	59
6.1.1 光源的选择	60
6.1.2 CCD 摄像机的主要参数	61
6.1.3 图像采集卡	62
6.2 干涉图像处理系统的软件设计	63
6.2.1 软件开发平台	63
6.2.2 软件主界面外观及其菜单功能	64
6.2.3 实验过程及结果	66
6.3 条纹小数测量实验	69
6.4 误差分析	71

6.4.1 系统内部的误差因素	72
6.4.2 外部环境导致的误差	73
6.4.3 机械结构的安装误差	74
6.4.4 图像处理软件的误差	75
6.5 本章小结	76
第 7 章 结论和展望	77
参考文献.....	79
致 谢.....	82
附录 1 源码	84
附录 2 实验设备	89

Contents

A b s t r a c t	I
A b s t r a c t (e n)	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Significance Of This Subject	1
1.2 Status Quo Of Research Of Interference Fringes	1
1.3 Main Research Contents Of This Subject	3
Chapter 2 Design of digital image processing system for laser interference measuring	5
2.1 Principle of forming interference fringes and their property	5
2.1.1 Theory of optical interference and forming of interference fringes	5
2.1.2 Property of interference fringes	9
2.1.3 Features of michelson interference fringes	11
2.2 System design	12
2.2.1 Frame of the whole system	13
2.2.2 Flow chart of image processing	13
2.2.3 Content and function of System.....	15
2.3 Chapter summary	16
Chapter 3 Pre-process of digital interference fringes	17
3.1 Classifying noises of image	17
3.2 Preprocessing of image	18
3.2.1 Image acquisition、 cut and stored	18
3.2.2 Clearing image	20
3.3 Spin filter and its improvement	25
3.3.1 Principle of Spin filter.....	25
3.3.2 Several common spin filters	26

3.3.3 Improvement of spin filter	29
3.4 Comparison of effect of several filters.....	30
3.5 Chapter summary	31
Chapter 4 Extraction of fringe centerlines in digital	
interferometric patterns	32
4.1 Grey threshold	32
4.2 Auto-search of minimum intensity method.....	36
4.3 Two-dimensional derivative-sign binary-fringe method	40
4.4 Chapter summary	45
Chapter 5 Acquisition of fringe centerlines of high precision	
based on subpixel subdivision.....	46
5.1 Rationale of subpixel detection	46
5.2 Feasibility analysis of subpixel subdivision.....	47
5.2.1 Feasibility analysis of subdividing CCD pixel	47
5.2.2 Choosing of subpixel algorithms	49
5.3 Subpixel subdivision algorithms	50
5.3.1 Moment.....	50
5.3.2 Fitting.....	52
5.3.3 Polynomial interpolation.....	54
5.3.4 Spline Fitting.....	55
5.4 Chapter summary	58
Chapter 6 Realization of image processing system for	
interferometric patterns	59
6.1 Hardware of system	59
6.1.1 Selection of lamphouse.....	60
6.1.2 Key parameters of CCD camera	61
6.1.3 Image acquisition card	62
6.2 Software system design	63

6.2.1 Software develop flat and tools	63
6.2.2 Software system frame and interfaces	64
6.2.3 Experiment and result	66
6.3 Measurement of fractional displacement of fringes.....	69
6.4 Error analysis	71
6.4.1 Inner error of system.....	72
6.4.2 Error of outer circumstances.....	73
6.4.3 Installation error of mechanical parts	74
6.4.4 Software error	75
6.5 Chapter summary	76
Chapter 7 Conclusion and prospect	77
References	79
Acknowledgement	82
Appendix 1 Code	84
Appendix 2 Experimental system picture.....	89

第 1 章 绪论

1.1 选题的意义

光学干涉计量在材料微小形变检测、光学介质的折射率测量以及光学波前检测等方面有着广泛应用。在光学干涉检测中经常要对条纹图进行分析研究,例如在测量物体长度和物体面形^[1]等应用领域,条纹的移动和级次的测量是其中的一个关键技术。自从 He-Ne 激光器问世以来,激光干涉测量法以其特有的大测量范围、高分辨率和高测量精度等优点,在精密和超精密测长领域获得了广泛的应用。伴随着电子学、光学和物理光学的发展并与计算机相匹配,加之丰富的应用软件和各种附件,使其不仅能测量线位移、线速度,还能测量小角度以及各种形位误差等几何量^[2-3]。在精密计量这些几何量时,干涉条纹的计数和细分是重要的基础之一。干涉条纹处理方法作为激光干涉系统的核心,一直以来倍受人们的关注。在激光干涉测量中,测量精度在很大程度上取决于条纹信号处理方法。为达到微米甚至纳米级的测量精度,毫无例外的都需要对干涉条纹信号进行细分,细分的精度决定了测量精度。目前已有的条纹细分技术有电子学倍频法、光学倍频法、CCD 细分法、计算机软件法等^[4-5]。前两种方法一般都需要增加倍频装置以实现条纹细分,系统复杂,成本高。CCD 细分法受到器件尺寸和列阵数目的限制,而且成本昂贵,辅助电路复杂。计算机软件法,也称为干涉图像测量法,是一种非接触的测量方式,具有快速、可靠等优点,它不需要对器件本身做任何的处理,有着费用低、测量精度高的优点。因此,现今对干涉条纹信号细分的研究是激光干涉测量的主要研究方向之一,如果能用软件方法将干涉图像上的特征目标定位在亚像素级别,就相当于提高了测量系统精度。例如,当软件的精度达到 0.1 个像素,则相当于测量系统的硬件分辨率提高了十倍。

1.2 干涉条纹图像的国内外研究现状

从 20 世纪 70 年代末期起,随着计算机的普及和数字图像技术的发展,国外开始对干涉条纹图进行计算机图像处理研究,国内在 20 世纪 80 年代中期也开始了这方面的研究,并有了很大的发展。

在传统干涉条纹图像处理中，主要是用肉眼根据光强分布的规律得出条纹中心线，亦称骨架线。数字图像处理技术出现后，出现了多种其他的条纹处理方法。条纹图像的数字化处理技术基本上分为两类：全灰度法与条纹中心线法。其中，全灰度法主要包括傅里叶变换法、相移法等。近些年来，人们在条纹图像处理的相位分析技术方面做了大量工作，相位实验及分析方法成为目前光学测量领域的主流。虽然傅里叶变换法和相移法这两种算法发展已经比较成熟，测量精度也较高，但其主要弱点在于：傅里叶变换法受噪声干扰比较大，相移法需要三幅以上干涉条纹图，而且对这两种算法来说相位的精确展开一直是难以克服的困难。

相比之下，基于条纹亮度分析的条纹中心技术仍然是条纹图像数字化自动分析处理中非常实用的方法。在某些情况下，例如对由以前的实验重现的条纹图像进行分析处理以及实验仪器不能引入相移装置或引入相移的目的是条纹倍增时，条纹中心技术是条纹图像数字化自动分析处理的唯一可用方法。条纹中心线法采用对干涉条纹进行直接测量的方法，测量方法快捷、有效。条纹细化后再提取中心线可以显著提高测量精度，所以，条纹细化方法引起了广泛关注，很多学者对此开展了研究^[6]。

许多学者提出的条纹细化方法大致分为两类。一类是把条纹图转换成二值图像后再做细化处理，1979年 Muller 和 Saack 通过不同直径的圆与条纹的边缘内切，把圆的中心连起来就是条纹的中心线。Muller 和 Saack 是将数字图像处理技术应用到光弹性中的先驱者，但他们的算法不能精确的提取条纹的中心线。Seguchi 提出逐层剥取条纹外层的像素点来细化条纹，最后得到条纹的中心线的思想。Chen 和 Taylo 的方法是使用 3×3 像素矩阵作为消除条件，通过全场扫描来消除边界点，直到没有边界可以消除。另一类的算法是使用条纹的光强变化及分布特点来达到提取条纹骨架线的目的。1982年 Yatagai 通过从亮条纹得到光强极大值来确定条纹骨骼线。Umezaki 等是利用条纹暗带来提取骨骼线。Ramesh 等于 1991 年第一次提出了使用光强的最小值来确定骨架线，进而提出了改进的算法可以减小噪声的影响，得到优质的骨架线，是目前条纹细化算法中效果较好的细化方法之一^[7-8]。何小元根据自适应原理，提出了用于确定条纹方向的自适应视觉基原匹配法，并且采用二维灰度场的方向导数确定灰度的极值位置，使得对于干涉条纹中心的识别达到了很好的效果。上述各种方法单独处理条纹时或多

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库