DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105820

迈克尔逊干涉条纹位移信息提取研究*

李忠明[1,2] 唐延甫[1] 李俊霖[1] 杨永强[1,2] 李洪雨[1]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;2.中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 基于迈克尔逊干涉原理,利用干涉成像原理和图像处理技术,提出了利用干涉条纹半径变化情况来获取干涉条纹位移信息的方法。该方法以面阵CCD相机采集的图像为处理对象,采用去噪、顶帽变换、二值化、形态学处理等预处理操作,再利用连通域特征识别得到图像中心亮干涉条纹的半径。通过半径的变化趋势与幅度,实现位移信息提取。实验表明,所提方法突破了干涉条纹计数时位移检测最高分辨率为$\lambda/2$的限制,利用了每帧干涉图像所提供的变化信息,实现位移检测分辨率$\lambda/4$。

关键词: 迈克尔逊干涉;信息提取;图像处理;特征识别
中图分类号: TP274+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on displacement information extraction from Michelson interference fringes

Li Zhongming[1,2] Tang Yanfu[1] Li Junlin[1] Yang Yongqiang[1,2] Li Hongyu[1]
(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on Michelson interference, propose a micro-displacement information extraction method using imaging principle and image processing. The processing object of the method is equal inclination fringes collected by planar-array CCD camera. The image preprocessing for each frame includes denoising, top-hat transformation, binarization, morphology operations. Then radius of the bright interference fringe at the center of the image is obtained by feature recognition. By comparing the change trend and amplitude of the radius of frame sequence, the method realizes displacement information extraction. Experiments show that detection resolution of the method is $\lambda/4$ by making use of the information provided by every frame, which is superior to the maximum resolution of $\lambda/2$ of the detection by interference fringe counting .

Keywords: Michelson interference; information extraction; image preprocessing; feature recognition

0 引 言

光学干涉技术在精密测量领域有着广泛的应用,其中迈克尔逊干涉是比较常用的技术之一,常用来进行位移、角度、折射率、波长等的测量[1-6]。当利用迈克尔逊干涉进行位移测量时,干涉条纹的位移信息提取对于利用迈克尔逊干涉进行精密测量至关重要[7-9]。

干涉条纹位移信息提取方法一般是对干涉条纹中心亮暗交替变化次数进行计数,每交替变化一次,位移变化为$\lambda/2$。传统的计数方法是人工进行计数,该方法易造成疲劳而影响读数准确性,同时人眼判断中心亮暗存在较大的人为误差来源。近些年来,自动计数技术取得了一定的进展,主要有基于光电传感器[10-12]和基于图像处理[13-14]两种方案。基于光电传感器的方案操作繁琐,易受外部环境干扰,影响计数的准确性。基于图像处理的方案可以获得干涉条纹的全场信息,而且准确性较好,但是大部分基于图像处理的方法只是代替人眼功能,其本质还是识别干涉条纹的中心亮暗。基于中心亮暗计数的位移信息提取方法仅关注条纹中心的亮和暗,忽略了亮暗变化之间的信息。

针对干涉条纹计数存在的问题,本文在分析了迈克尔逊干涉成像原理的基础上,提出了一种基于图像处理的干涉条纹位移信息提取方法。本文方法利用每帧干涉图像所提供的变化信息,通过比较干涉条纹半径变化的幅度,实现检测分辨率$\lambda/4$,优于条纹计数的$\lambda/2$。

收稿日期:2021-02-19
*基金项目:国家自然科学基金(51505076)项目资助

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　迈克尔逊干涉光学原理

迈克尔逊干涉测量位移的原理如图 1 所示，激光器发出的激光经扩束、分光后，分别照射到相互垂直的参考面和被测面上，经参考面和被侧面反射后的光束相干涉形成等倾干涉条纹投射到相机上。当被侧面移动产生微位移时，两束干涉激光光程差发生变化，干涉条纹会出现“冒出”或“陷入”的现象，即干涉条纹中心会呈现亮暗交替的变化。

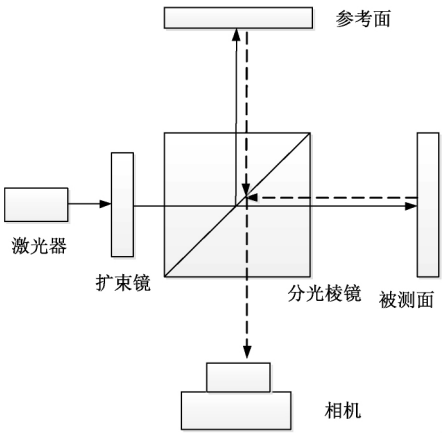


图 1　迈克尔逊干涉原理

等倾干涉条纹的成像原理如图 2 所示。被侧面通过分光棱镜形成虚像被侧面投影，可以认为两束相干光是由参考面和被侧面投影反射产生，也等效于由虚光源 M 和 N 发出，当参考面和被侧面投影之间距离为 d 时，两虚光源间距为 $2d$，光屏在光场叠加区的任何位置，都可以形成等倾干涉条纹[15]。虚光源 M 和 N 到点 A 的光程差为：

$$\delta = MA - NA = \sqrt{(L+2d)^2+R^2} - \sqrt{L^2+R^2} = \sqrt{L^2+R^2}\left(\sqrt{1+\frac{4Ld+4d^2}{L^2+R^2}}-1\right) \tag{1}$$

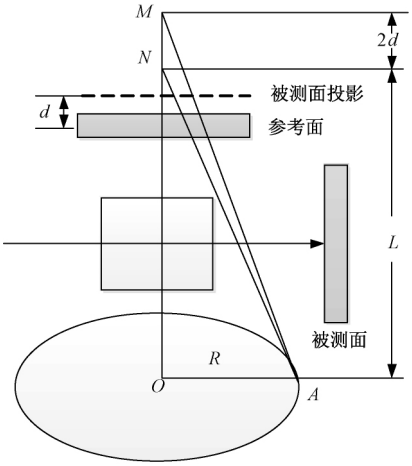


图 2　干涉成像原理

应用二项式定理将 $\sqrt{1+\frac{4Ld+4d^2}{L^2+R^2}}$ 展开得：

$$\delta = \frac{2Ld}{\sqrt{L^2+R^2}}\left[1+\frac{dR^2}{L(L^2+R^2)}\right] \tag{2}$$

因为 $\frac{dR^2}{L(L^2+R^2)} << 1$，且为明条纹时：

$$R = \frac{\sqrt{4d^2-k^2\lambda^2}}{k\lambda}L,\ k=1,2,3,\cdots \tag{3}$$

$$R = L\sqrt{\frac{4d^2}{k^2\lambda^2}-1} \approx \frac{2L}{k\lambda}d,\ k=1,2,\cdots \tag{4}$$

根据式(4)的干涉条纹半径公式，对于某一个特定的干涉条纹，k、λ 和 L 均为定值，此时干涉条纹半径 R 随 d 的减小而减小，干涉条纹出现“陷入”现象，R 与 d 呈线性关系。当图像中心处亮或暗的干涉条纹由半径最大逐渐完全“陷入”，此时位移变化量为 $\lambda/2$；当中心位置亮或者暗的干涉条纹由半径最大逐渐缩小至 1/2，此时位移变化量近似为为 $\lambda/4$。

2　图像处理方法

本文方法以干涉条纹半径 R 与 d 之间的变化关系为理论依据，对干涉条纹进行图像处理，识别图像中心处干涉条纹半径的变化情况，实现分辨率为 $\lambda/4$ 的位移信息提取。图像处理流程和效果如图 3 和 4 所示。具体的位移信息提取步骤如下：

1)对 CCD 相机采集到的干涉条纹图像进行中值滤波去除噪声；

2)由于环境影响和迈克尔逊干涉的特点，干涉条纹图像一般亮度是不均匀的，进行顶帽变换，解决非均匀亮度的问题；

3)采用基于最大类间方差法的自适应阈值二值化对图像进行二值化处理；

4)去除二值干涉条纹图像边缘的小面积区域；采用形态学处理去除图像的毛刺；

5)识别图像的所有连通域并标记序号最大的连通域即为中心位置的连通域；

6)绘制标记连通域的最小面积外接矩形并计算出矩形的边长，边长的 1/2 即为中心位置干涉条纹的半径；

7)根据每帧图像中心处干涉条纹半径的变化幅度，即当半径变化到最大值的 1/2 时，位移变化量为 $\lambda/4$，当半径从最大值变化到 0 时，位移变化量为 $\lambda/2$。

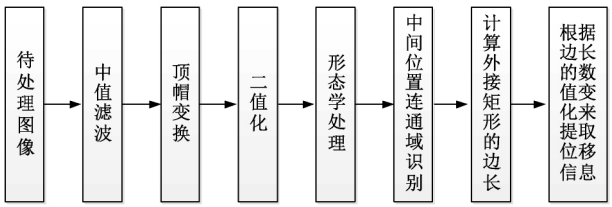
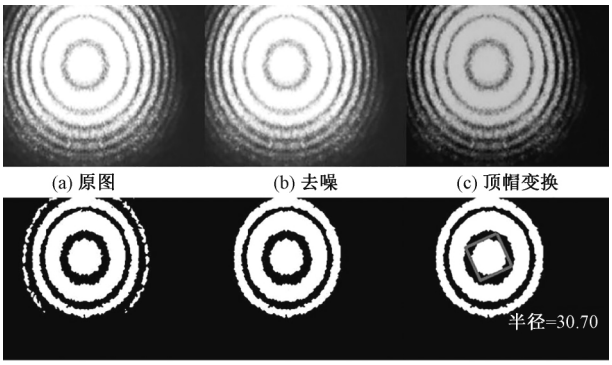


图 3　图像处理流程

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 原图　(b) 去噪　(c) 顶帽变换

(d) 二值化　(e) 形态学变换　(f) 特征识别

图 4　图像处理效果

当干涉条纹中心位置为暗时,进行取反处理,使干涉条纹中心处变成亮条纹并按照步骤 1)～7)进行位移信息提取。识别条纹中心为暗的方法是:当条纹中心变成暗时,标记的连通域是上一帧条纹中心为亮时条纹的下一级条纹,半径比较大,所以当识别标记连通域半径比前一帧大时,此时干涉条纹中心位置变为暗,并进行取反处理。

3　实验和分析

实验装置如图 5 所示,激光器采用 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm。

图 5　实验装置实物

实验过程中,通过微位移台使被测面产生位移,同时采用本文提出的方法对被测面移动过程中采集到的干涉条纹进行位移信息提取。由于微位移台调整分辨率是 1 μm,经计算位移调整 3、6、9 μm,可以考察位移信息提取方法的有效性,共进行 9 次实验。位移信息提取是通过 $\lambda/4$、$\lambda/2$ 累加得到的,故没有进行大位移信息提取的实验。实验数据及相对误差情况如表 1 所示。

通过实验结果可知,本文方法基本满足分辨率 $\lambda/4$ 的位移信息提取要求。出现误差的主要原因是图像预处理会对原始图像产生一定的干扰;当被测位移为 $\lambda/4$ 时,位移 d 和干涉条纹半径 R 是近似线性关系。当干涉条纹质量较好时,无需进行形态学处理,应用本文所提出的方法进行位移信息提取的分辨率和精度可以更高。

表 1　实验数据

被测面位移/μm	条纹位移提取/nm	相对误差/%
3	2 848	5.1
3	2 848	5.1
3	2 848	5.1
6	5 853	2.4
6	5 853	2.4
6	5 853	2.4
9	8 859	1.6
9	8 859	1.6
9	8 859	1.6

4　结　　论

以迈克尔逊干涉成像原理为基础,本文提出了一种基于图像处理的干涉条纹位移信息提取方法。利用每帧干涉图像所提供的变化信息,位移信息提取分辨率达到 $\lambda/4$,优于条纹中心亮暗计数的 $\lambda/2$。实验表明,本文方法基本满足分辨率 $\lambda/4$ 的位移信息提取要求,对利用激光干涉进行精密测量具有重要意义。

参考文献

[1]　YAN L P, CHEN B Y, WANG B. A differential Michelson interferometer with orthogonal single frequency laser for nanometer displacement measurement[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28: 045001.

[2]　毕付,张东亮,鹿利单,等. 基于全保偏光纤的反射式双折射干涉温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 120-128.

[3]　蒋帅,庞亚龙,汪路元,等. 星载干涉雷达高度计高程精度分析[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 32-36.

[4]　袁腾飞,吴思进,李伟仙,等. 数字散斑干涉面内变形内窥测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 93-98.

[5]　刘纯龙,王红理,方湘怡,等. 基于迈克尔逊干涉仪的 SPR 传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 635-638.

[6]　杨明洋,向长波. 相关干涉仪测向算法俯仰角误差分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 1-5.

[7]　李晓飞,张周强,张守京,等. 基于 LabVIEW 的迈克尔逊干涉微位移测量方法研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(1): 8-12.

[8]　党晨,李武军,王党社. 基于迈克尔逊干涉仪的光波长自动测量系统[J]. 大学物理, 2020, 39(8): 31-34.

[9]　万伟. 迈克尔逊干涉仪测透明介质厚度及折射率[J]. 大学物理实验, 2013, 26(5): 22-25.

[10]　YAN L, CHEN B, LI D, et al. Singal processing method of

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

a laser synthetic wavelengthinterferometer[J]. Measurement Science & Technology, 2010,21(1):015106.

[11] DOBOSZ M, ZAMIELA G. Interference fringe detection system for distance measuring interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2012,44(5):1620-1628.

[12] 贾昊君. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的条纹自动识别系统设计[D]. 太原:太原科技大学,2012.

[13] 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.

[14] 黄煜,黄文艳,张婉柔,等. 基于面阵 CCD 的迈克尔逊干涉环计数方法[J]. 计算机工程与应用,2015,51(9):180-184.

[15] 官邦贵,秦炎福,章毛连,等. 迈克尔逊等倾干涉图样的数学推导及分析[J]. 实验技术与管理,2010,27(11):55-57.

作者简介

李忠明,博士研究生,研究实习员,主要研究方向为机电一体化技术研究。

E-mail:549640152@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net