

文章编号:1004-4213(2010)09-1723-5

基于 Talbot-Moiré 法测量透镜焦距的莫尔条纹的图像处理*

吴玲玲^{1,2,3}, 吴国俊¹, 仓玉萍^{1,2}, 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 西安工业大学 光电工程学院 测控技术与仪器系, 西安 710032)

摘要:利用 Ronchi 光栅的 Talbot 效应和 Moiré 条纹测量了长焦透镜焦距, 并根据焦距与莫尔条纹斜率之间的定量关系可求得透镜焦距. 为获得条纹斜率, 用 CCD 采集莫尔条纹图像后, 利用数学形态学滤波方法进行图像滤波平滑等预处理, 有效地增强了图像的对比度. 通过二值化、细化获得单像素宽连通的条纹, 通过对条纹进行标记, 为条纹斜率的直线拟合计算提供了可靠的数据, 采用这些数据计算的焦距的误差为 0.10%.

关键词:图像处理; 焦距测量; Talbot 效应; 莫尔条纹

中图分类号: TP751.1; TH741

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103909.1723

0 引言

长焦透镜的焦距测量, 在激光核聚变驱动器、天文光学系统和空中遥感相机等领域有着很重要的应用价值. 光学系统焦距测量的传统方法都不大适用于长焦距的测量, Talbot-Moiré 技术是利用 Talbot 效应“自成像”和莫尔条纹图放大特性的一种波前相位信息测量方法, 是目前长焦距测量研究的热点. 20 世纪 80 年代初, Kafri 就将其应用于透镜焦距的测量中^[1-2]. 国内外的研究人员在此基础上提出了用同心环状光栅代替直线光栅等方法, 扩大了这一技术的焦距测量范围^[3-4]. 目前 Talbot-Moiré 法种类很多, 但这些方法在测量中大都需要用到较大口径的准直透镜以及较大面积的光栅, 以计量待测透镜有效口径内的莫尔条纹数目, 从而使测量装置的体积增大.

本文利用 CCD 摄取透镜局部的 Ronchi 光栅莫尔条纹图像, 根据长焦透镜焦距与其莫尔条纹斜率之间的定量关系求得透镜焦距, 无需使用大口径的准直透镜以及大面积的光栅, 从而使测量装置的体积大为缩小, 且理论上此法对测量任意口径的正、负透镜焦距都适用.

1 测量原理

本文的测量原理如图 1^[5], G_1 、 G_2 是两块刻线垂直于 x 轴的光栅, 栅线之间有一小夹角 θ . G_1 和 G_2 一个固定, 另一个可平移和旋转, P 是位相缓变的位相物体 (即透镜). 当一束平行光经过 G_1 和 P 时, 通过 G_1 的衍射光会在 Talbot 距离上自成像, 其像包含了 P 的位相信息, 形成变形光栅, 这一变形光栅叠在 G_2 上, 在屏上产生莫尔条纹. 莫尔条纹的形变即反映了 P 的位相分布.

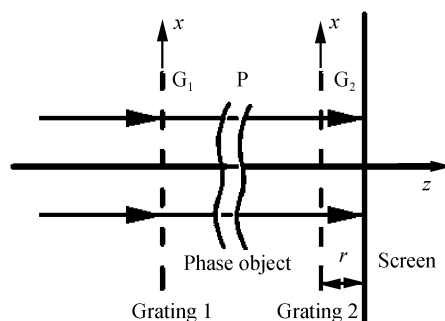


图 1 相位物体测量的光路图

Fig. 1 Optical scheme of phase object measuring

当两光栅之间没有任何位相物体时, 莫尔条纹方程为

$$y = qp/\theta \quad (1)$$

式(1)中, $q=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$, p 为光栅节距, 条纹为一组平行于 x 轴的直线系.

在两光栅之间加入透镜后, 莫尔条纹仍为一组平行直线系, 但斜率不再为 0, 而是与透镜焦距有如式(2)的定量关系

* 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”资助

Tel: 029-83208072

Email: wull.0001@163.com

收稿日期: 2009-12-05

修回日期: 2010-01-24

$$f=r/\theta|k| \quad (2)$$

式中, r 为位相物体 P 与光栅 G_2 的间距. 因此, 只要测得 r 及 θ 的值, 并由 CCD 采集的图像测出莫尔条纹的斜率 k , 就可由式(2)求出透镜焦距 f .

实验中使用激光波长 $\lambda=0.65 \mu\text{m}$, 待测透镜参量为: $\Phi 200 \text{ mm}$; 焦距 $f=420 \text{ mm}$.

2 图像处理过程

由焦距测量原理知, 焦距值的计算要通过测量莫尔条纹的宽度获得光栅栅线夹角以及测量莫尔条纹的斜率变化, 因此本文莫尔条纹的特征信息提取主要是求得莫尔条纹的宽度和斜率, 需要把灰度的莫尔条纹处理为二值线型图从而提取莫尔条纹的中心线. 中心线的提取准确度直接影响条纹宽度和斜率的计算准确度. 图像处理包括增强、分割、细化等几个步骤. 增强是通过平滑、锐化、灰度修正等手段, 改善图像的对对比度; 分割是把图像划分为若干个区域, 分别对应不同的条纹; 细化则是把分割后的图像转为单个像素点宽度的线型图, 以获得条纹中心线.

3 图像增强

3.1 增强对比度

从采集的莫尔条纹的原始图像(见图 2)可以观察到, 中央条纹很亮, 四周的条纹较暗, 而且相邻的亮条纹间的边界不清楚, 这是因为激光束扩束准直时, 光束中心光强比周围大引起的图像光照不均匀. 为了方便图像的后续处理, 增强条纹对比度, 必须对图像进行光照不均的校正. 形态学开运算可用于补偿不均匀的背景亮度, 对图像进行开运算可以产生对整个图像背景的合理估计^[6]. 所以本文利用开运算获得对图像背景的亮度的估计, 再用原图像与背景进行减操作, 从而实现图像背景不均的校正. 具体操作步骤为:

1) 用一个半径为 10 像素的圆盘形结构元素对图像进行形态开运算, 删除那些不完全包括在半径为 10 的圆盘中的对象, 实现背景亮度的估计, 得到背景图像.

2) 原图像减去背景图像, 得到背景较为一致的图像.

比较图 2 和图 3, 可以发现图 3 中条纹间的对比度, 特别是图像中央几个条纹的对比度明显增强, 这样方便后续处理.

但因为图像相减, 图 3 变暗了, 可以通过图像灰度校正得到解决^[6]. 对图 3 用灰度校正, 得到图 4.

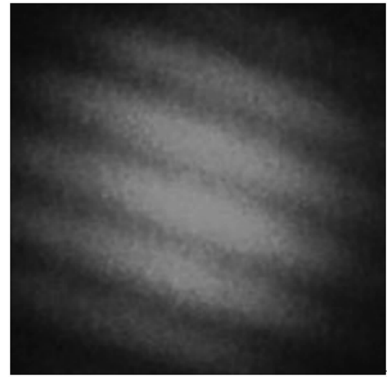


图 2 采集的莫尔条纹的原始图像

Fig. 2 Original image of Moiré fringes

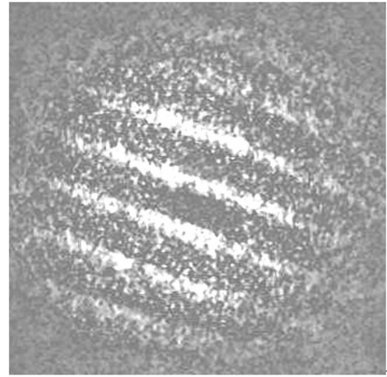


图 3 形态学光照不均校正效果图

Fig. 3 Fringes after morphological uniform adjusting of luminance

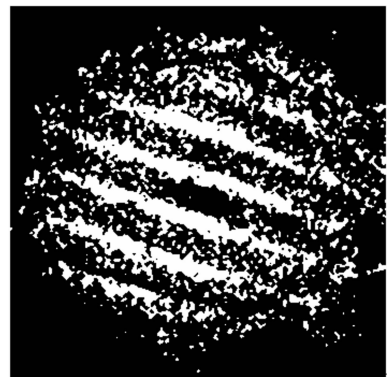


图 4 灰度校正效果图

Fig. 4 Fringes after gray scale adjusting

3.2 滤波平滑

CCD 图像的常见噪音有椒盐噪音、脉冲噪音、高斯噪音等. 为了减小这些噪音对后续计算条纹宽度和倾角的影响, 必须对莫尔条纹进行预处理减小其负面影响. 图像的滤波平滑就是对噪音图像进行滤波, 平滑噪音图像, 是提取条纹中心时用于条纹图像分析最有效的方法, 对本文的莫尔条纹图像进行滤波处理要满足下面两个条件: 1) 不能损坏条纹的斜率等重要信息; 2) 使图像更清晰, 条纹对比度更大. CCD 图像的滤波去噪算法视其噪音本身的特性而定, 在实际图像处理中, 各种滤波方法是综合运用的.

中值滤波是一种有效抑制噪声的非线性的图像平滑方法. 这种滤波器的优点是运算简单、速度较快, 中值滤波法在去除脉冲噪声、椒盐噪声的同时又能保留图像的边缘细节, 可以克服线性滤波器所带来的图像细节模糊. 但是中值滤波对高斯噪声无能为力, 而高斯滤波器能较好地消除随机噪声的影响, 因此成为曲线平滑最常采用的方法.

除上述常用的滤波方法之外, 数学形态学滤波, 也是目前应用和研究的一个重要领域^[2]. 最基本的形态学运算是腐蚀和膨胀, 其他运算大都是这两个基本运算的扩展. 腐蚀是一种消除边界点, 使边界向内部收缩的过程, 可以用来消除小且无意义的物体. 膨胀是将与物体接触的所有背景点合并到该物体中, 使边界向外部扩张的过程, 可以用来填补物体中的空洞. 先腐蚀后膨胀称为开运算, 先膨胀后腐蚀称为闭运算. 灰度图的开运算常用于去除相对于结构元素而言较小的亮点, 同时保留所有的灰度和较大的亮区特征不变. 而灰度图像的闭运算常用来除去较小的暗细节, 使得图像变亮. 形态开、闭运算的性质表明: 这两种运算具有极值滤波功能, 开运算对信号平滑, 闭运算去除谷底值. 所以, 开运算和闭运算经常组合在一起平滑灰度图像并去除噪声.

从图 4 可以看到, 经过图像背景不均和灰度校正后得到的莫尔条纹图像对比度明显增强, 但是还存在大量的噪声, 需要进一步进行滤波. 因为图像中有大量的椒盐噪声和随机噪声, 故应综合选取高斯低通滤波器和中值滤波器进行滤波. 莫尔条纹图片经过滤波处理后, 杂散点少多了, 但还有很多的空洞, 要提取莫尔条纹中心线, 平滑度还远远不够. 因此采用开闭运算组合实现形态学平滑图像.

本文综合运用中值滤波、高斯滤波和开闭运算组合去除噪声, 平滑图像. 通过对比发现, 滤波平滑过程连续反复四次效果最好(见图 5 和图 6).

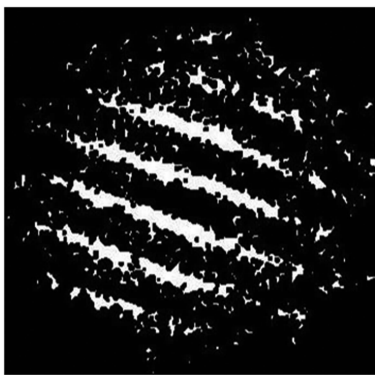


图 5 一次滤波平滑后的效果
Fig. 5 Fringes after first smoothing

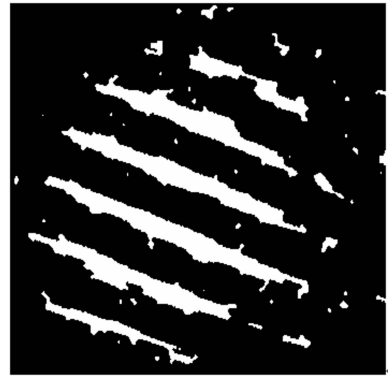


图 6 四次滤波平滑后的效果
Fig. 6 Fringes after all smoothing

从图 6 可以看到, 经过多次滤波平滑处理, 滤除了大量噪声, 但图像的平滑度仍然不够, 存在缺陷和断点, 本文采用形态学中的膨胀腐蚀及开、闭运算继续平滑图像, 修补缺陷和断点, 减少细化后的条纹当中的“毛刺”(见图 7).



图 7 形态学处理的效果
Fig. 7 Fringes after morphological processing

4 二值化

二值化又称阈值分割, 是一种广泛使用的图像分割技术. 阈值分割目前有许多算法, 其基本思想是确定一个阈值, 然后把每个像素点的像素值和阈值相比较, 根据比较的结果把该像素划分成两类.

设原始图像 $f(x, y)$, 以一定的准则在 $f(x, y)$ 中找到一个合适的灰度值作为阈值 t , 则分割后的图像为

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > t \\ 0 & f(x, y) \leq t \end{cases} \quad (3)$$

阈值方法分全局阈值和局部阈值两种, 如果实际采集到的条纹图像质量较高, 可使用全局阈值. 如果得到的图像不够理想, 可以使用局部阈值选取, 其抗噪声能力较强, 但是时间复杂度和空间复杂度都较大. 由于经过了大量的滤波平滑处理, 莫尔条纹图像质量大大改善, 本文采取的是全局阈值选取算法.

本文的莫尔条纹图像黑白相间,阈值大小的选取在理论上不会影响条纹中心线的定位。

5 细化

5.1 细化

莫尔条纹图像经过二值化之后,虽然提取出了目标条纹,但是由于条纹较粗、不等宽并且边缘扩散,不把二值条纹图进行细化就无法精确地确定条纹的中心。细化就是寻找图形中轴线或骨架,以其骨架取代该图形。细化过程不断去除曲线上不影响连通性的轮廓像素,从而获得单位像素宽度的中心骨架(见图 8)。

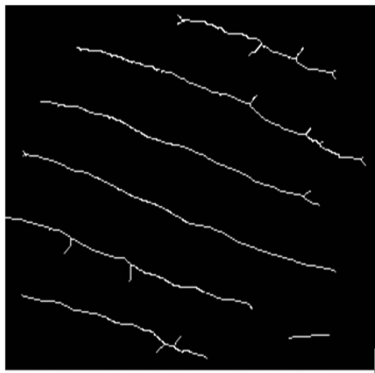


图 8 条纹细化后的效果图
Fig. 8 Fringes after thinning

5.2 修剪

由于灰度去噪的不完全及二值化过程可能引入噪音,所以对二值化后的条纹图像细化后经常会产生无关的短“毛刺”(见图 8),清除这些“毛刺”的过程称为修剪。本文进行了一次形态学操作去噪,有效地清除了原图中的大部分“毛刺”(见图 9)。

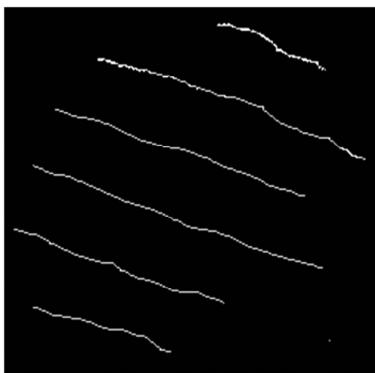


图 9 修剪后的效果图
Fig. 9 Fringes after pruning

6 标记

观察图 9 可知共有 6 条条纹,要求得条纹的间距、斜率,必须把各个条纹分开处理。显然,本文中经过二值化和细化后的同一条条纹上的像素都是 8 连通的。根据条纹像素的连通性,可以实现对每条条纹

进行标记,并获得各直线上点的坐标。经过标识后第一条条纹像素都赋值为 1,第二个条纹像素都赋值为 2,依次类推,可以读出每条条纹上的各点坐标值,这个坐标是用该点所处的行序号和列序号来表示的,和几何当中的坐标系不同,但计算条纹斜率时可将结果折算到几何坐标系当中。

7 图像处理的误差分析

7.1 细化引入的误差

细化的实质是不断删除条纹的边缘像素从而得到条纹中心线,细化得到的中心线和实际中心线之间存在误差,不过这个误差相对于光栅质量造成的条纹扭曲变形造成的误差来说很小,基本可以忽略。

7.2 直线拟合引入的误差

本文最终采用最小二乘法拟合直线通过平均点,并且残余误差平方和为最小,可以有效地减小随机误差的影响,因此直线拟合引入的误差很小,可忽略不计。

实验中, $r=10\text{ mm}$,求得未放置被测透镜时接收到的莫尔条纹间距 $\bar{B}=1.479\text{ mm}$,则 $\theta=0.067\ 6\text{ rad}$ 。条纹斜率 $\bar{k}=0.351\ 8$,得到焦距平均值 $\bar{f}=420.429\ 6\text{ mm}$,焦距误差为 $0.10\%\text{[7]}$ 。与 Talbot-Moiré 技术的其他方法相比,准确度较高 [8] 。

8 结论

在实验研究的基础上用 CCD 采集莫尔条纹图像后,用数字图像处理技术,进行图像的滤波平滑等预处理、二值化、细化和标记的过程,为条纹斜率的直线拟合计算提供了可靠的数据。

参考文献

- [1] KAFRI O. Noncoherent method for mapping phase objects [J]. *Opt Lett*, 1980, **5**(12): 555-557.
- [2] GLATT I, KAFRI O. Determination of the focal length of nonparaxial lenses by Moiré deflectometry [J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(13): 2507-2508.
- [3] GLATT I, KAFRI O. Beam direction determination by Moiré deflectometry using circular gratings [J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(19): 4051-4053.
- [4] YAO Jiu-sheng, WANG Lu-chuan, HUANG En-ling. The application to determining the focal length of optical systems by the Moiré fringes of circular concentric gratings [J]. *Optical Technology*, 1996, **9**(5): 24-27.
姚九胜,王鲁川,黄恩令.同心环形光栅环状莫尔条纹在光学系统焦距测量上的应用 [J]. *光学技术*, 1996, **9**(5): 24-27.
- [5] JI Jun, YAO Kun, ZHANG Quan. Measurement for the long focus length of lens by images of moiré fringes [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(2): 241-245.
纪俊,姚焜,张权.利用莫尔条纹的计算机图像测量长焦距透镜焦距 [J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(2): 241-245.
- [6] 冈萨雷斯 R C. 数字图像处理 (MATLAB 版) [M]. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社, 2005: 7-54, 252-282.

- [7] WU Ling-ling, WU Guo-jun, CANG Yu-ping, *et al.* Research on focal length determination technique applied talbot effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup2): 198-201.
吴玲玲,吴国俊,仓玉萍,等.利用 Talbot 效应的焦距测量技术的研究[J]. *光子学报*, 2008,**37**(Sup2):198-201.
- [8] SUN Chen, SHEN Yi-bing, BAI Jian, *et al.* The precision

limit analysis of long focal length testing based on Talbot effect of ronchi grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1214-1217.
孙琛,沈亦兵,白剑,等. Ronchi 光栅 Talbot 效应长焦距测量的准确度极限研究[J]. *光子学报*, 2004,**33**(10):1214-1217.

Image Processing of Moiré Fringes of Measuring Focal Length of Lens Based on Talbot-Moiré

WU Ling-ling^{1,2,3}, WU Guo-jun¹, CANG yu-ping^{1,2}, CHEN Liang-yi¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Measurement and Control Technology and Instrumentation, School of Optoelectronic Engineering; Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China*)

Abstract: Based on Talbot effect and Moiré fringes of Ronchi gratings, focal length measurement of the long focal length is carried out. The focal length of measured lens can be figured out accurately according to its relation to the slope coefficient of Moiré fringes. To get the slope of Moiré fringes, the image of Moiré fringes is mainly filtered or smoothed by mathematics morphological method to enhance the contrast of fringes effectively. Then the filtered image is processed by thinning to single pixel width. The fringes are labeled to fitting lines to calculate the slope coefficient accurately, and the error of focal length is 0.10%.

Key words: Image processing; Focal length measurement; Talbot effect; Moiré fringes



WU Ling-ling was born in 1977. She is currently pursuing her Ph. D. degree in optical engineering at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. Her research interests focus on optical measurement.



CHEN Liang-yi was born in 1941. He is a professor and Doctoral Supervisor of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His research interests on high speed photography, photoelectric theodolite and optical measurement etc.