

文章编号:1004-4213(2010)10-1896-5

基于 Talbot-Moiré 法测量透镜焦距的 CCD 亚像素标定技术*

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 710019)

(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 条纹测量长焦透镜焦距, 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. 分别采用 Canny 算子和形态学方法对光栅的栅线中心进行像素级定位, 再用高斯曲线拟合对其进行亚像素定位. 经过对标准条纹的标定, 验证了该方法的条纹中心定位误差小于 0.1 个像素. 采用光栅作为系统的自基准对 CCD 像素当量进行了亚像素标定, 为条纹斜率和宽度的计算提供了可靠的测量基准, 经过计算, 采用这些数据计算的焦距误差为 0.10%.

关键词:焦距测量; Talbot 效应; 莫尔条纹; 亚像素; 标定

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103910.1896

0 引言

长焦距透镜的焦距测量, 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. 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之上提出了用同心环状光栅代替直线光栅等方法, 扩大了该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, 根据长焦距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.

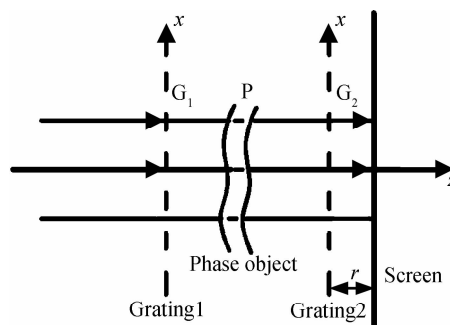


图 1 位相物体测量的光路图

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, 而是与透镜焦距的定

* 中科院“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: 2009-12-16 修回日期: 2010-02-01

量关系为

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

式(2)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 .

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

2 CCD 像素当量标定

栅线夹角 θ 无法直接测量,需要先测出莫尔条纹间距 B 再计算 θ ,即将栅线夹角的测量转化为条纹宽度的测量^[6].当系统的工作距离确定了之后,要实现莫尔条纹宽度和斜率 k 的精确测量,必须对 CCD 进行精确标定.

2.1 标定方法的选择

本测量系统采用了标准件试验标定的方法.先把一个已知尺寸为 L_p 的标准模块放在被测目标位置,然后由该模块的像所占有的 CCD 像元数 N_p ,则

$$K=\frac{L_p}{N_p} \quad (3)$$

式中 K 表示一个像元实际所对应的目标空间尺寸的当量.然后再把被测目标 L_x 置于该位置,测出对应的像元数 N_x ,由式(3)得

$$L_x=KN_x \quad (4)$$

即可算出 L_x 值.

2.2 标准件的选取

高精度测量常采用量块作为标准件,但是本实验中,很难保证标定时量块的位置恰好和第二块光栅面精确重合,操作过程当中引入的误差必然导致标定准确度降低.因为测量过程中所生成的莫尔条纹恰好位于第二块光栅 G_2 处,考虑到标定前后的成像面重合的问题,本文采用第二块光栅 G_2 作为系统的自基准进行标定.实验中选取的光栅的刻线密度是每毫米 20 线对,光栅节距为 $p=50 \mu\text{m}$,每条栅线宽度为 $25 \mu\text{m}$,栅线节距误差为 $1 \mu\text{m}$,作为条纹间距的标定基准是可行的(通常标定中常用的鉴别率板,如 3 号鉴别率板,第 1 单元到第 25 单元中平行条纹宽度条纹由 $40 \mu\text{m}$ 递减至 $10 \mu\text{m}$).

2.3 CCD 像素当量的亚像素标定

由于原理与制造上的限制,为了防止 CCD 器件相邻像元在转移脉冲驱动下引起串扰,同时要保证 CCD 像元具有足够大的感光面积,CCD 的像元感光面积以及像元与像元之间的距离都一般为微米量级.因此难以通过提高 CCD 传感器本身的准确度来提高 CCD 测量系统的准确度.利用图像处理算法来实现 CCD 亚像元细分的方法正是针对 CCD 的这一瓶颈而提出的.

2.3.1 亚像素技术的基本条件

对于亚像素算法,首先需要有一个基本条件,即目标是由多个点组成的,并具有一定的几何和灰度分布特性;第二,对具有一定特征的目标,必须明确目标定位基准点在目标上的具体位置.例如对某一目标定位基准点是目标中的最高点或最暗点,还是灰度变化最大的点等.待定位目标的特征可以是人为建立的理想模型,也可以是从某一个实际图像中提取出的特定场景,或者是两者的结合^[7].显然,本文的光栅图像满足亚像素计算的两个基本条件.

2.3.2 亚像素标定的过程

亚像素级准确度的算法是在经典算法的基础上发展起来的,具体算法过程是:先计算出像素级边缘,即粗定位,然后使用周围像素的灰度值作为判断的补充信息,再对像素级边缘基于一定的特征进行亚像素级定位分析,计算出精确边缘^[7-10].

1) 像素级检测的基本方法

像素级检测的基本方法可归纳为:经典检测算子、基于小波的检测方法、基于数学形态学的检测方法.经典检测算子形式简单、易于实现、速度较快,常用的有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Laplacian 算、Canny 算子、Susan 算和 LOG 算子等.其中 Canny 受噪声影响较小,能很好地提取直线边缘,实用性较好^[7-10].

2) 条纹中心检测的方法

条纹中心的检测准确度直接影响到整个测量系统的测量准确度.常见的条纹中心定位方法有重心法、极值法、几何中心法、Hessian 矩阵法、阈值法和曲线拟合法等.其中,曲线拟合法准确度较高,因此本文采用曲线拟合法.

曲线拟合法是基于条纹截面点的灰度分布近似高斯分布这一特点,利用高斯曲线或者二次曲线对其进行曲线拟合,则拟合曲线的局部极大值点即为截面的条纹中心点^[8-10].

由于条纹光强服从高斯分布,根据高斯函数的特性,可以假设条纹的一维空间表达式为

$$f(x)=ae^{-b(x-c)^2} \quad (5)$$

式中 $f(x)$ 为插值函数, a 、 b 、 c 为待定系数, a 、 b 、 c 的值由条纹的光强分布决定,分别对条纹图像逐行应用上式进行求解,并对求解的结果进行归一化处理,即可求得条纹的中心位置.在求解过程中,采用最小二乘逼近的方法来求解条纹的分布表达式.

对式(5)两边取对数运算得

$$\ln[f(x)]=\ln a-b(x-c)^2 \quad (6)$$

展开得

$$-bx^2+2bcx-bc^2+\ln a-\ln[f(x)]=0 \quad (7)$$

令

$$a_1 = -b$$

$$a_2 = 2bc$$

$$a_3 = -bc^2 + \ln a - \ln[f(x)]$$

式(7)变为

$$a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = 0 \tag{8}$$

则条纹域的中心位置

$$c = -(a_2/2a_1) \tag{9}$$

条纹中心求解算法的求解步骤为:(1)对条纹的灰度图像进行滤波处理,消除图像噪声干扰和由于物体表面特性等因素造成的光斑散射;(2)边缘检测,提取图像的边缘特征图;(3)根据边缘图像确定条纹区域,并将条纹区分离出来;(4)在条纹区内利用亚像素拟合法求解条纹中心.

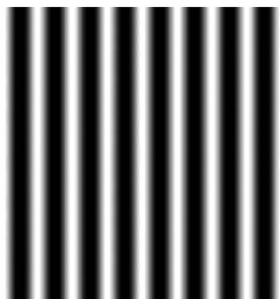
本文分别采用 Canny 算子和形态学方法对光栅的栅线中心进行像素级粗定位,再用高斯曲线对栅线灰度进行拟合对其进行亚像素定位,从而精确标定 CCD 像素当量.

3 数据处理

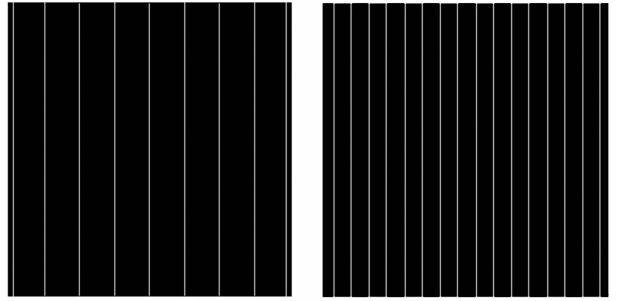
为了减小边缘检测时阈值选取引入的随机误差对光栅中心定位准确度的影响,采用组合测量的方法进行标定.组合测量是通过直接测量待测参数的各种组合量(一般是等准确度测量),然后对这些测量数据进行处理,从而求得待测参数的估计量,并给出其准确度估计.通常组合测量数据是用最小二乘法进行处理^[11].

4 标准条纹的亚像素标定

为了检验标定的准确性,下面作一组标定实验加以验证.首先,在 MATLAB 中生成一个光强符合正弦分布的标准条纹图案(图 2(a)),条纹周期 T 为 20,亮度变化范围是 0~255.然后在测量条件完全相同的情况下,分别用形态学细化(图 2(b))和 Canny 算子(图 2(c))提取条纹中心线和边缘.



(a) Standard fringes



(b) Standard fringes after thinning (c) Standard fringes after edge detection by Canny operator

图 2 标准条纹及处理效果

Fig. 2 Standard fringes and its images after processing

如图 3,用形态学细化得到的都是条纹中心的位置 $p_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 或 $q_i (i=1, 2, 3, \dots)$,而用 Canny 边缘算子得到的是选用灰度阈值 T 时提取到的边缘 $t_i (i=1, 2, 3, \dots)$.分别采用这两种方法提取像素级的中心或边缘位置后,再用灰度拟合的方法,计算各段曲线的中心位置,这样,细化后结合灰度拟合得到的是条纹中心间距值 $B_i (i=1, 2, 3, \dots)$.用 Canny 边缘算子结合灰度拟合得到 $b_i (i=1, 2, 3, \dots)$,且应有 $B = b_i + b_{i+1}$.

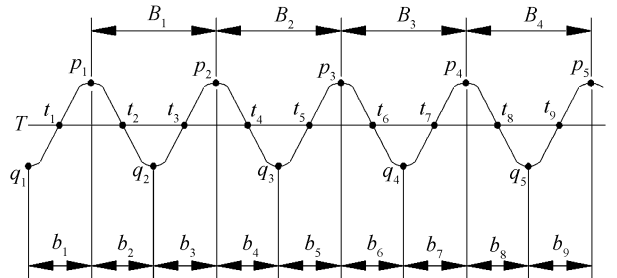


图 3 条纹中心亚像素算法原理

Fig. 3 Scheme of fringes centre position fixing by sub pixel algorithm

由于灰度阈值的选取会对计算结果引入随机误差,将上述两种方法的计算结果用组合测量结合最小二乘法处理数据,即可消除阈值选取引入的随机误差,得到标准条纹的标定结果,见表 1.

表 1 标准条纹的标定结果/pixel

Table 1 Calibration data of standard fringes/pixel

| | | |
|------------|---------|---------------------|
| | 10.0212 | |
| b_i | 10.0151 | |
| calculated | 10.0396 | |
| by fitting | 10.0228 | |
| after edge | 10.0386 | $\bar{t} = 10.0221$ |
| detection | 10.0139 | |
| by Canny | 10.0283 | |
| operator | 10.0272 | |
| | 10.0113 | |
| | 10.0181 | |

续表 1

| | | |
|------------|---------|-------------------|
| | 20.0735 | |
| | 20.0739 | |
| B_i | 20.1491 | |
| calculated | 20.0525 | |
| by fitting | 20.0295 | $\bar{T}=20.0610$ |
| after | 20.0461 | |
| thinning | 20.0247 | |
| | 20.0368 | |
| | 20.0633 | |
| Result | 20.0598 | |

表 1 中数据表明,本文采取的条纹中心的亚像素定位方法及数据处理方法可以达到亚像素准确度,条纹中心定位误差小于 0.1 个像素。

5 光栅的亚像素标定

用本文方法,对光栅图像(图 4(a))进行处理和计算,分别用形态学细化(图 4(b))和 Canny 算子(图 4(c))提取栅线中心线和栅线边缘。

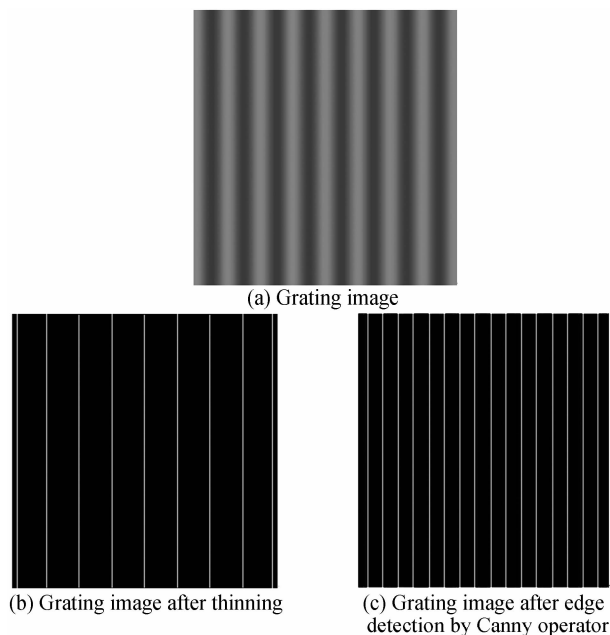


图 4 光栅图像及处理效果

Fig. 4 Grating and its images after processing

本文所选用的 CCD 是 PULNIX 公司的 TM-1402,像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m}(\text{H}) \times 4.65 \mu\text{m}(\text{V})$. CCD 的 X、Y 方向标定分开进行. X 方向标定后将 CCD 旋转 90° 后采用同样的方法可得 Y 方向的像素当量. 实验采集多组数据并进行处理,结果如表 2.

表 2 像素当量的标定结果/ μm Table 2 Calibration data of pixel/ μm

| Serial number | Pixel of X axis | Pixel of Y axis |
|---------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 4.6741 | 4.6422 |
| 2 | 4.6729 | 4.6351 |
| 3 | 4.6682 | 4.6373 |
| 4 | 4.6702 | 4.6354 |

续表 2

| | | |
|---------|--------|--------|
| 5 | 4.6663 | 4.6349 |
| 6 | 4.6761 | 4.6435 |
| 7 | 4.6747 | 4.6407 |
| 8 | 4.6738 | 4.6414 |
| 9 | 4.6676 | 4.6357 |
| 10 | 4.6691 | 4.6398 |
| Average | 4.6713 | 4.6386 |

表 2 中数据表明所选用的 TM-1402 CCD 的 X 方向和 Y 方向的像素当量分别为 $4.6713 \mu\text{m}$ 和 $4.6386 \mu\text{m}$.

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 $\theta=0.0676 \text{ rad}$. 条纹斜率 $\bar{k}=0.3518$, 得到焦距平均值 $\bar{f}=420.4296 \text{ mm}$, 焦距误差为 0.10% ^[12], 与 Talbot-Moiré 技术的其他方法相比, 准确度较高^[13].

6 结论

在实验研究的基础上, 用亚像素标定技术对 CCD 的像素当量进行了标定. 经过对标准条纹的标定, 验证了采用本文的标定方法能够达到亚像素的标定准确度. 采用光栅作为系统的自基准对 CCD 像素当量进行了亚像素标定, 为条纹斜率和宽度的计算提供了可靠的测量基准.

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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 高明, 刘雍牢. 光电仪器设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 226-230.
- [9] DONG Qiu-ling. Research on sub-pixel edge and center detection technology of coded structured light stripe [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2008.
- [10] 董秋玲. 编码结构光条纹亚像素边缘与中心检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008.
- [11] ZHANG Xiu-bao. Research on sub-pixel resolution object section contour measuring system based on line structured light [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.

- 张修宝. 亚像素分辨率线结构光物体截面轮廓测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- [9] LIN Yi-bin. A study of 3d profile measuring based on laser detecting[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2005. 林贻斌. 激光三维轮廓检测技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2005.
- [10] GAI Shao-yan. Strip image processing in 3-D profilometry measurement using grating projection[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. 盖绍彦. 结构光法形体检测系统中的条纹图像处理[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 94-116.
- [12] 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.
- [13] 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.

Sub Pixel Calibration 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 *Department of Measurement & Control Technology and Instrumentation, School of Optoelectronic Engineering Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China*)

Abstract: The focal length of measured lens can be figured out accurately according to its relation to the slope coefficient of Moiré fringes. An approach is presented to determine the location of grating centre at the level of pixel by Canny operator and detection based on mathematical morphology. The sub pixel localization is presented based on Gauss curve fitting. The localization accuracy is proved less than 0.1 pixel by calibrating the standard fringes. Then the grating is set as the reference to calibrate the equivalent length of CCD pixel to ensure the slope and width measuring of fringes accurate. The error of focal length is 0.10%.

Key words: Focal length measurement; Talbot effect; Moiré fringes; Sub pixel; Calibration



WU Ling-ling was born in 1977. She is currently pursuing her Ph. D. degree in optical engineering and her research interests focus on optical measurement.



CHEN Liang-yi was born in 1941. He is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on high speed photography, photoelectric theodolite and optical measurement etc.