

文章编号 1674-2915(2011)05-0509-05

## 精确自动识别莫尔条纹方向角的算法

王明佳<sup>1</sup>, 武治国<sup>1</sup>, 徐大鹏<sup>1</sup>, 李桂菊<sup>1</sup>, 张旭光<sup>2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 由于常规莫尔条纹计算方法难以满足速度和精度的要求, 本文提出一种快速准确求取莫尔条纹方向角的算法。该算法首先根据直线方向与莫尔条纹方向越接近则均方误差值越小的原理, 初步求得莫尔方向角  $\alpha$ , 之后采用 Mean-Shift 算法在方向角  $\alpha$  附近进一步精确求取莫尔条纹方向角。实验结果表明: 采用误差评判指标测试对比度满足 5.4% 时, 提出的算法所获得的莫尔条纹方向角计算精度达到 29', 同时计算速度相对频域处理方法大幅提高, 计算时间为 15 ms, 满足算法处理速度对实时性的要求。

**关键词:** 莫尔条纹; 自动识别; 均方根误差; Mean-Shift 算法  
**中图分类号:** TP391.41; O436.1 **文献标识码:** A

## Accurate and automatic recognition of Moiré fringe angle

WANG Ming-jia<sup>1</sup>, WU Zhi-guo<sup>1</sup>, XU Da-peng<sup>1</sup>, LI Gui-ju<sup>1</sup>, ZHANG Xu-guang<sup>2</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

**Abstract:** As traditional methods for calculating Moiré fringes can't satisfy the demands of precision and calculating speed, a fast method that can figure out the angle of the Moiré fringes accurately is put forward in this paper. According to the principle of the Root Mean Squared Error (RMSE) that the closer a series of data is, the smaller the value of the RMSE will be, the angle of the Moiré fringe  $\alpha$  is come out primarily. Then Mean-Shift algorithm is used to calculate the angle of Moiré fringe accurately in the neighborhood of the angle  $\alpha$ . Experimental result shows that when the contrast level is up to 5.4%, the precision of angle calculation achieves 29' according to the evaluation index of angle detection error. The computing speed of the algorithm has been increased largely as compared with those of the traditional methods, and it can achieve 15 ms, and satisfies the demand of real time.

**Key words:** Moiré fringe; automatic recognition; Root Mean Squared Error (RMSE); mean-shift algorithm

收稿日期: 2011-07-11; 修订日期: 2011-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60805045)

## 1 引言

光源照射光栅成像形成莫尔条纹,通过测量莫尔条纹光斑成像角度可以实现对光栅微小运动量的检测,其在刚体位移、结构变形、角度测量等方面应用广泛。由于莫尔条纹法具有高灵敏度、高分辨率、非接触测量等特点,其在民用和军用方面均有良好的应用前景。如何保证在多种恶劣成像质量条件下快速准确地计算莫尔条纹方向角已成为图像处理领域迫切需要解决的问题。常见的莫尔条纹检测方法有阈值分割算法<sup>[1]</sup>及频域处理算法<sup>[2]</sup>,阈值分割法计算速度快,但计算精度低;频域处理算法计算精度较高,但难以满足速度上的处理要求。针对此问题,本文提出了一种莫尔条纹处理算法。该算法采用最小均方差原理与 Mean-Shift 算法结合来计算角度,增强了抗干扰性,减少了处理时间,计算精度比传统方法大幅提高,可以满足工程实际需要。

## 2 莫尔条纹产生原理

光栅上平行等距的刻线为栅线,一般情况下透光的缝宽等于不透光的缝宽。通常选2个参数相同的光栅,刻划面相向叠合,且2只光栅夹角 $\theta$ 很小,在与光栅刻线大致垂直的方向形成明暗相间的条纹,称为莫尔条纹。若主光栅与指示光栅的夹角为 $\theta$ ,光栅距为 $W$ 时,相邻莫尔条纹间距 $B$ 满足式(1):

$$B = \frac{W}{2\sin(\theta/2)}. \quad (1)$$

从式(1)可以得到以下结论: $W$ 一定时,两光栅刻线夹角 $\theta$ 越小则 $B$ 越大,由于 $\theta$ 值很小,其倒数就相当大,因此莫尔条纹间距对光栅间距具有重要作用。利用莫尔条纹可以实现高精度的位移测量,因为莫尔条纹是光栅中大量栅线共同作用的结果,如果由于工艺原因其中某条栅线出现毛刺,就会使成像产生局部误差,但经过大量栅线的平均,局部误差对整体莫尔条纹位置及角度的影响是十分微小的<sup>[3]</sup>。

## 3 莫尔条纹角度计算原理

由于光栅加工工艺和使用场合不同,很难确保莫尔条纹的成像质量,从而造成图像质量多种多样,也使自动测量莫尔条纹的角度成为一个重要的研究课题。莫尔条纹成像具有许多共性,如各条纹角度相同,条纹宽度相等,通过测量图像整体方向角或者任意一条纹方向角便可以得到莫尔条纹角度。

给出一组数据 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ,其均值计算如式(2)所示:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2)$$

该组数据均方根误差如式(3)所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

通过式(3)可以看出,该组数据的数值越接近,其均方根误差越小。依此原理,在莫尔条纹图像上划一条直线,在该直线经过位置取图像灰度值,如图1所示。如果直线 $a$ 方向与莫尔条纹方向一致,则与该直线对应的一组数据数值接近,式(3)中根号内数据接近0,均方根误差值 $\sigma$ 最小;直线 $c$ 与莫尔条纹方向垂直,该直线方向图像数据波动最大,其均方根误差 $\sigma$ 也最大。

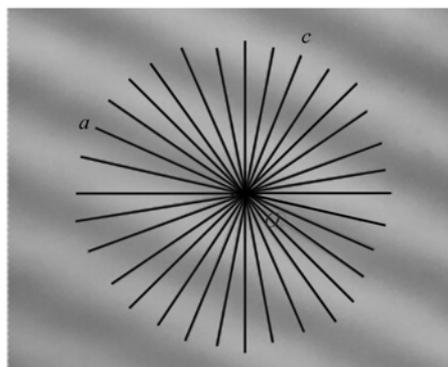


图1 在莫尔条纹图像中等间隔划直线求取方向角  
Fig.1 Setting lines in even interval in image to get the angle of Moiré fringe

图1中直线  $a$  平行莫尔条纹方向,通过统计最小均方根误差发现,误差值  $\sigma$  与直线  $a$  经过的位置有关,当直线  $a$  经过条纹最亮区域或者最暗区域时,  $\sigma$  值最小,当直线经过莫尔条纹明暗过渡区域时,该位置图像灰度值变化幅度较大,造成  $\sigma$  值较大,该位置不利于莫尔条纹方向角的计算,因此直线选取要遵循一定的原则。

以下是根据最小均方根误差原理计算莫尔条纹方向角的步骤:

第一步:在莫尔条纹图像中心区域建立处理区域,在处理区域内寻找灰度值最大的位置,该位置即为  $O$  点。如果  $O$  点处于处理区域边缘位置,将处理区域扩大,继续搜索最亮点,直到最亮点  $O$  不落在处理区域附近为止;

第二步:以  $O$  点为中心,每隔  $1^\circ$  划一条直线,提取该直线经过图像位置作为一组数据,寻找这些直线中均方根误差  $\sigma$  值最小的直线,如图1所示,直线  $a$  均方根误差最小,初步找到莫尔条纹方向。

### 4 Mean-Shift 迭代

为精确求取莫尔条纹方向角,将 Mean-Shift 向量引入到细分算法中。Mean-Shift 向量  $M_h(x)$  的物理意义表征为样本点集  $x_i$  相对几何中心  $x_0$  的偏移向量,它总是指向样本分布最多的区域,也就是概率密度梯度方向。Mean-Shift 向量  $M_h(x)$  计算公式如式(4)所示:

$$M_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n G(\frac{x_i - x_0}{h}) w(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n G(\frac{x_i - x_0}{h}) w(x_i)} - x_0 \dots, (4)$$

式中:  $G(x)$  是单位核函数,  $x_i$  表示采样点,  $x_0$  表示采样点集几何中心位置,  $h$  表示采样带宽,  $w(x_i)$  是一个赋给采样点  $x_i$  的权重,对于 Mean-Shift 算法表示一个迭代步骤,如果把式(4)中第一项记为  $m_h(x)$ , 即:

$$m_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n G(\frac{x_i - x_0}{h}) w(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n G(\frac{x_i - x_0}{h}) w(x_i)} - x_0. (5)$$

给定一个初始点  $x_0$ ,核函数  $G(X)$ ,容许误差  $\varepsilon$ ,Mean-Shift 算法循环执行下面3步,直至满足约束条件:

- (1) 计算  $m_h(x)$
- (2) 把  $m_h(x)$  赋值给  $x$
- (3) 如果  $\|m_h(x) - x\| < \varepsilon$ , 结束循环; 否则, 继续执行(1)。

为简化计算量,  $G(X)$  采用单位均匀核函数,  $w(x_i) \equiv 1$ , 以图1中直线  $a$  为初始点, 令  $x_0 = a$ 。以直线  $a$  为中心, 该直线两侧角度  $1^\circ$  内各等间隔划分30次, 莫尔条纹方向角细分精度达到  $2'$ 。利用细分的直线进行迭代, 其中迭代参量  $x_i = \sigma_i$ ,  $\sigma_i$  为细分直线的均方根误差, 采用 Mean-Shift 迭代算法, 不断更新最优角度, 从而实现莫尔条纹方向角的精确测量。

### 5 实验

为验证本文算法莫尔条纹的识别能力, 在计

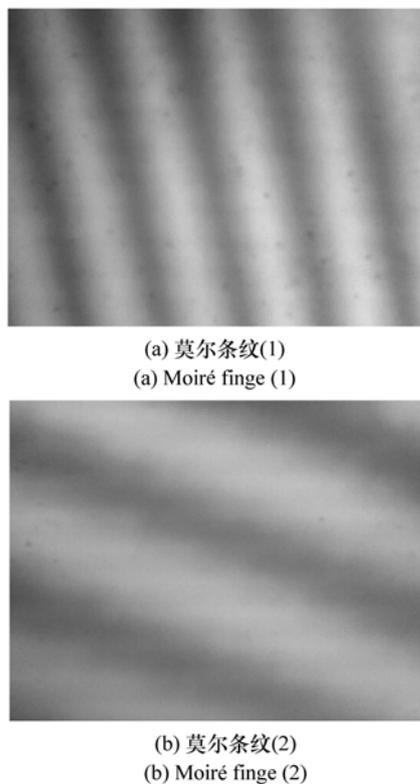


图2 莫尔条纹实验

Fig.2 Experiments of Moiré fringes

计算机上完成了一系列实验以进行测试,计算机配置采用双核处理器,CPU为2.4 GHz,内存2 G,编程工具为VC6.0,采用角度检测误差 $\delta_\alpha$ 作为莫尔条纹评判指标, $\delta_\alpha$ 定义如式(5)所示:

$$\delta_\alpha = \|\alpha_f - \alpha_c\|, \quad (5)$$

式中: $\alpha_f$ 表示莫尔条纹实际角度, $\alpha_c$ 表示计算的莫尔条纹角度。图2(a)、2(b)分别是莫尔条纹成像图像,采用本文提出的自动识别算法与频域莫尔条纹算法进行比较,比较结果见表1。通过表1可以看出,本文提出的莫尔条纹角度检测方法比频域方法精度略高,处理时间大大缩短,频域方法计算时间为300 ms,本文方法计算时间为15 ms。从实验数据可以看出,识别精度主要受图像对比度以及图像信噪比的影响,在信噪比高、图像对比度高的情况下,采用本文提出的莫尔条纹计算方法获得的处理精度能够满足工程实际需求。

#### 参考文献:

- [1] 李龙林. 莫尔条纹特性检测及其图像处理[D]. 重庆:重庆大学,2009.  
LI L L. The detection of Moiré fringe speciality and image processing[D]. *Chongqing:Chongqing University*,2009. (in Chinese)
- [2] 李向荣. 基于 CCD 的莫尔条纹图像频域处理研究[J]. 电子器件,2007,30(2):617-619.  
LI X R. Research of frequency domain processing of Moiré fringe grabbed by CCD[J]. *Chinese J. Electron Devices*,2007,30(2):617-619. (in Chinese)
- [3] 赵长海,万秋华,龙科慧. 莫尔条纹信号采集的自适应采用系统[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(6):143-145.  
ZHAO CH H,WAN Q H, LONG K H. Self-adaptive sampling system for Moiré fringe signal[J]. *J. Wuhan University Technol.*,2008,30(6):143-149. (in Chinese)
- [4] 徐进,陈浙泊,李燕,等. 可编程成像系统中莫尔条纹处理方法研究[J]. 光子学报,2008,37(2):325-327.  
XU J,CHEN ZH B,LI Y, *et al.*. A processing method for Moiré fringe in programmable imaging systems[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008,37(2):325-327. (in Chinese)
- [5] CASTLEMAN K R. *Digital Image Processing*[M]. New Jersey:Prentice Hall,1998.
- [6] LI X R,Q Y F,LIU W. Grating interferometry method for torsion measurement[J]. *SPIE*,2006,6027:39-44.
- [7] OTSUBO M,OKADA K. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms[J]. *Opt. Eng.*,1994,33(2):608-613.
- [8] SUZU KI M,KANA YA M. Application of Moiré topography measurement methods in industry[J]. *Opt. Laser Eng.*,1988,8(3):171-188.
- [9] TA KASA KIH. Moiré topography[J]. *Appl. Opt.*,1970(9):1468-1472.
- [10] MORIMOTO Y,YANG I H,GU C G. Scanning Moiré method for obtaining fringe patterns[J]. *Opt. Laser Eng.*,1996,24(1):3-17.
- [11] 程仕东,张学军,张忠玉,等. 基于相移电子莫尔条纹的深度非球面检测[J]. 光学精密工程,2003,11(6):250-255.

表1 频域方法与本文方法检测角度的误差比较

Tab.1 Comparison between frequency algorithm and proposed algorithm in this paper

	图像对比度	$\delta_\alpha$	
		频域方法	本文方法
1	31.5%	56'	7.5'
2	22.3%	1°4'	9.8'
3	10.3%	1°42'	13.3'
4	5.4%	2°23'	29'

## 5 结 论

提出了莫尔条纹自动检测算法。该算法采用最小均方差原理与 Mean-Shift 算法相结合来计算角度,增强了抗干扰性,缩短了处理时间。相对传统算法该算法的计算精度得到大幅度提升,能够在较低对比度下实现条纹检测,当目标对比度为5.4%时,角度精度误差 $<29'$ ,能够满足工程需要。

- CHENG SH D,ZHANG X J,ZHANG ZH Y,*et al.*. Deep aspheric testing based on phase-shift electronic Moiré patterns [J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,11(6):250-255.
- [12] 小野明. 检验非球面的疑似移动莫尔条纹法[J]. *光学精密机械*,1989(1):26-32.
- XIAO Y M. The examination aspheric surface using moving Moiré patterns methods[J]. *Opt. Precision Machinery*,1989(1):26-32. (in Chinese)
- [13] IDESAWA M,YATAGAI T,SOMA T. Scanning Moiré method and automatic measurement of 32D shapes[J]. *Appl. Opt.*,1977,16(8):2152-2162.
- [14] 高俊. 莫尔条纹的处理[J]. *印刷杂志*,2003(3):53-54.
- GAO J. Processing Moiré Fringe[J]. *Printing Field*,2003(3):53-54. (in Chinese)
- [15] NAYAR S K,BRANZOI V,BOULT T. Programmable imaging using a digital micromirror array[C]. *In 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington, USA, 27 June-2 July 2004(1):436-443.

作者简介:王明佳(1976—),男,吉林人,副研究员,博士,主要从事图像处理与目标跟踪方面的研究。

E-mail:wmjstar@163.com

---

## 《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价:50.00 元/册