

文章编号 1004-924X(2002)01-0019-06

环栅图像的数字莫尔条纹扫描定中方法

赵 斌

(华中科技大学 机械学院 仪器系,湖北 武汉 430074)

摘要:提出了数字环栅莫尔条纹扫描方法。该方法不是用实物环光栅与无衍射光的光斑重叠产生环形莫尔条纹。而是先用 CCD 摄像机将光斑摄入计算机,再与一基本同心的数字环光栅重叠产生环形莫尔条纹。改变该数字光栅的相位,可实现莫尔条纹扫描,用多幅扫描图像可算出光斑图像整体中心。由于利用了整幅图像的数据,该法实现了含噪环栅状光斑图像的亚像素级灵敏度定中心。统计模拟实验证明,它具有良好的抗干扰能力。并介绍了该方法在空间直线度测量方面的应用实验。

关键词:莫尔条纹;无衍射光;定位;数字图像处理

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A

1 引言

光束在工程技术上常被用来作为直线的自然基准,然而,深入研究发现要用好这一基准仍存在许多问题^[1-2]。用无衍射光束代替一般的光束,将其特有的环栅状光斑中心的传播轨迹作为自然直线基准,是一种新的进行直线度测量或准直技术,理论上它具有对准灵敏度高、测量位置连续、受激光器光轴热漂移影响小等优点^[3]。在这一技术的实现中,环栅状光斑中心的对准方法对于测量精度有着决定性的影响。基于单一中心光斑和基于单一莫尔条纹环的中心计算方法都受背景和杂散光的严重干扰,因而对器件和环境有较高的要求。为解决这一难题,本文提出一种环栅状光斑整体中心的定义和算法,它能利用整个图案的全部数据来计算中心位置,因而具有亚像素定中精度和强抗干扰能力。

2 问题的提出

无衍射光^[4-7]是 Durnin 于 1987 年提出并用实验验证的一种等距圆环光束,圆环径向的光强分布符合贝塞尔(Bessel)函数(图 1a),且不随传

播距离而变化,这是其他形式光束——例如单模激光器的高斯光束——所不具有的优点。无衍射光的这一优点可以被应用来在精密工程中做直线度测量。原理是将光斑中心的传播轨迹作为一条理想的自然直线基准,而被测量物体位置相对于这条直线的偏差就是直线度误差。实现这一技术的关键是如何对准无衍射光的环栅状光斑。然而在实验中却遇到一个问题:实际光斑上总是含有杂散背景光和噪声(图 1b)。并且由于种种原因也有不均匀性和变形,在这种情况下如何高精度地确定这样一种环栅状光斑的中心是亟待解决的问题。

首先想到的方法当然是直接利用最里面的中央光斑,即图 1a 中的零级极大的位置。理论上这个位置上的光强是最大的,但当光的衍射波阵面有误差时,衍射斑——特别是坐标中心区域——就将发生变化^[7-8],波差大时衍射斑的形状将难以预计。因此,中心区域光强最大点位置实际上有相当大的不确定范围(图 1b);另一方面,直接根据光强度极大来确定中心,其位置极限精度最高为一个探测单元的尺度(对现有 CCD 图像探测器,探测单元尺寸约为 6 μ m),这往往达不到某些精密测量的要求。

既然单独一个中心点不可靠,那就很自然想

收稿日期:2001-03-23;修订日期:2001-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目无衍射光莫尔条纹二维直线度测量理论与技术研究(No. 59805006)

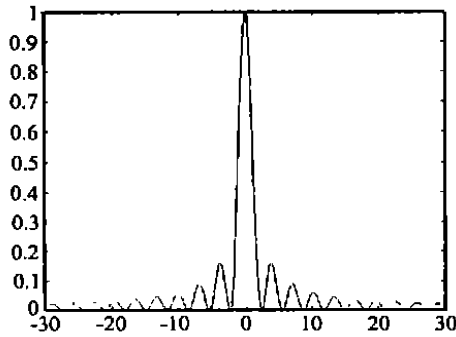


图 1(a) 无衍射贝塞尔光

Fig. 1(a) Nondiffractive beam - Bessel beam.

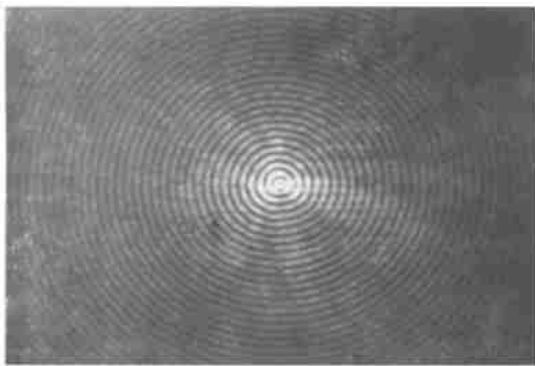


图 1(b) 无衍射光的实验照片

Fig. 1(b) Experimental photograph of nondiffractive beam.

到能否象普通干涉条纹的处理那样,利用更多的测量点来提高精度,甚至实现亚像素级分辨率呢?显然中心点之外的那一系列圆环理论上都是同心的,尽管在环周上每一个局部,它们都可能受到各种干扰而变形,但在视觉上却感到在整体上它们的中心应该是稳定不变的。那么,用什么方法来找这个整体中心呢?

类比计量光学中的莫尔(Moiré)条纹技术,作者曾提出了一种无衍射光莫尔条纹技术,即用一个环形光栅与无衍射光重叠(图 2a),当环光栅和环栅状光斑的栅周期(即光栅常数)有很小差别时,就会产生很粗的莫尔条纹环(图 2b)。当光栅中心和光斑中心有微小偏差时,莫尔环的中心将有一个放大了许多倍的偏移(图 2c),因此,就可以反过来通过测量莫尔环中心的偏移来推算光栅中心的偏差。这一技术在计算中心时利用了一个环带的的数据。但同时又出现了另一个问题,莫尔条纹环随光束传播距离的增加,出现不均匀、中断、甚至消失的现象,并且莫尔环上各处的变化还

往往是不同步的,这就影响了莫尔条纹环的提取和定位精度,从而降低中心的拟合精度,要消除这一影响,必然对光束和光栅的制造精度提出很高的要求,从而影响该技术的应用。因此,我们又回到初始的目标——寻找一种能利用全部图像数据,并对局部光强非均匀性和误差不敏感的模式整体中心计算方法。

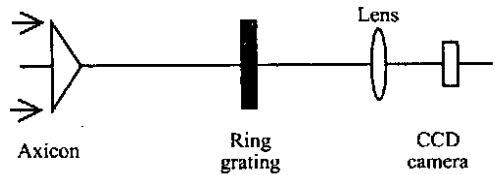


图 2(a) 环形光栅与无衍射光重叠产生莫尔条纹的实验装置

Fig. 2(a) Experimental setup for the generation of Moiré fringe by superposing the ring grating with the nondiffractive beam.

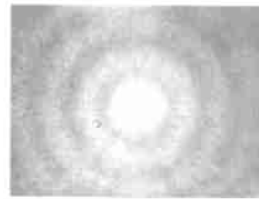


图 2(b) 无偏心莫尔环照片
Fig. 2(b) Photograph of unbiased Moiré rings.



图 2(c) 偏心莫尔环照片
Fig. 2(c) Photograph of biased Moiré rings.

为了避免实物环光栅的影响,作者提出一种数字式虚拟环栅技术,它直接利用无衍射光的光斑数据在计算机内与数字环栅重叠,得到高质量的莫尔条纹。不仅如此,还由于数字光栅的灵活可变性,进而实现了实物环光栅无法实现的莫尔条纹环的径向扫描,从而得到高精度的条纹环相位分布图,在此基础上导出了图像整体中心的一种定义和算法,解决了前面所述之问题。

3 原理

3.1 数字环栅、条纹扫描和图像整体中心

将图 2a 中的环光栅和透镜除去,直接测得一幅实验环栅状衍射图像 f , 设其环栅的中心在 $[x_0, y_0]$, 环栅的空间频率为 f , 于是 f 可以表达为:

$$f(x, y) = A(x, y) \sin(2\pi f R + \phi) + N(x, y), \tag{1}$$

其中 R 是图像中任一点到中心的距离:

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (2)$$

是常数相位; $A(x, y)$ 代表环栅各处的光强度不均匀性, 是一个缓变函数; $N(x, y)$ 代表背景和噪声。需要说明的是, 尽管 Bessel 函数不是严格的周期性函数, 但对于 R 较大的外环, 这种差别是非常小的, 事实上用 $A(x, y) = 1/(1 + aR)$ 可以很好地反映光强度的变化。

假设已知该测量图像 f 的中心, 并就以 $[x_g, y_g] = [x_0, y_0]$ 为中心, 生成一幅数字环栅图像 g :

$$g(x, y) = \sin(gR + \phi), \quad (3)$$

则 f 与 g 相乘得:

$$f \times g = \frac{1}{2} A(x, y) \cos[(g - f)R + \phi - \psi] - \frac{1}{2} A(x, y) \cos[(g + f)R + \phi + \psi] + N(x, y) \sin(gR + \phi), \quad (4)$$

若 $g > f$, 则上式的第一项是一个低频成分, 也就对应莫尔条纹。如果用二维数字低通滤波去掉上式中的其它高频成分, 就可以得到一幅数字莫尔条纹图像(图 3c):

$$M(x, y) = \frac{1}{2} A(x, y) \cos[(g - f)R + \phi - \psi], \quad (5)$$

且该莫尔条纹的环间距为 $2 / (g - f)$ 。

考察式(5)中 $M(x, y)$ 上的每一点, 可以发现它们都是随 R 做正弦函数变化的, 如果求出在 0 到 2π 之间的每一个 M , 就可以算出莫尔条纹上每一点的相位:

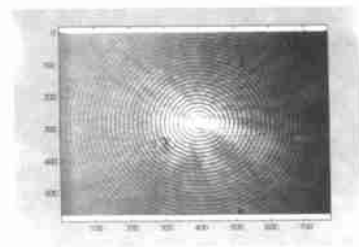
$$\phi(x, y) = (g - f)R - \arctan\left[\frac{M \sin \phi}{M \cos \phi}\right] + 2K, \quad (6)$$

其中 k 的选取是基于消除计算结果中的 2π 相位突变, 使 ϕ 连续变化。

这样, 就得到一幅相位图 $\phi(x, y)$ (图 3d), 显然, ϕ 的大小正比于离开 $[x_0, y_0]$ 的距离, 因此 ϕ 是一个圆锥(图 3e), 如果用一个理想圆锥来拟合 $\phi(x, y)$, 则理想圆锥的顶点 $[x_m, y_m]$ 在没有误差时也应 $[x_0, y_0]$, 因此相位圆锥 $\phi(x, y)$ 的拟合顶点可以作为图像整体的中心。至此, 就

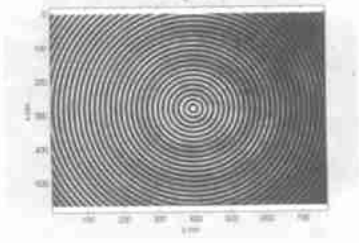
得到了想要的环栅图案的整体中心(图 3f)。

当 ϕ 变化时, 莫尔条纹 M 从里向外冒出、扩大, 或从外向里缩小、消失, 因此这其实就是一种条纹扫描, 只不过这种扫描是靠软件来实现的, 而不是象普通光学干涉那样靠改变光程差来实现^[10-11]。当然, 与光学干涉条纹扫描技术一样, 利用数字莫尔条纹扫描得到的多幅图像数据, 也可以有效地将条纹的相位信息从背景和噪声中提取出来。

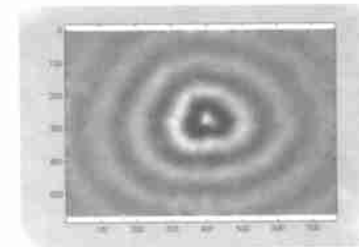


(a) 原始图 f

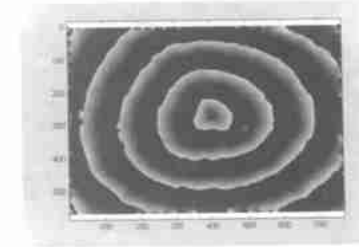
(a) Original pattern.



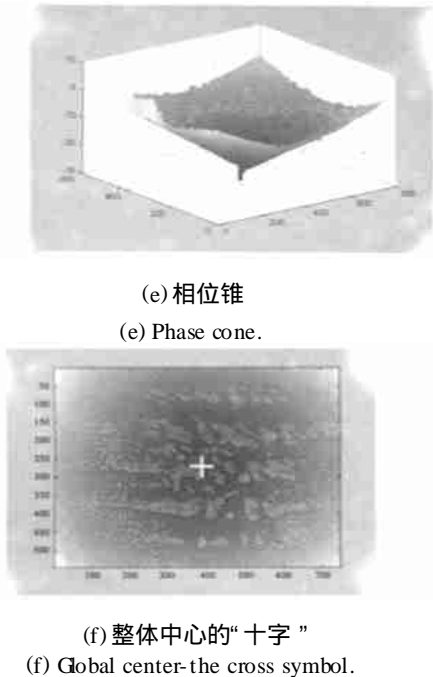
(b) f x g.



(c) M(x, y).



(d) phi(x, y).



(e) 相位锥
(e) Phase cone.

(f) 整体中心的“十字”
(f) Global center-the cross symbol.

图 3 数字莫尔条纹扫描图像整体中心的计算过程
Fig. 3 Calculation procedure of global center of the pattern by digital Moiré fringe scanning.

3.2 环栅中心的计算方法

根据前面的分析,设计了一个求图像整体中心的迭代算法:

对于任一初始 $[x_g, y_g]$,依次生成数字环栅、莫尔环、相位锥,求出此时的相位锥顶点 $[x_m, y_m]$

根据数字环栅与相位锥偏心量之间的关系

$$x_m - x_g = x_m - x_0 = \frac{e(x_g - x_0)}{(g - f)}$$

得到 x_0 ,并将其作为新的 x_g :

$$x_0 = x_g = x_g + (x_m - x_g) \frac{(e - f)}{g}$$

然后重复步骤。 y_g 作同样的处理。

经过这样的迭代,最终可以达到 $x_m - x_g = 0$,也就是数字环栅中心与相位锥中心合一,此时可认为找到了图像的整体中心 $[x_0, y_0]$ (图 3f 中的“十字”)。

4 算法对噪声的敏感性估计

由于在式(1)的背景和噪声项 $N(x, y)$ 中,不可避免地包含有空间频率为 f 的成分,因此,它对低通滤波后的结果 $M(x, y)$ 必然造成影响,

从而影响相位锥及最终的整体中心拟合精度。

尽管原则上可以根据统计理论来估算这种整体中心的计算精度,然而用解析的方法来分析比较烦琐,因此,作者用蒙特卡罗随机实验方法对一幅 568×768 的测量图像进行了数值模拟分析。首先,利用计算机的伪随机噪声发生函数(例如 Matlab 软件中的 imnoise 函数)产生方差为 σ^2 的若干幅高斯型噪声图像,然后迭加在同一幅测量图像上,再计算含噪图像的莫尔环变动量 m (即 x_g, y_g 不变时 x_m, y_m 的变化)和整体中心变动量 o ,通过若干次这种迭加高斯型随机噪声的计算,得到莫尔环中心和整体中心的位置方差与噪声水平 σ^2 的大致关系(表 1)。(计算中, $\frac{(e - f)}{f} \sim 0.13$)。

表 1 噪声影响的数值模拟(m 和 o 的单位是像素)
Table 1 Numerical simulation of noise effect (units of m and o are pixels, respectively)

| Noise level | Deviation of Moiré fringe's center m | Deviation of global center o |
|-------------|--|--------------------------------|
| 0.010 | 0.497 | 0.113 |
| 0.005 | 0.299 | 0.034 |
| 0.0025 | 0.153 | 0.013 |
| 0.001 | 0.073 | 0.009 |

需说明的是,由于中心点光强远大于外围条纹的光强,所以,当中心光强归一化为 1 时,计算中 $\sigma^2 = 0.01$ 的噪声对灰度范围为 $0 \sim 1$ 的图像的影响已非常严重。尽管由于实验计算次数有限,从而样本数有限,但还是可以得出定性结论:整体中心计算方法对图像噪声是不敏感的;整体中心计算灵敏度远比探测单元尺寸小,即可以实现亚像素分辨率;从 m 和 o 的数量关系看,基本符合莫尔条纹的放大倍数,即 $o \sim \frac{(e - f)}{f} m$ 。以上仅是理论分析,实际精度还需由系统各部分的精度保证。

5 应用

本文作者将上述数字莫尔条纹扫描的方法应用于空间(或二维)直线度测量或准直测量,测量实验装置如图 4,激光经 BEP 扩束准直后照射在圆锥透镜 Axicon 上,并在其后形成无衍射光束区,CCD 摄像机置于被测量的导轨上,并沿导轨

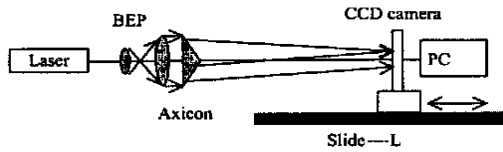


图 4 空间直线度测量装置示意图

Fig. 4 Experimental setup for space straightness measurement.

移动。在导轨的每一个 L 位置, CCD 摄像机摄下光斑图像(图 3a), 传送到计算机, 经上述方法处理(图 3)后得到每一幅图像的整体中心的位置, 其 x 方向和 y 方向的数据如图 5a 所示, 先分别计算出两组数据的直线性偏差, 结合后就得到了该导轨的空间直线度曲线(图 5b), 图中偏差轴的单位是 μm , 由此可以看出该导轨的直线度特性和数值大小。

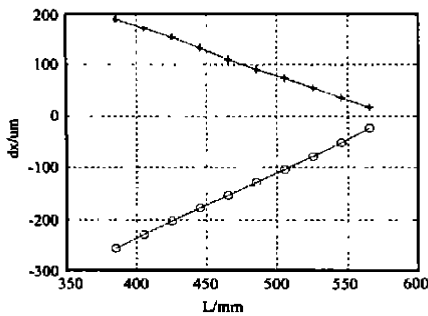


图 5(a) ‘*’为 X 方向数据, ‘o’为 Y 方向数据

Fig. 5(a) ‘*’ refers to data of X direction; ‘o’ refers to data of Y direction.

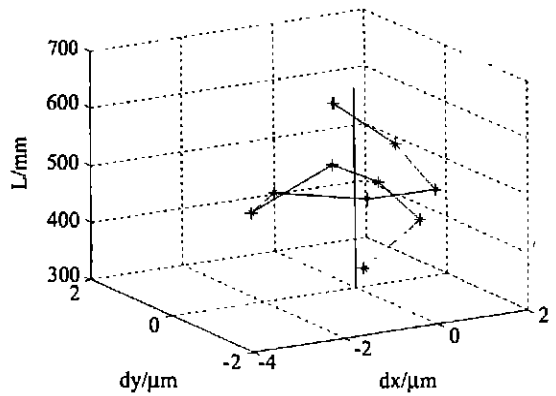


Fig. 5(b) 导轨的空间直线度曲线

Fig. 5(b) Space straightness curve of the slide.

若与其他技术手段(例如转镜扫描)相结合, 本文所述方法还可以应用在许多需要空间精密对准的技术上。

6 结 论

通过数字莫尔条纹扫描的方法, 可以从一幅含有大量杂乱背景和噪声的环栅图像中, 找出其条纹的相位分布图——相位锥, 从而确定环栅图像的整体中心。这一技术避免了用实物环光栅所带来的各种误差和干扰, 并可以实现亚像素级的定位灵敏度, 为用无衍射光作自然直线基准这一新技术设想的实现解决了一个关键的问题, 有利于该技术的实用。

参考文献:

[1] 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986.
 [2] 殷纯永. 光电精密仪器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
 [3] 张新宝, 赵斌, 李柱. 无衍射光莫尔条纹空间直线度误差的测量方法[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(7): 44.
 [4] Durnin J. Diffraction - free beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 68: 1479 - 1501.
 [5] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I: the scalar theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, (4): 651 - 654.
 [6] Herman R M. Production and uses of diffractionless beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, 8(6): 932.
 [7] 周莉萍, 赵斌, 李柱. 无衍射光束理论与实现[J]. 光学精密工程, 1997, 5(4): 14.
 [8] Zhao B. Diffraction property of an axicon in oblique illumination[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 13(37): 2563.
 [9] 赵斌. 波面偏心对 axicon 透镜衍射图的影响[J]. 应用激光, 1997, 17(6): 247.
 [10] 马拉卡拉 D. 光学车间检验[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
 [11] 苏绍景, 吕海宝, 李圣怡. 基于 DSP 的宽动态范围莫尔条纹计数与精密细分技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 146

Digital Moiré fringe scanning method for centering ring grating images

ZHAO Bin

(College of Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract : Moire fringe scanning method of digital ring gratings is proposed. Instead of generating ring Moire fringe by superposition of real circular grating and nondiffractive beam, the author photographed the beam images into computer, and then superposed them with a digital circular grating, whose center position is close to the measured images. Changing the phase of digital grating can realize Moire fringe scanning. The global center of beam pattern can be calculated by multi-frame scanning images. Because the total data of pattern are used in calculation, the determination of center of the ring pattern with noise is realized with subelement sensitivity. Statistical analysis shows that this method features good anti-interference ability. The application of this method in the measurement of space straightness error is also introduced.

Key words : Moire fringe; nondiffractive beams; positioning; digital image processing

作者简介:赵 斌(1963 -),男,江西省南丰县人,副教授,博士,光学测量技术。

欢迎您订阅《光机电信息》

《光机电信息》是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办的科技类信息刊物。主要报道国内外光机电领域的前沿与发展动态,内容包括光学、光电子学、激光、光通信、发光学、精密机械、医用光学、军用光学、航空航天技术、微机械、计算机与测量技术等高新技术的各个领域,涉及科技热点评述、趋势与动向、科学专题、研究综述、科学探索、市场动态、新产品开发和高新技术产业化等多方面内容。

为满足不同读者的不同需求,在传播和报道国内外最新信息的同时,《光机电信息》编辑部努力将办刊和为科研生产服务有机地结合在一起,对《光机电信息》所报道的每一专题,乃至每一条信息,都可以利用长春光机所的丰富馆藏优势和先进的计算机检索系统,为读者展开深层次的文献跟踪服务。

本刊为月刊,国内外公开发行,每期定价 7.5 元,全年 90.00 元(含邮费)。订户可通过银行和邮局汇款。

地 址:长春市 1024 信箱《光机电信息》编辑部

开户行:中行吉林省分行营业部

帐 户:04 单位 438 部

帐 号:01471908091001

国内邮发代号:12 - 171

《光机电信息》编辑部