

文章编号: 0253-2239(2009)07-1868-04

基于结构光的光线追迹与波前重建方法

赵文川 苏显渝 张启灿 刘元坤

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种基于结构光条纹成像的光线追迹和波前重建方法。以结构光条纹相位为信息载体,采用相移技术精确地测量结构光条纹成像过程中相位的变化,实现高分辨的光线追迹,得到点列图。由于光线传播方向与波前垂直,因此可以实现波前重建。将一个液晶显示器(LCD)置于点光源后,显示正弦灰度调制光栅图样以产生标准条纹光束。条纹光束通过被测光学元件后,发生变形。CCD记录下变形条纹图样,根据相移技术进行处理,计算后完成测量。由于调制光栅图样是由计算机产生的,所以光栅的周期和方向可以灵活设置,并可以实现精确的相移。实验验证了该方法的可行性。

关键词 光学测量; 波前; 点列图; 结构光; 相移技术; 液晶显示器

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1868

Ray Tracing and Wavefront Reconstruction Based on Structured-Light Imaging

Zhao Wenchuan Su Xianyu Zhang Qican Liu Yuankun

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract A method for ray tracing and wavefront reconstruction is presented based on the structured light imaging. The phase information is carried in the fringes of structured light. The phase changes in the imaging process can be tested accurately by the phase-shifting technique and then used for ray tracing to get the spot diagram. The wavefront can be reconstructed because of the light traveling in direction normal to wavefront. A liquid crystal display (LCD) is illuminated behind a point light source, which displays the sine intensity-modulated patterns. The standard fringe beam is deformed when it travels through the tested lens. A CCD camera detects the deformed fringes and evaluation of the tested lens is done by the fringe analysis. The use of a computer display generation leads the flexible adjustment of period and direction of the patterns and accurate phase shift. The experiment confirms the feasibility of this method.

Key words optical measurement; wavefront measurement; spot diagram; structured light; phase-shifting technique; liquid crystal display (LCD)

1 引 言

目前多采用干涉法对波前进行测量,而剪切干涉仪利用被测波前与其自身经过某种变换(横向或径向剪切等)后的波前比较从而完成干涉计量,都需要有相干照明以及一套精确设计的光学系统,对测试环境的要求比较高,测量的动态范围也很有限^[1]。结构

光测量法信息量丰富,如相位测量轮廓术以及傅里叶变换轮廓术等具有方法简单,高精度,能够进行快速全场测量等优点,目前已被广泛应用于三维传感技术之中^[2~4]。Dan Liu等提出了一种扫描型哈特曼检测装置,但该方法效率不高,当需要较多的抽样点时尤其费时^[5,6]。本文提出一种基于结构光条纹成像的光

收稿日期: 2008-08-14; 收到修改稿日期: 2008-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 赵文川(1983-),男,博士研究生,主要从事光学检测和信息光学等方面的研究。

E-mail: zhaowc168-98@163.com

导师简介: 苏显渝(1944-),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xianyusu@mail.sc.cninfo.net

线追迹和波前重构方法,将一个液晶显示器(LCD)置于点光源后显示由计算机生成的正弦灰度调制光栅图样以产生结构光条纹光束,根据光线传播方向与波前垂直的关系实现波前重建。

2 基本原理

测量装置如图 1 所示。从点光源发出的光线经过准直透镜后形成一准直光束照射到被测镜上,在两者之间放有一 LCD,显示由计算机生成的正弦灰度调制光栅图样,这样就产生了标准的条纹光束。通过被测镜后,在屏上形成变形的条纹图样被 CCD 相机拍得。屏和相机进行了标定。在水平 x 和垂直 y 方向上,分别使用相移技术得到截断相位图,再从中心开始进行相位展开,得到了变形的条纹的连续相位分布,其中携带了被测镜的信息^[7,8]。对相位分布进行多项式拟合后求出等相位线,将两组等相位线叠加,计算出交点的位置^[9,10]。本文利用结构光条纹的相位信息进行光线追迹。假设发自点 $M(x_t, y_t, 0)$ 的光线与屏相交于点 $N(x_0, y_0, z_0)$,显然两点分别在 x 和 y 方向的相位值都是相同的。根据几何关系,光线的直线方程可以表示为

$$\frac{x - x_t}{x_0 - x_t} = \frac{y - y_t}{y_0 - y_t} = \frac{z - z_t}{z_0 - z_t} \quad (1)$$

所以由(1)式可得该光束与任一位置 z 处垂直于光轴的截面相交的坐标,可得到所有等位线交点代表的光线相交于焦平面附近任意截面的位置分布图,即点列图,代表了此截面上的能量分布。找到能量分布最集中的截面位置即为最佳焦平面位置^[5,6]。

出射光线方向代表了波前分布的法线方向,如图 1 中, θ 角表示了波前法线方向:

$$\tan \theta_x = \frac{x_0 - x_t}{z_0}, \quad \tan \theta_y = \frac{y_0 - y_t}{z_0} \quad (2)$$

波前函数 $W(x, y)$ 与 θ 关系^[11,12] 为

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \tan \theta_x, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \tan \theta_y \quad (3)$$

对(3)式通过积分的方法重建出待测相位物体波前

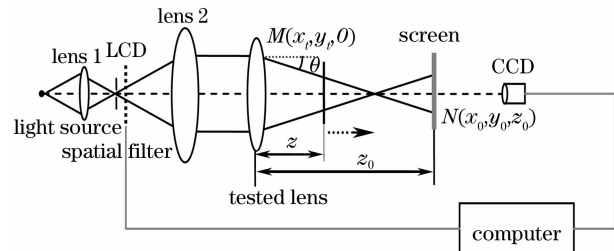


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

分布 $W(x, y)$,再对此重构波前用最小二乘法进行球面拟合,两者之差就是实际波前与理想波前的误差^[13~15]。数据处理的流程如图 2 所示。

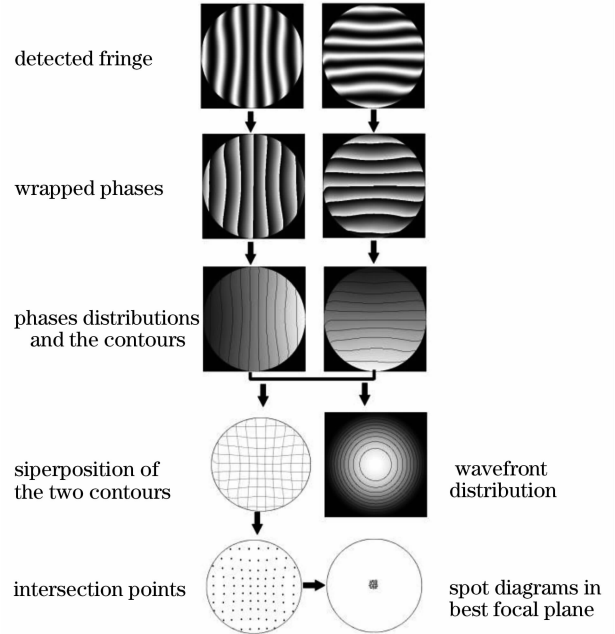


图 2 数据处理流程图

Fig. 2 Flow chart for data processing

3 实验结果

在测量过程中,条纹的强度噪声会对测量精度一定的影响,本文用计算机仿真分析。假设被测透镜直径为 8.0 cm,焦距为 30 cm,距屏的距离为 36 cm。当在条纹图中加入 1% 的随机噪声时,最佳焦平面距离为 29.9995 cm,重建波前误差分布如图 3 所示,可见误差小于 3×10^{-5} cm,因此,该方法具有较好的抗噪性。

选用的液晶显示器分辨率为 1024 pixel \times

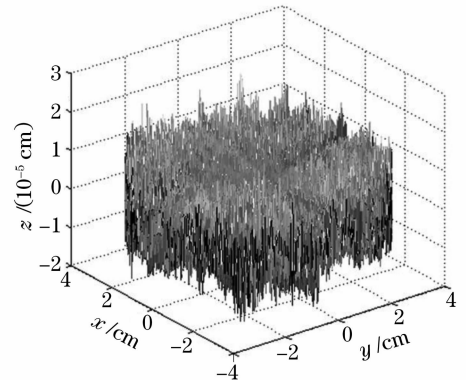


图 3 加入 1% 随机噪声时重建波前误差

Fig. 3 Reconstructed wavefront error added 1% random noise

768 pixel, 像素间距为 $36 \mu\text{m}$, 被测镜直径为 7.5 cm , 距屏的距离 z_0 为 37 cm 。对屏和相机进行了标定。图 4 为得到的实际变形条纹图, 由四步相移法得到的截断相位分布如图 5 所示。两方向等位线交点在屏处的分布如图 6 所示。图 7 为最佳焦平面处的点列图, 此位置为 27.3 cm 处。图 8 为重构波前分布。理想光学系统中, 物空间的同心光束经系统后仍为同心光束, 即物空间一点通过系统成像后仍为一点, 对于任意大的物体, 以任意宽的光束成像都是完善的。平行光波入射通过一个理想透镜后会聚在焦点, 出射波前是中心在焦点的标准球面波前。测得的实际波前与理想波前的误差分布如图 9。

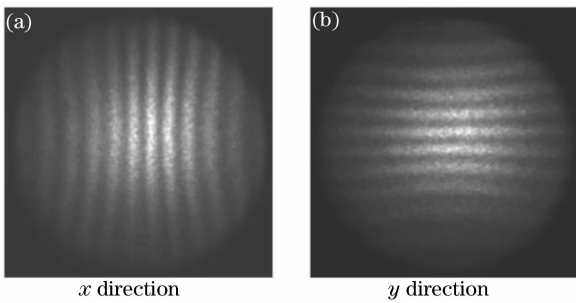


图 4 变形条纹图
Fig. 4 Deformed fringes

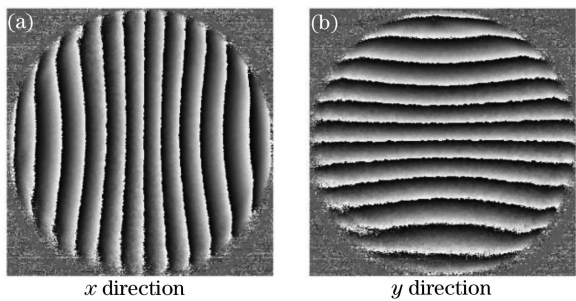


图 5 截断相位分布
Fig. 5 Wrapped phase distribution

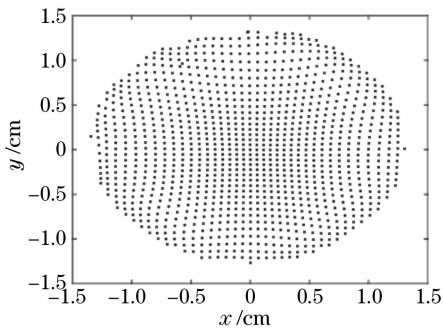


图 6 屏平面处的等相位线交点
Fig. 6 Equiphase intersection points in screen plane

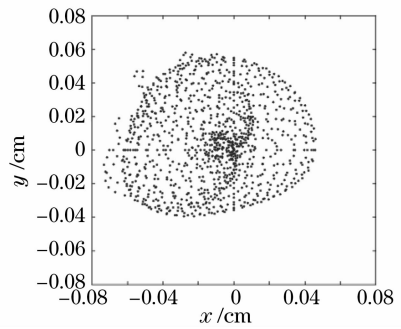


图 7 最佳焦面处的点列图
Fig. 7 Spot diagram in best focal plane

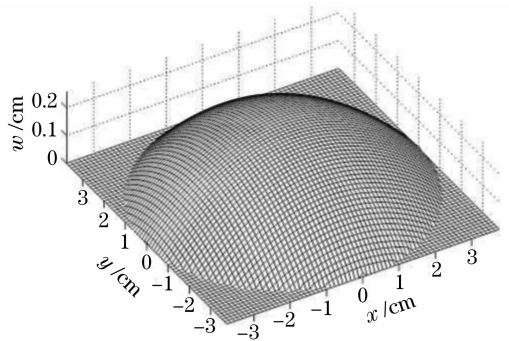


图 8 重构波前分布
Fig. 8 Reconstructed wavefront distribution

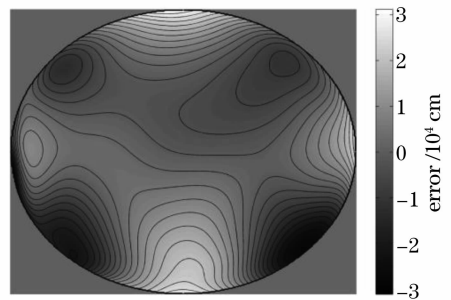


图 9 误差分布
Fig. 9 Error distribution

4 结 论

以结构光条纹成像为基础, 利用其丰富的相位信息, 实现了光线追迹和波前重建。此方法具有快速、简单、灵活性高等优点。采用 LCD 后, 光栅图样是由计算机产生的, 根据需要周期和方向可以实时设置和实现精确的相移, 提高了测量的灵活性, 而采用相移测量技术, 更提高了测量精度。在实际测量中还要考虑系统误差、检测过程中受随机噪音、光源的稳定性、平行光束质量、LCD 的透射率、条纹的可见度等方面的影响。

参 考 文 献

- 1 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998. 337
金国藩, 李景镇. *激光测量学*[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 337
- 2 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 97~102
毛先富, 陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 97~102
- 3 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1528~1532
李中伟, 王从军, 史玉升等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1528~1532
- 4 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486
吴迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486
- 5 D. Liu, H. Huang, B. Ren *et al.*. Encircled energy measurement for focusing lens based on scanning Hartmann test[J]. *Optik*, 2007, **118**(8): 357~360
- 6 Liu Dan, Yan Yan, Ren Bingqiang *et al.*. Scanning Hartmann inspection apparatus[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1377~1381
刘丹, 闫岩, 任冰强等. 扫描型哈特曼检测装置研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1377~1381
- 7 X. Y. Su, W. J. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 8 Su Xianyu, Chen Wenjing, Cao Yiping *et al.*. Phase unwrapping algorithm on the oriented parameter map[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(4): 463~467
苏显渝, 陈文静, 曹益平等. 参数图导向的相位展开方法[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(4): 463~467
- 9 J. Arasa, S. Royo, N. Tomás. Simple method for improving the sampling in profile measurements by use of the Ronchi test[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4529~4534
- 10 Nomura Takashi, Kamiya Kazuhide, Okuda Seiichi *et al.*. Shape error measurement using ray-tracing and fringe scanning methods; Projection of grating displayed on a liquid crystal panel [J]. *Precision Engineering*, 2002, **26**(1): 30~36
- 11 H. Canabal, J. Alonso. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge-coupled device camera[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(4): 822~826
- 12 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Wavefront measurement for transparent object by active deflectometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 515~518
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明物体波前测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 515~518
- 13 Liu Yuankun. Measurement of 3D Shape for Optical Surface Based on Structured Light Projection [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. 10~13
刘元坤. 基于结构光投影的光学面形测量方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2004. 10~13
- 14 W. S. Li, T. Bothe, C. von Kopylow *et al.*. Evaluation methods for gradient measurement techniques[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 300~311
- 15 Jing Hailong, Su Xianyu, Liu Yuankun. Shape reconstruction methods from gradient field[J]. *Laser J.*, 2007, **28**(6): 41~43
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤. 基于梯度数据的三维面形重建方法[J]. *激光杂志*, 2007, **28**(6): 41~43