

文章编号: 0258-7025(2007)04-0515-04

基于主动条纹偏折术的透明相位物体 波前测量方法

刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 采用主动条纹偏折和相移技术提出一种新的相位物体波前测量方法。在已标定的摄像机系统中, 通过相移和移动条纹显示屏可精确测量相位物体引起的成像光线偏折, 从光线偏折分布中提取波前梯度分布, 进而计算出待测波前分布。首先在液晶显示屏上分别显示水平和垂直两个方向的正弦灰度调制条纹图, 用 CCD 分别记录下原始条纹图和经过待测物体后的变形条纹图, 然后移动液晶显示屏, 再次记录下相应的条纹图, 可计算出透明相位物体引起的偏折角及其波前分布。通过对正透镜的实际测量, 证明了该方法切实可行。

关键词 测量; 条纹偏折术; 相移技术; 标定

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Wavefront Measurement for Transparent Object by Active Deflectometry

LIU Yuan-kun, SU Xian-yu, WU Qing-yang

(*Opto-Electronic Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

Abstract A new wavefront measurement was proposed, which was based on active deflectometry and phase-shift technique. The deflection of imaging rays caused by a phase object could be measured accurately with the phase-shift technique and a removable screen displaying the horizontal and vertical sinusoidal intensity patterns respectively, and then the wavefront distribution could be calculated after extracting the gradients from the deflection. When a phase object was placed between a screen and a calibrated charge coupled device (CCD) camera, the intensity patterns would be distorted. The distortion distribution can be measured, and another different distortion distribution can be got by moving the screen. Therefore the ray deflection and the wavefront can be obtained. The experimental results of a positive lens had confirmed the feasibility of this method.

Key words measurement; deflectometry; phase-shift technique; calibration

1 引 言

目前相位物体的测量大多通过干涉计量, 它的测量精度高, 但需要一套昂贵的、设计精密的测量系统^[1]。Héctor Canabal 等^[2]和刘元坤等^[3]通过条纹偏折的方法将相位测量轮廓术运用到透明物体的波前测量, 但该方法假设待测系统为远心光路系统, 因此最终测量结果需要校正。Marcus Petz 等^[4]报道了一种基于摄像机针孔模型的透镜光线偏折测量方

法, 该系统需要用机械装置平移条纹平面, 通过对两次不同位置的条纹平面测量确定经过透镜后的偏折光线方向, 从而确定偏折角。在此基础上, 本文提出一种新的相位物体波前测量方法, 由未放待测透镜时的相位分布确定条纹平面的平面方程, 条纹平面可任意移动, 并且进一步确定偏折角与待测物体等效波前梯度分布的对应关系, 通过数值积分重建待测物体的等效波前分布。通过对正透镜的实测, 证

收稿日期: 2006-07-19; **收到修改稿日期:** 2006-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(60527001)资助项目。

作者简介: 刘元坤(1975—), 男, 四川新都人, 博士研究生, 主要从事光电三维传感及系统设计等领域的理论和应用研究。

E-mail: yuankun_liu@hotmail.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为激光物理、激光谐振腔、光学三维传感和条纹图像分析等。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

明该方法具有结构简单、成本低、灵活性高等优点。

2 测量原理

测量原理如图 1 所示,在摄像机针孔模型下, O 为投影中心,同时也是摄像机坐标系原点。像点 A 对应平面 1 上的点 A' ,放入透明相位物体后,光线发生偏折,通过待测物体后的光线偏折到平面 1 上的 B 点,如果能得到偏折光线在平面 2 上的对应点 C ,那么偏折光线 BC 可以确定,同时由点 A' 和点 O 可以确定原始光线 OA' ,因此偏折光线与原始光线的夹角 α 能够计算得到,该夹角即为待测物体引起的光线偏折角,通过全场测量即可确定待测物体的全场偏折角分布。

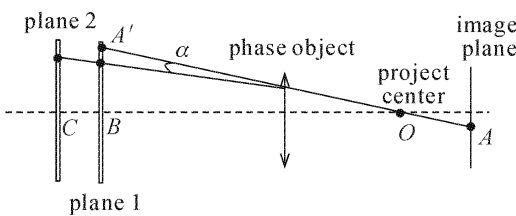


图 1 光线偏折原理示意图

Fig. 1 Principle of the proposed method

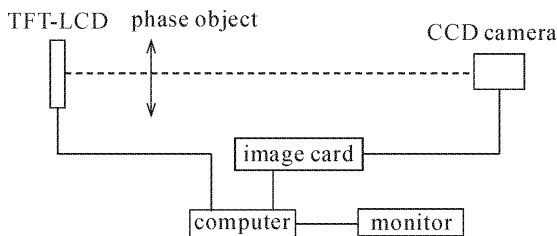


图 2 系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of system structure

测量原理对应的测量系统如图 2 所示,待测透明相位物体放置于薄膜晶体管-液晶显示屏 (TFT-LCD) 与 CCD 相机之间,显示屏上分别显示水平与垂直两个方向的正弦条纹图。

正弦条纹图的强度函数可表示为

$$\begin{cases} I_x(x, y) = a + b\cos[2\pi x/p_x + \phi_{x0}(x, y)] \\ I_y(x, y) = a + b\cos[2\pi y/p_y + \phi_{y0}(x, y)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 a 和 b 都为正常数,通常 $a = b$, p_x, p_y 分别为 x, y 方向的条纹周期, $\phi_{x0}(x, y)$ 和 $\phi_{y0}(x, y)$ 分别为 x, y 方向的初始相位。通过 N 帧相移方法以及相应的相位展开技术^[5~8] 可计算出相位分布。将局部世界坐标系建立在显示屏平面上,则 z 坐标为 0, x 和 y 坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{p_x}{2\pi}\phi_x(x, y) + k_{x0} \\ y = \frac{p_y}{2\pi}\phi_y(x, y) + k_{y0} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\phi_x(x, y), \phi_y(x, y)$ 分别为对应的水平与垂直相位分布, k_{x0}, k_{y0} 都为常数。同时 CCD 相机已预先标定^[9~12], 因此根据局部世界坐标分布可确定相应的外部参数,则显示屏平面各点的三维坐标为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为偏移矩阵, x_c, y_c, z_c 分别为摄像机坐标系中 x, y, z 方向的坐标。放入待测相位物体,测量相应的相位分布,按照式(2)和(3)即可确定偏折光线在显示屏上对应点的三维坐标。

移动显示屏,重复以上工作,所不同的是需要先记录放置待测物体时的变形条纹图,然后移开待测物体,再记录下条纹图。于是图 1 中所示的平面 1 与平面 2 测量完毕,即 A', B 和 C 点均已确定,由此可计算出偏折角 α 。

在确定原始光线 OA' 和偏折光线 BC 方向后,可以计算得到 OA' 与坐标轴 x 和 y 的方向角 α_0, β_0 以及 BC 与坐标轴 x 和 y 的方向角 α_1, β_1 , 而 $\alpha_0 - \alpha_1$ 和 $\beta_0 - \beta_1$ 则分别反应了偏折光线在 x 和 y 方向的偏折角度,并且该偏折角与待测波前梯度有关^[2], 即

$$\begin{aligned} \tan(\alpha_0 - \alpha_1) &\approx \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}, \\ \tan(\beta_0 - \beta_1) &\approx \frac{\partial W(x, y)}{\partial y}, \end{aligned} \quad (4)$$

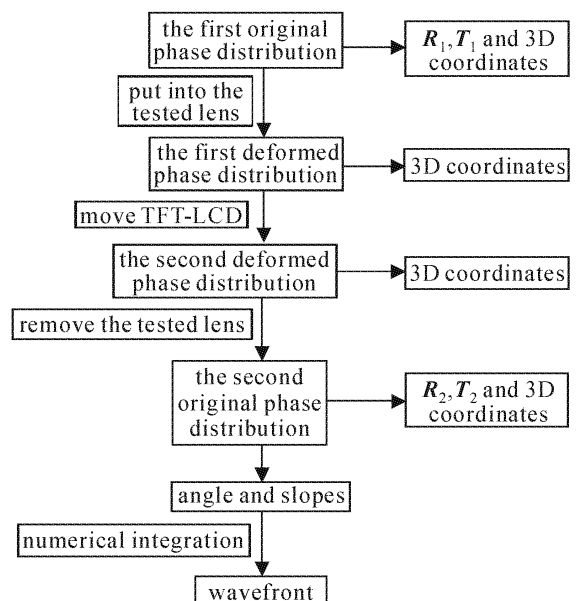


图 3 测量流程图

Fig. 3 Experimental procedure

由式(4) 可以通过积分的方法解出待测相位物体波前分布 $W(x,y)$ 。

3 实验结果与分析

实验中,用笔记本电脑的显示器作为显示屏,像素间隔为0.28 mm,分辨率为 1024×768 ,显示周期为20 pixels以及灰度等级为 256 的正弦条纹图样。经标定后 CCD 相机的焦距为16.54 mm,像素尺寸为 $8.3 \mu\text{m} \times 8.6 \mu\text{m}$,分辨率为 732×572 。实验过程如图 3 所示。

图 4 为变形条纹图,其中加黑部分为待测透镜的外框。实际光线分布如图 5 所示,其中图 5(a)表示原始光线分布,图 5(b)表示由待测物体引起的偏折光线分布,图中加黑部分为待测物体的近似位置。图 6(a)表示计算得到的偏折角分布,图 6(b)表示连

续两次测量中原始光线的角度计算误差,它表征系统的不确定度。

由图 6(b)可以看出,两次平面对应的原始光线并没有完全重合,存在一定的偏差,这是数据离散化

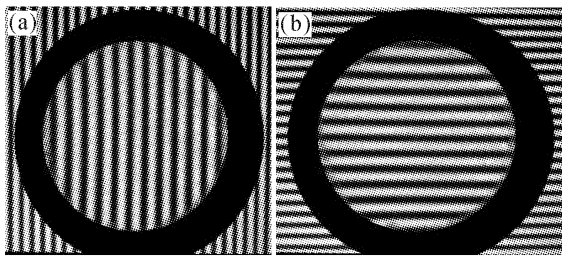


图 4 变形条纹图
(a) 竖直;(b) 水平

Fig. 4 Deformed fringes
(a) vertical; (b) horizontal

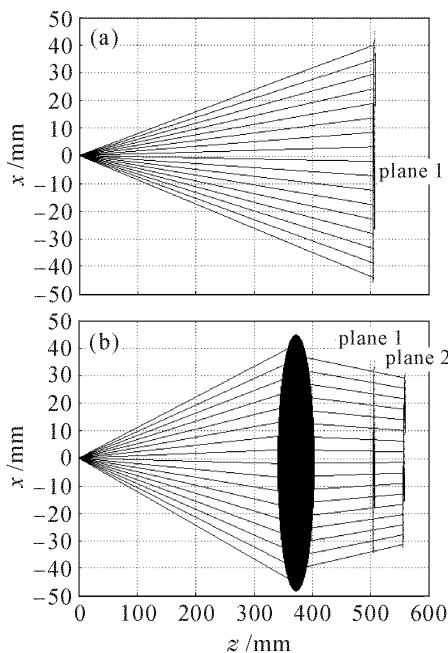


图 5 实际光线偏折图
(a) 原始;(b) 偏折

Fig. 5 Schematic of actual ray path deflection
(a) original; (b) deformed

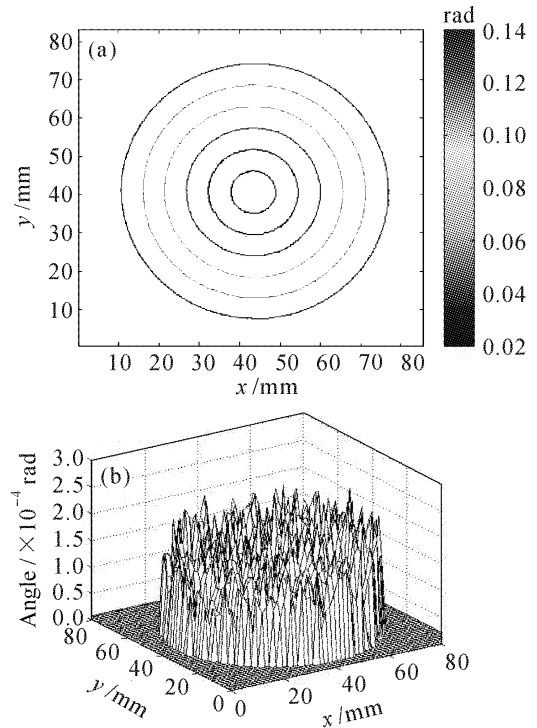


图 6 偏折角分布(a)和误差分布(b)

Fig. 6 Deflected angle distribution (a) and error distribution (b)

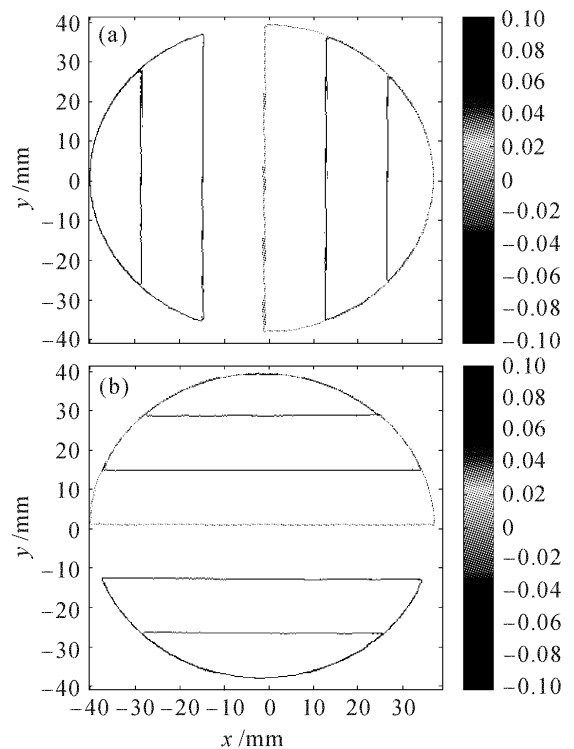


图 7 斜率分布

(a) 水平方向;(b) 竖直方向
Fig. 7 Slopes distribution
(a) horizontal; (b) vertical

的结果,但是从数值上看,这个偏差远小于原始光线与偏折光线的偏角。图 7 为分离出的 x 和 y 方向的斜率分布。图 8(a) 为重建的等效波前分布,图 8(b) 为用最小二乘法拟合(按球面拟合)的波前与测量波前的偏差。根据拟合波前计算的透镜焦距为 275.3 mm,与用平行光管法测出的焦距基本吻合,误差为 0.85%。

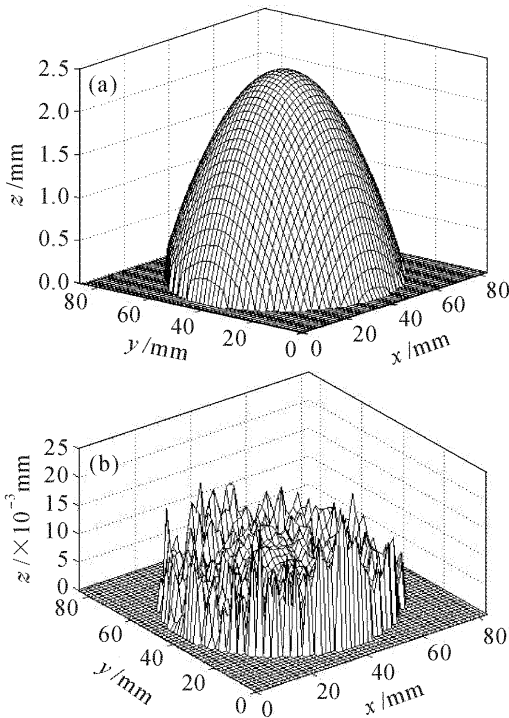


图 8 重建的等效波前分布(a)和误差分布(b)
Fig. 8 Reconstructed equivalent wavefront distribution (a) and error distribution (b)

4 结 论

在以主动条纹偏折术测量透明相位物体偏折角分布基础上,建立了待测物体偏折角测量系统和物体等效波前的重建方法。该方法仅需一套简单测量系统,即将待测物体放置于已标定的 CCD 摄像机和平板显示屏之间,无需对系统进行精密的安装调节,由 CCD 记录显示屏上的条纹图像。根据相位分布确定显示屏平面方程,移动显示屏完成再次测量,由此计算出由待测透镜引起的偏折光线,并最终得到偏折角以及待测波前分布。而且根据实际情况,可用傅里叶条纹分析方法代替相移技术计算相位分布,以缩短测量时间,同时随着 CCD 相机分辨率的

提高,测量精度还可进一步提高。通过对正透镜的实际测量验证了该方法结构简单、成本低、灵活性强,可以预期该方法在非球面相位物体的测量方面有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 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
- Héctor Canabal, José Alonso. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge-coupled device camera [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(4):822~826
- Liu Yuankun, Su Xianyu, Jiang Meihua. Wavefront measurement for transparent object on incoherent imaging [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(1):29~31
刘元坤,苏显渝,姜美花. 基于非相干成像的透明物体波前测量方法[J]. 激光杂志, 2004, **25**(1):29~31
- Marcus Petz, Rainer Tutsch. Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings [C]. *SPIE*, 2003, **5144**:288~294
- Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社, 1999
- Xianyu Su, Wensen Zhou, G. von Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the Rochi grating [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6):561~573
- Xianyu Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry; utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(6):141~150
- Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):792~796
李万松,苏礼坤,苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, **20**(6):792~796
- Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11):1330~1334
- Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1162~1166
李勇,苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(10):1162~1166
- Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua. A speedy method for the calibration of line structured light sensor based on coplanar reference target [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17**(2):183~186
郑继贵,李艳军,叶声华. 基于共面标定参照物的线结构光传感器快速标定方法[J]. 中国机械工程, 2006, **17**(2):183~186
- Zhang Jianxin, Duan Fajie, Ye Shenghua. An easy accurate calibration technique for camera [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1999, **20**(2):193~196
张健新,段发阶,叶声华. 简便的高精度摄像机标定技术[J]. 仪器仪表学报, 1999, **20**(2):193~196