

基于条纹反射的非球面镜三维面形测量

唐 燕 苏显渝 刘元坤 荆海龙

(四川大学 光电子科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种利用条纹反射原理测量非球面镜的新方法。测量过程中,利用液晶屏显示正弦条纹,由摄像机记录由待测镜面反射产生的条纹图。并将显示屏和摄像机分别沿待测镜面轴向移动。摄像机在每个移动位置上,记录下显示屏移动前后产生的两幅条纹图。通过相移方法,得到条纹图的相位信息后,对摄像机上每个象素点,能在待测镜面上找到一个对应待测点,并在获得该待测点的梯度信息的同时,获得该点位置坐标信息。最后通过积分,恢复待测镜面的三维高度信息。该方法不需辅助反射镜与干涉仪,能更加方便灵活地测量非球面镜。并且该方法有较好的抗噪性能,在噪声较大的情况下,仍能对非球面镜进行测量。模拟及初步实验均验证了该方法的可行性。

关键词 光学测量; 三维面形测量; 条纹反射; 非球面镜

中图分类号 TM930.12⁺6 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0965

Three-Dimensional Shape Measurement of Aspheric Mirror Based on Fringe Reflection

Tang Yan Su Xianyu Liu Yuankun Jing Hailong

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

Abstract A new method to measure the three dimensional (3D) shape of the aspheric mirror is proposed. In the measurement, a liquid crystal display (LCD) screen displays the sine fringe pattern and a camera captures the deformed fringe pattern generated by the reflection of the mirror. And the screen and the camera are translated along the measured mirror axis, respectively. At each movement, the camera records the fringe patterns from the screen located at two different positions. By phase shifting technique, the phase information in the deformed fringe pattern can be gotten. Every camera pixel corresponds to a point on the tested mirror and its coordinate and slope can be determined. By integral processing, the 3D shape of the measured mirror can be reconstructed. This method doesn't need interferometer and assistant mirror. So it can reconstruct the tested mirror flexibly and cheaply. Moreover, this method owns strong ability of anti-noise. With large noise, this method also can reconstruct the 3D shape of aspheric mirror. Computer simulations and preliminary experiment validate the feasibility of this method.

Key words optical measurement; 3D shape measurement; fringe reflection; aspheric mirror

1 引 言

非球面镜能有效校正像差,提高系统相对口径,扩大视场角度,减少系统中光学元件的数量,缩小体积,被广泛应用于各种光学系统中。但非球面镜的测量,尤其是对深度非球面镜的测量非常困难^[1,2],制约了其发展。目前对非球面镜表面的检测,例如:抛物面镜,一般使用相移式干涉仪借助辅助反射镜

完成^[3]。通过这种方法具有很高的精度。但该方法在测量过程中需要一块与被检测元件尺寸相同或更大的辅助反射镜,而这样一个高精度反射镜的加工难度大,制造成本高。为了更加方便有效地测量非球面镜,我们将条纹反射的方法引入对非球面镜的测量中,对非球面加工过程中,处于精磨和抛光阶段的非球面反射镜进行测量。

收稿日期: 2008-06-30; 收到修改稿日期: 2008-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(60838002,10876021)资助课题。

作者简介: 唐 燕(1982—),女,博士研究生,从事光学三维面形测量的研究。E-mail: ty0513@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,从事信息光学、三维传感与机器视觉领域的教学与科研工作。

将条纹反射的方法和相移技术相结合,可以在无需干涉仪的情况下对镜面物体的梯度进行高精度测量。Thorsten Bothe 等^[4~6]利用该方法测量了多种镜面物体的表面面形,取得了较好的结果。但该类方法存在许多缺点,例如测量中需要标准镜面,只能得到待测镜面的梯度信息^[7],需要进行复杂的标定^[8,9]等。

提出一种全新的方法,利用条纹反射,通过移动摄像机和投影屏,对非球面镜进行有效测量。本方法不需要干涉仪及辅助反射镜面,在测量中只需要一个摄像机,而且不需要对摄像机进行标定,有效降低了测量成本,简化了系统结构。提出虚拟抛物面的概念,利用相移测量方法所具有的高精度特点^[10],计算相位分布和完成三维面形重建。该方法相比传统相位偏折术^[6],无需复杂标定,在获得物体梯度的同时就能得到待测点位置坐标信息,使积分精度大大提高。并且该方法具有较好抗噪能力,在噪声较大情况下,仍能有效测量待测镜面的三维面形。模拟及初步实验验证了本方法的可行性。

2 测量原理

测量装置如图 1 所示。其中,液晶显示器显示圆形正弦条纹,并与待测镜面光轴相垂直,摄像机通过半反半透镜获得经待测镜面反射产生的变形条纹图。测量过程中,先保持显示屏不动,摄像机从待测镜面轴向上某一点逐步向前移动,并记录变形条纹图,到达某一位置后,将显示屏沿待测镜面光轴方向移动一定距离,然后再将摄像机沿原来路径返回,并在之前的记录点上记录下显示屏移动后产生的变形条纹图。图 1 中用虚线描述了摄像机,显示屏移动前后的情况。假设摄像机满足针孔模型,测量原理图如图 2 所示。

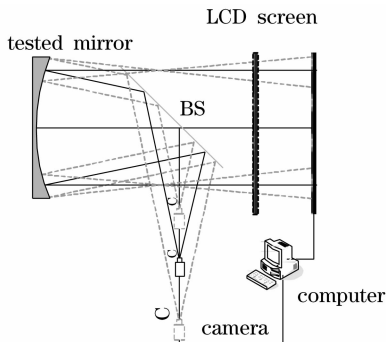


图 1 测量系统结构图

Fig. 1 Structure of measurement system

图 2 中,以待测镜面光心为坐标原点建立直角坐标系,坐标系 y 轴与镜面光轴重合。 l_0, l_1 为显示

屏移动前后的两个位置, $p_0 \cdots p_n$ 为摄像机小孔中心移动的多个位置。 $\phi_0^0 \cdots \phi_n^0$ 与 $\phi_0^1 \cdots \phi_n^1$ 分别为摄像机在 $p_0 \cdots p_n$ 时,其 CCD 上一点,经待测镜面反射,在位于 l_0, l_1 处的显示屏上分别获得的相位值。对摄像机 CCD 上一点,可以在待测镜面光轴上找到一点,当摄像机位于该点时,CCD 上一点在 l_0, l_1 处显示屏上获得相同的相位,即经镜面的反射光线与光轴平行。利用反射光线特点,可以获得 CCD 上点在待测镜面上对应点的位置坐标,并得到一个虚拟抛物面,计算出镜面上该对应点的梯度信息。

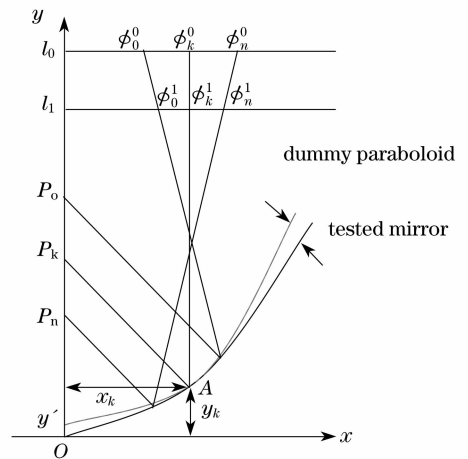


图 2 测量原理图

Fig. 2 Schematic of measurement principle

摄像机在轴向上移动的距离表示为

$$\Delta h = [p_0 \cdots p_n] - p_0. \quad (1)$$

摄像机 CCD 上一点在摄像机移动过程中,获得的来自 l_0, l_1 处显示屏上相位的差表示为

$$\Delta \varphi = [\phi_0^0 \cdots \phi_n^0] - [\phi_0^1 \cdots \phi_n^1]. \quad (2)$$

通过函数拟合,我们可以得到一个关于 $\Delta h, \Delta \varphi$ 的函数,表示为

$$\Delta \varphi = f(\Delta h). \quad (3)$$

由 $f(\Delta h)$, 可以得到一个值 Δh_k , 满足 $f(\Delta h_k) = 0$; 与之对应的摄像机在轴向上位置表示为

$$p_k = \Delta h_k + p_0. \quad (4)$$

通过函数拟合,得到 $p = [p_0 \cdots p_n]$ 与 $\varphi^0 = [\phi_0^0 \cdots \phi_n^0]$ 的函数关系,表示为

$$\varphi^0 = g(p). \quad (5)$$

将 p_k 代入(5)式得到 $\varphi_k^0 = g(p_k)$ 。如图 2 所示,当摄像机位于 p_k 时,CCD 上一点观察到经待测镜面 A 点反射的条纹,并且该点在位于 l_0, l_1 处的显示屏上获得的相位相等,值为 ϕ_k^0 。由于显示屏与待测镜面的轴向保持垂直,可以通过 ϕ_k^0 获得 A 点的

水平方向位置坐标表示为

$$x_k = \frac{\phi_k^0}{2\pi} T, \quad (6)$$

式中 T 为显示条纹的周期。

假设有一抛物面与待测镜面相切于 A 点,由 p_k 可以得到该虚拟抛物面的焦距:

$$R_k = p_k o - y' \quad (7)$$

y' 为虚拟抛物面顶点距原点的距离,由于 $y' \ll p_k o$,

$$R_k \approx p_k o. \quad (8)$$

利用该虚拟抛物面,由 x_k 和 R_k 可以得到 A 点的梯度,结合(8)式表示为

$$\frac{\partial y_k}{\partial x_k} = \frac{1}{2R_k} x_k. \quad (9)$$

对摄像机 CCD 上每一点均利用上述方法获得待测镜面上与之对应点的位置坐标 x_n 及梯度 $\partial y_k / \partial x_k$,通过积分运算可以得到待测面整体面形高度,积分过程表示为

$$y_{n+1} = y_n + \left(\frac{\partial y_{n+1}}{\partial x_{n+1}} + \frac{\partial y_n}{\partial x_n} \right) \times (x_{n+1} - x_n) / 2. \quad (10)$$

基于条纹反射原理^[6],利用满足小孔模型的摄像机经过镜面反射,直接获得液晶屏上的条纹图。而不是用摄像机拍摄,由显示屏经镜面反射所产生的共轭像,因此。理论上,所拍摄到的条纹图不存在像差,不会影响测量结果。

3 计算机模拟

为了验证该方法的可行性,进行了计算机模拟。

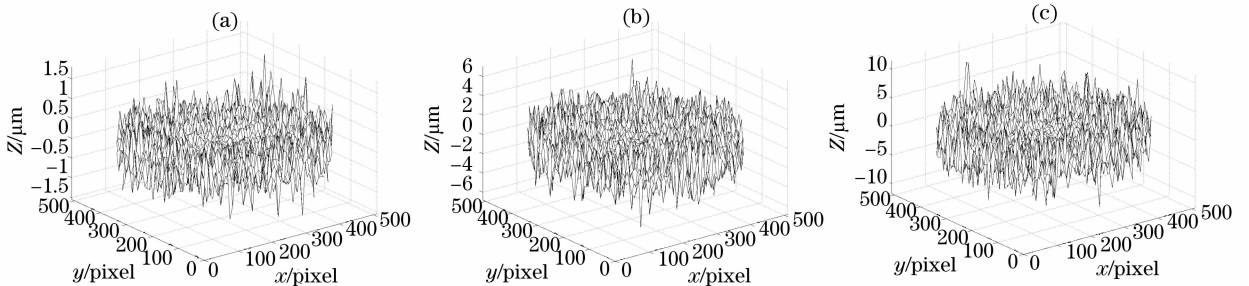


图 4 1% (a), 3% (b), 5% (c) 噪声下恢复误差

Fig. 4 Error of the proposed method with 1% noise (a), 5% noise (b), 5% noise (c)

4 实验验证

被测对象是一个口径约 4 cm 的凹面镜。实验中利用液晶显示器显示周期为 8 个像素的正弦圆形条纹,显示器前后移动约 300 mm。摄像机开始放置于光轴上离待测镜面中心 1034 mm 处,后以每次 11 mm 向前移动。图 5 为采集到的部分变形条纹。

模拟待测抛物面镜面焦距为 600 mm,口径为 500 mm,如图 3 所示。测量中摄像机沿待测镜面轴向,从距离镜面中心 610 mm 开始以 1 mm 为单位,移动到 590 mm。显示屏前后两个位置之间移动 200 mm。

在条纹图中添加了 1% 的随机噪声后恢复物体与实际待测镜面的误差如图 4(a) 所示。由图 3,图 4(a),可以看出,对焦距口径比达 1.2 的大口径非球面镜,本文方法仍可以较好地恢复其三维面形,在存在噪声情况下,将测量误差最大值控制在 1.5 μm 。

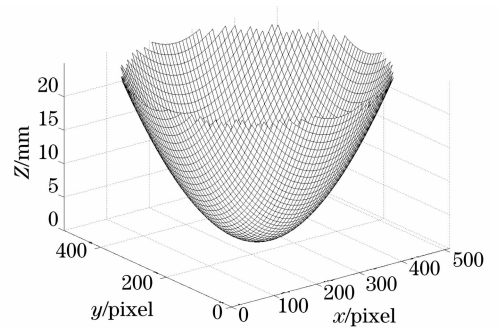


图 3 原始物体

Fig. 3 Original object

为了检验该方法的抗噪性能,在条纹图中分别添加 3%,5% 的随机噪声,对待测镜面进行恢复。恢复镜面与实际镜面的误差分别由图 4(b),(c) 表示。由图 4(b),(c) 可以看出,本方法具有较好的抗噪性能,在条纹图中添加 5% 的随机噪声后,测量误差仍保持在 0.01 mm。

图 5 中,图 5(a)与图 5(b)是摄像机位于 1034 mm 时,拍摄到的显示屏移动前后的条纹图。图 5(c)与图 5(d)是摄像机位于 1012 mm 时,显示屏移动前后拍摄的条纹图。

利用本文提出方法,恢复出的镜面面形图如图 6(a) 所示。为了检验恢复结果,利用三坐标机恢复

同一物体,结果如图 6(b)所示。图 7 显示了 x 轴, y 轴上,本文方法与三坐标机恢复结果的对比。由图

7 可以看出利用本文所提方法与三坐标机恢复结果大致相同,本文方法可以成功恢复出待测镜面面形。

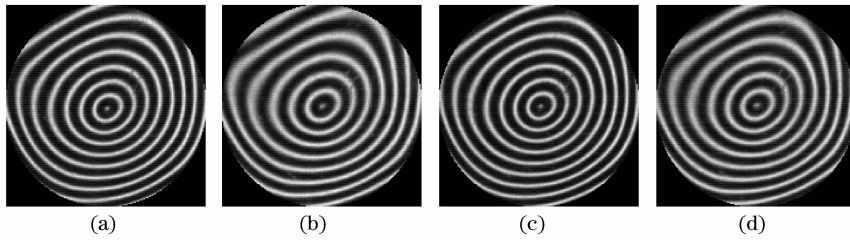


图 5 变形条纹图

Fig. 5 Deformed fringe pattern

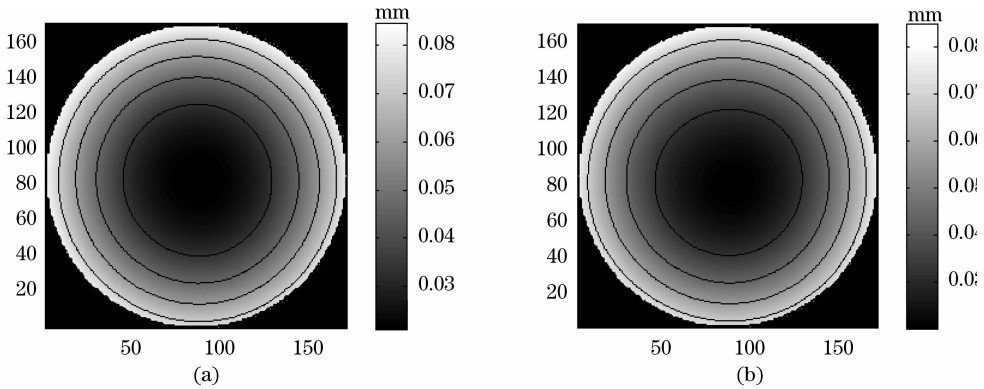


图 6 本文方法(a)与三坐标机(b)恢复结果

Fig. 6 Reconstructed object using the proposed method (a) and three-coordinate machine (b)

如图 7 所示,本文方法与三坐标机测量结果之间的误差,与三坐标机自身的测量精度相当。所产生的误差,主要来源于系统的校准。测量过程中,待

测镜面光轴的测量误差,摄像机与显示屏的位置摆放精度,移动精度等,都会对结果带来影响。在后续文章中,将对这些误差进行详细讨论。

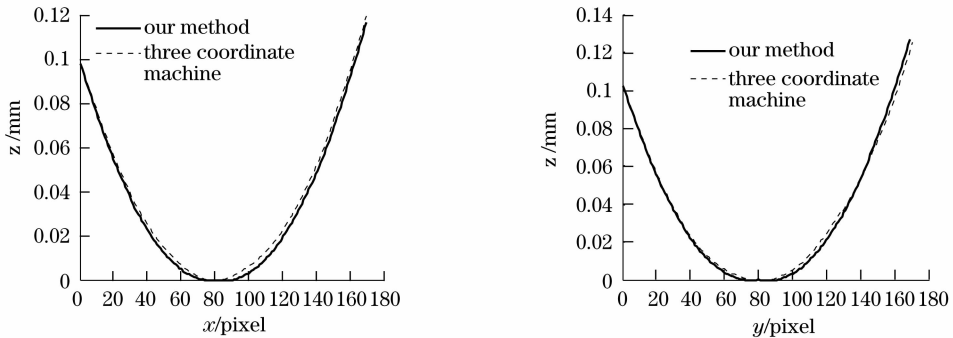


图 7 在 x 轴(a) y 轴方向(b)上本文方法结果与三坐标机结果

Fig. 7 The reconstructed objects on x axis (a) and y axis by the proposed method and three-coordinate machine

在测量中,由于使用了半透半反镜,只选取了位于半透半反镜内的条纹图进行测量,获得其对应的镜面面形。目前本文方法测量的镜面尺寸较小,所用半反半透镜的尺寸小,厚度薄,对测量误差影响较小。对大尺寸镜面的测量,我们将不再使用半透半反镜,而是直接利用摄像机经待测镜面反射,获得条纹图,以消除半透半反镜对整个测量带来的影响。

5 结 论

在条纹反射的基础上,提出了一种测量非球镜面的新方法。该方法在不需要干涉仪和辅助反射镜面情况下,可以完成对非球面镜的整体面形的测量,降低了测量成本。相对传统相位偏折术,该方法在不需要复杂标定的情况下,在获得待测点梯度的同时,得到了位置坐标信息,使积分结果精度大大提

高。并且,该方法具有较好的抗噪性能,在存在较大噪声的情况下,仍能获得较满意的结果。进一步的系统标定和误差分析将另文给予讨论。

参 考 文 献

- 1 Yang li. *Advanced Optical Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Science press, 2001
杨 力主编. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001
- 2 Pan Junhua. Optical problems in imaging optical engineering[J]. *Engineering Science*, 2000, **2**(3):32~35
潘君骅. 成像光学工程面临的数学问题[J]. 中国工程科学, 2003, **2**(3):32~35
- 3 Pan Junhua. *The Design, Manufacture and Test of The Aspherical Optical Surfaces*[M]. Beijing: Science press, 1994
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京:科学出版社, 1994
- 4 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, **26**(11):1636~1640
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(11):1636~1640
- 5 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Wavefront Measurement for Transparent Object by Active Deflectometry [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4):512~518
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明相位物体波前测量方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):512~518
- 6 Thorsten Bothe, Wansong Li, Christoph von Kopylow *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. *SPIE*, 2004, **5457**:411~422
- 7 Wansong Li, Thorsten Bothe, Christoph von Kopylow *et al.*. Evaluation methods for gradient measurements techniques[C]. *SPIE*, 2004, **5457**: 300~311
- 8 Markus C. Knauer, Jurgen Kaminski *et al.*. Phase measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *SPIE*, 2004, **5457**:366~376
- 9 Marcus Petz, Rainer Tutsch, Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[C]. *SPIE*, 2005, **5869**:355~366
- 10 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, 苏礼昆, 苏显渝. 相位测量面形术在大尺寸三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, **20**(6):792~796