

计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术

曾雪峰^{1,2} 闫锋¹ 薛栋林¹ 邓伟杰¹ 李锐钢¹ 郑立功¹ 张学军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了校正利用计算全息图(CGH)补偿检测离轴非球面引入的二维投影畸变,提出了基于检测光路仿射变换的投影畸变校正方法。通过追迹检测光路求解畸变映射函数,借助镜面特征点实现畸变校正结果与镜面的高精度对准,利用校验特征点实现校正误差检验。将该技术实际应用于某项目 800 mm×600 mm 离轴非球面主镜检测和加工,检测结果与工件面形位置误差由校正前 80 mm 降低至 1 mm 以下。根据畸变校正后的数据,对该镜采用离子束抛光,最终面形精度[用均方根(RMS)误差表示]达到 0.0162λ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)。

关键词 全息;非球面检测;投影畸变校正;仿射变换;离轴非球面;计算全息图

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1109003

Distortion Correction in Testing of Off-Axis Asphere with Computer-Generated Hologram

Zeng Xuefeng^{1,2} Yan Feng¹ Xue Donglin¹ Deng Weijie¹ Li Ruigang¹
Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

¹ Key Laboratory of Optical System Advance Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to correct the distortion introduced in the null testing with computer generated hologram (CGH) for off-axis aspheric, a mapping distortion method is proposed based on affine transformation of the test ray. The distortion mapping function is solved by ray tracing. The high alignment accuracy between the calibration result and the mirror surface is realized with feature points on the mirror, and calibration points are utilized to test the correction error. An off-axis asphere with size of 800 mm×600 mm is tested. After mapping distortion correction, the position error between the test result and the prototype's profile is reduced from 80 mm to less than 1 mm. The corrected output is applied to polish the mirror by ion beam and its accuracy [represented by root-mean-square (RMS) error] is 0.0162λ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$).

Key words holography; aspheric surface testing; mapping distortion correction; affine transformation; off-axis aspheric; computer generated hologram

OCIS codes 220.4840; 090.1760; 220.4610

收稿日期: 2013-05-07; 收到修改稿日期: 2013-06-08

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013205)、国家自然科学基金重点项目(61036015)

作者简介: 曾雪峰(1987—),男,博士研究生,主要从事光学检测和光学表面质量评价等方面的研究。

E-mail: njzxf2007@aliyun.com

导师简介: 张学军(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

1 引 言

传统方法采用补偿透镜补偿器检测离轴非球面,但补偿透镜补偿器复杂度高、体积大、装调复杂,使得检测精度受限。随着光学检测及微电子技术的发展,计算全息图(CGH)被越来越广泛地用于光学检测。相对补偿透镜补偿器,CGH 具有体积小、重量轻、设计自由度大、易于装调、能够重复使用^[1]和可以检测自由曲面元件等优点,其检测精度优于 $\lambda/100$ ^[2-5]。

但是,CGH 补偿检测离轴非球面会引入非回转对称和复杂的二维投影畸变。由于 CGH 离轴检测非球面时,CGH 相对口径和所需补偿像差较大,并需引入高载频,导致 CGH 口径更大、条纹更密,加工难度变大甚至难以加工^[6]。为了克服上述缺点,将离轴非球面平移至轴上检测。这种检测方法的投影畸变与被检镜 F 数成反比,导致大口径非球面检测结果与镜面形状严重偏离。现有方法是在镜面上覆盖孔格阵列板,孔格阵列在检测过程中会产生与镜面畸变相对应的位置变形,通过建立规则孔格阵列与形变后位置映射关系,基于有限点插值的原理,可以近似计算出检测过程中的投影畸变。受限于检测过程复杂,影响因素较多等缺点,该方法无法满足离轴非球面高精度检测及确定性加工要求^[7-8]。

本文提出一种基于检测光路仿射变换的畸变校正方法。该方法通过计算检测光路中 CGH 与被检面关系,求解被检面与 CGH 的二维非线性映射(Mirror-CGH),借助镜面上布设的少量特征点,求解 CCD 坐标系与 CGH 坐标系的仿射变换参数(CCD-CGH)。从而构建检测结果与被检非球面二维投影畸变映射函数,实现投影畸变的高精度校正。

2 畸变校正理论

畸变校正可以分解为 CCD-CGH 和 Mirror-CGH 两部分,校正流程如图 1 所示。

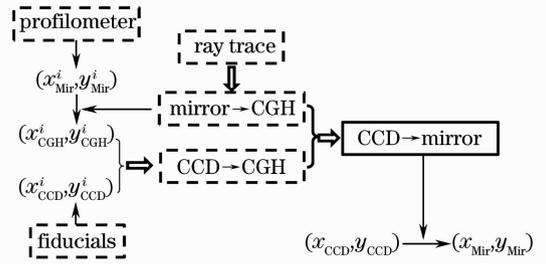


图 1 畸变校正流程

Fig. 1 Flowchart of distortion correction

由图 1 可知,求解 CCD-CGH 仿射关系参数需要特征点在 CCD 上的坐标 (x_{CCD}, y_{CCD}) 及相应点在 CGH 上的坐标 (x_{CGH}, y_{CGH}) , (x_{CCD}, y_{CCD}) 利用 MetroPro 中的 Fiducials 功能可得。特征点在 CCD 上占据多个像素,通过 Fiducials 获得像素坐标,对坐标采用质心算法得到的位置误差为亚像素级,能够保证检测精度。如图 2(a) 所示,通过追迹镜面特征点在 CGH 上映射位置得到 (x_{CGH}, y_{CGH}) 。

所以,首先追迹离轴非球面到 CGH 的光线,建立 Mirror-CGH 映射关系。如图 2 所示,在调整好的干涉检测系统中,沿理想镜面某点法向光线将会与 CGH 有相应交点,只需计算镜面法向光线与 CGH 的交点即可建立镜面与 CGH 映射关系。图 2 中涉及两套坐标系:测试坐标系(同时也是镜面坐标系)和母镜坐标系,使用它们能够简化计算,最后计算结果统一在测试坐标系。

为了求解过程的便利性,光线追迹在母镜坐标

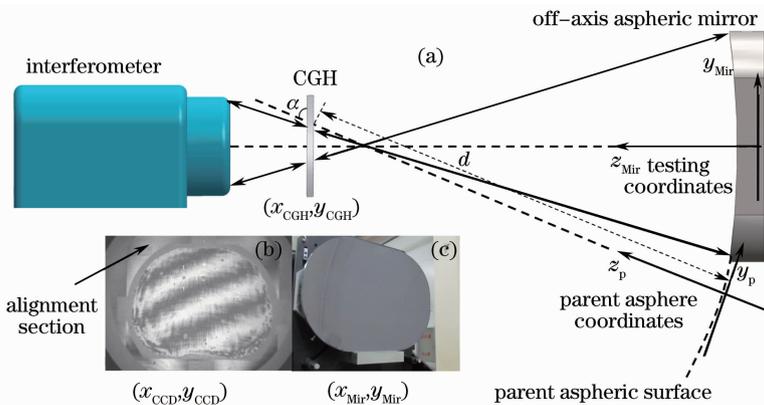


图 2 (a) 利用 CGH 同轴检测离轴非球面示意图; (b) 存在畸变的干涉检测结果; (c) 被检离轴非球面,几何尺寸为 800 mm×600 mm

Fig. 2 (a) Schematic diagram of coaxially testing an off-axis aspheric mirror by CCH; (b) distorted image of the mirror; (c) 800 mm×600 mm mirror under test

系下进行,再将解转换至测试坐标系。离轴非球面母镜方程为^[1]

$$z(x, y) = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10}, \quad (1)$$

式中 c 为非球面母镜顶点曲率, K 为圆锥系数, $S^2 = x^2 + y^2$, 易得离轴非球面上 (x, y, z) 点法向量为

$$\mathbf{n} = \left(\frac{E}{W}x, \frac{E}{W}y, 1 \right), \quad (2)$$

其中

$$W = \sqrt{1 - (k+1)c^2S^2},$$

$$E = [c + (4A_1S^3 + 6A_2S^5 + 8A_3S^7 + 10A_4S^9) \sqrt{1 - (K+1)c^2S^2}]. \quad (3)$$

CGH 简化为平面方程

$$y \sin \alpha + (z - d) \cos \alpha = 0, \quad (4)$$

式中 d 为离轴非球面母镜顶点沿光轴至于 CGH 交点

线段长度, α 为母镜光轴与 CGH 平面夹角。过镜面上任意一点 (x_p, y_p, z_p) , 方向向量为 \mathbf{n}_p 的直线与 CGH 平面方程的交点 $(x_{\text{CGH}}, y_{\text{CGH}}, z_{\text{CGH}})$ 满足方程组

$$\begin{cases} \frac{W_p}{E_p x_p}(x - x_p) - \frac{W_p}{E_p y_p}(y - y_p) = 0 \\ \frac{W_p}{E_p x_p}(x - x_p) - (z - z_p) = 0 \\ y \sin \alpha + (z - d) \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

求解方程组得到 CGH 上交点坐标, 为

$$\begin{cases} x_{\text{CGH}} = \frac{(d - z_p)E_p + W_p}{W_p + y_p \tan \alpha} x_p \\ y_{\text{CGH}} = \frac{(d - z_p)E_p + W_p}{W_p + y_p \tan \alpha} y_p \\ z_{\text{CGH}} = \frac{W_p}{E_p} \frac{(d - z_p)E_p - y_p \tan \alpha}{W_p + y_p \tan \alpha} + z_p \end{cases} \quad (6)$$

该解基于母镜坐标系, 通过坐标转换将其统一到测试坐标系, 坐标变换后解的形式为

$$\begin{cases} x_{\text{CGH}} = \frac{[d - (z_{\text{Mir}} - z_{\text{po}})/(\sin \alpha - \cos \alpha)]E' + W'}{W' + (y_{\text{Mir}} - y_{\text{po}})/(\sin \alpha + \cos \alpha) \tan \alpha} x_{\text{Mir}} \\ y_{\text{CGH}} = y_{\text{po}} + \frac{[d - (z_{\text{Mir}} - z_{\text{po}})/(\sin \alpha - \cos \alpha)]E' + W'}{W' + (y_{\text{Mir}} - y_{\text{po}})/(\sin \alpha + \cos \alpha) \tan \alpha} (y_{\text{Mir}} - y_{\text{po}}) \\ z_{\text{CGH}} = z_{\text{po}} + d \sin \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中 W' 和 E' 表示经过坐标转换的 W 和 E , $(0, y_{\text{po}}, z_{\text{po}})$ 为母镜坐标系原点在测试坐标系中的坐标值, $(x_{\text{Mir}}, y_{\text{Mir}}, z_{\text{Mir}})$ 为 (x_p, y_p, z_p) 点在测试坐标系下的坐标值。

离轴非球面如图 3(a) 所示, 在 $z=0$ 平面设置等步长点, 将所有等步长点坐标代入(7)式, 得到的解是 CGH 上二维畸变图形, 如图 3(b) 所示。

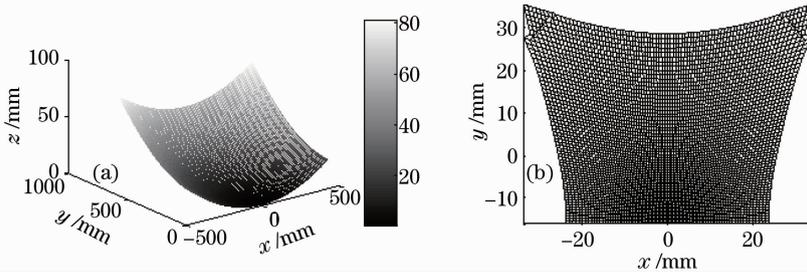


图 3 (a) 旋转、平移至轴上的离轴非球面; (b) 映射在 CGH 上的图形

Fig. 3 (a) Off-axis asphere that is rotated and translated on the axis; (b) figure that is mapped to CGH

然后, 求解 CCD-CGH 仿射变换, 这部分计算直接在测试坐标系下进行。通过在 CGH 上设计对准区域[图 2(b)中的 alignment section], 确保检测过程中 CGH 与光轴垂直, 从而使得 CGH 平面平行于 CCD 平面, 此时求解 CCD-CGH 仿射变换只需要掌握 CCD 和 CGH 平面至少两对点的坐标^[6], 并且平面映射关系与 z 坐标无关。将第 i 个特征点镜面坐标 $(x_{\text{Mir}}^i, y_{\text{Mir}}^i)$ 代入(7)式得到 $(x_{\text{CGH}}^i, y_{\text{CGH}}^i)$, 该特征

点在 CCD 上的坐标为 $(x_{\text{CCD}}^i, y_{\text{CCD}}^i)$ 。

如图 4 所示, 为了使仿射变换参数 k 和 $\Delta\theta$ 为常数, 需要构造变换中介坐标系 $x_a O_a y_a$ 。构造方法是, 任取 CCD 图中一个特征点及其在 CGH 上的相应点, 如图 4 中将 $P_{\text{CCD}0}$ 和 $P_{\text{CGH}0}$ 分别平移至原点, 其他点等量平移。那么中介坐标系中 $(x_{\text{CGHa}}, y_{\text{CGHa}})$ 和 $(x_{\text{CCDa}}, y_{\text{CCDa}})$ 的关系式可以便利地表示为极坐标形式, 即

$$\begin{cases} r_{CGHa} = kr_{CCDa} \\ \theta_{CGHa} = \theta_{CCDa} + \Delta\theta \end{cases}, \quad (8) \quad \text{式中} \begin{cases} x_a = r \cos \theta_a \\ y_a = r \sin \theta_a \end{cases}, k \text{ 为缩放比, } \Delta\theta \text{ 为旋转角。}$$

据此,得到 CCD-CGH 关系式为

$$\begin{cases} x_{CGH} = k \sqrt{(x_{CCD} - x_{CCD_0})^2 + (y_{CCD} - y_{CCD_0})^2} \cos(\theta_{CCDa} + \Delta\theta) + x_{CGH_0} \\ y_{CGH} = k \sqrt{(y_{CCD} - y_{CCD_0})^2 + (x_{CCD} - x_{CCD_0})^2} \sin(\theta_{CCDa} + \Delta\theta) + y_{CGH_0} \end{cases}. \quad (9)$$

向(9)式中代入两对以上特征点,将其中一对设为 (x_{CCD_0}, y_{CCD_0}) 和 (x_{CGH_0}, y_{CGH_0}) ,作为仿射变换基准点即可解出 k 和 $\Delta\theta$ 。实际标定中,需要在镜面设置多个特征点,一方面采用多点做最小二乘拟合求解 k 和 $\Delta\theta$ 可以减小随机误差,另一方面,不用于求解仿射参数的特征点用作校验特征点,计算畸变校正误差。

工程应用中畸变校正借助 Matlab 编程实现,为了避免重复计算,提高效率,将转换矩阵保存为 Matlab 的数据文件,每次运行程序时调用。所以,将畸变函数表示为

$$\begin{cases} x_{CGH} = \frac{[d - (z_{Mir} - z_{po}) / (\sin \alpha - \cos \alpha)] E' + W'}{W' + (y_{Mir} - y_{po}) / (\sin \alpha + \cos \alpha) \tan \alpha} x_{Mir} \\ y_{CGH} = y_{po} + \frac{[d - (z_{Mir} - z_{po}) / (\sin \alpha - \cos \alpha)] E' + W'}{W' + (y_{Mir} - y_{po}) / (\sin \alpha + \cos \alpha) \tan \alpha} (y_{Mir} - y_{po}) \\ x_{CGH} = k \sqrt{(x_{CCD} - x_{CCD_0})^2 + (y_{CCD} - y_{CCD_0})^2} \cos(\theta_{CCDa} + \Delta\theta) + x_{CGH_0} \\ y_{CGH} = k \sqrt{(y_{CCD} - y_{CCD_0})^2 + (x_{CCD} - x_{CCD_0})^2} \sin(\theta_{CCDa} + \Delta\theta) + y_{CGH_0} \end{cases}. \quad (10)$$

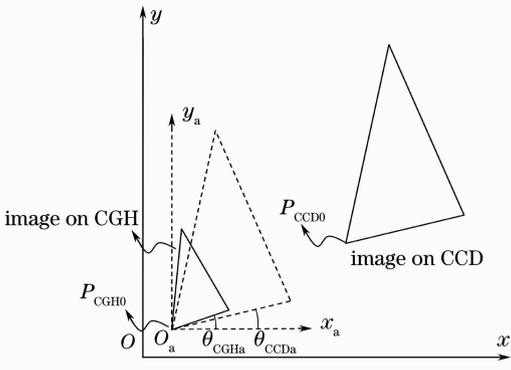


图 4 CCD-CGH 仿射关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of affine transformation between CCD and CGH

采用数值计算,(10)式对应两组映射矩阵,第一部分表示 Mirror-CGH 映射,第二部分表示 CCD-CGH 映射。干涉检测得到 (x_{CCD}, y_{CCD}) ,通过 CCD-Mirror 仿射变换得到无畸变坐标 (x_{Mir}, y_{Mir}) 。

3 实际工件检测的畸变校正

将上述畸变校正技术用于某工程项目型号为 800 mm×600 mm 离轴非球面主镜的加工过程,检测用 CGH 如图 5 所示。

检测误差通过校验特征点得到,理论上,镜面上校验特征点的坐标与畸变校正后面形校验特征点的坐标相同,特征点在畸变校正后面形图上的坐标与

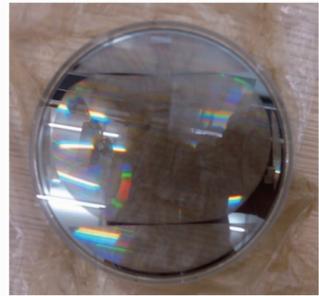


图 5 用于补偿检测的 CGH

Fig. 5 CGH for null test

实际测量值的偏差即为畸变校正误差,误差检验为

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_{Mir} - x_{Mirtest}, \\ \Delta y &= y_{Mir} - y_{Mirtest}, \\ p &= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $(x_{Mirtest}, y_{Mirtest})$ 是由轮廓仪测得的特征点在镜面上坐标, (x_{Mir}, y_{Mir}) 是畸变校正后面形中特征点的质心坐标,偏差 p 即是校正误差。

表 1 列出了特征点位置的误差,其中 1~5 号特征点参与畸变校正运算,6、7 号点是校验点,表中校正误差最大值为 0.8761 mm,检测精度高于传统的畸变标定方法^[7-8]。表中所列校正误差说明本畸变校正方法的精度可以满足点对点的加工方法需求,例如离子束抛光。

表 1 特征点位置误差值
Table 1 Position errors of feature points

No.	Position error /mm		
	Δx	Δy	ρ
1	-0.1282	-0.0903	0.1568
2	0.4428	-0.5423	0.7001
3	0.1449	-0.6669	0.6825
4	-0.6478	-0.3821	0.7521
5	0.5743	-0.4130	0.7074
6	0.2802	0.7441	0.7951
7	0.5688	-0.6663	0.8761
RMS	0.4859	0.7553	0.7017

根据畸变校正后面形文件,该工件经过 2 次离子束抛光,面形精度[用均方根(RMS)误差表示]从 0.068λ 收敛到 0.0162λ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$),最终面形如图 6 所示。

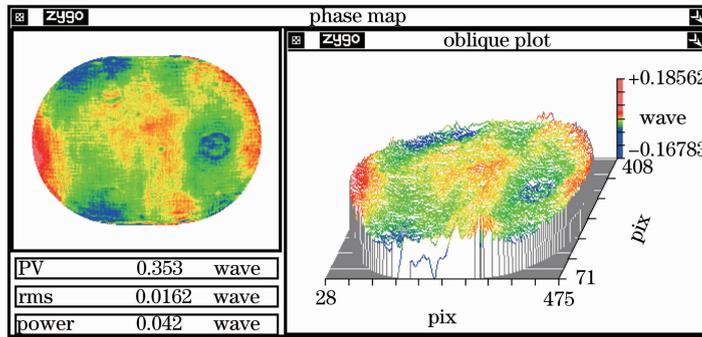


图 6 离子束抛光后面形(畸变已校正)

Fig. 6 Ion beam polishing outcome (distortion has been corrected)

4 结 论

提出一种简单、快速、工程实用性强的畸变校正方法,校正后位置精度达到检测像素级,能有效校正大离轴量、高陡度的离轴非球面。事实上,CGH 补偿检测中,离轴非球面按照自由曲面检测,所以该检测方法也适用自由曲面的检测。

该检测方法忽略了干涉仪内部微小畸变以及 CGH 设计误差,这部分近似会限制畸变校正精度的进一步提高,将在下一步工作中分析它们的影响,并深入分析干涉仪畸变补偿方法,进一步提高畸变校正精度。

致射 感谢黎发志、王旭、焦健、刘小玲等同志对本文工作的帮助。

参 考 文 献

- 1 D Malacara. Optical Shop Testing[M]. 3rd edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 483-484.
- 2 Wang Xiaopeng, Gao Zhishan, Ma Jun, *et al.*. Investigation of measurement uncertainty of aspheric surface based on null-computer-generated holography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112003.
- 王小鹏,高志山,马 骏,等.非球面测量中零位计算全息的测

量不确定度分析研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112003.

- 3 Gu Yongqiang, Miao Erlong, Gao Songtao, *et al.*. Accuracy analysis on paraboloid calibration with computer-generated holography[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1208005.
- 谷勇强,苗二龙,高松涛,等.计算全息法标定抛物面精度分析[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1208005.
- 4 Feng Jie, Deng Chao, Xing Tingwen. Design and error analysis of the computer-generated hologram used for concave aspheric surface testing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110902.
- 冯 婕,邓 超,邢廷文.用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110902.
- 5 Ren Jianfeng, Guo Peiji. Design of original structure of illuminating system in off-axis convex aspheric lens testing system with computer-generated hologram [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222005.
- 任建峰,郭培基.计算全息法检测离轴凸非球面照明镜组初始结构[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222005.
- 6 Li Fazhi, Luo Xiao, Zhao Jingli, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 709-716.
- 黎发志,罗 霄,赵晶丽,等.离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 709-716.
- 7 Li Ruigang, Zheng Ligong, Xue Donglin, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 533-538.
- 李锐钢,郑立功,薛栋林,等.大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 533-538.
- 8 M Novak, C Zhao, J H Burge. Distortion mapping correction in aspheric null testing[C]. SPIE, 2008, 7063: 706313.

栏目编辑:何卓铭