

文章编号:1004-4213(2011)08-1191-5

光学元件干涉检测数据的定位处理方法

陈伟

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 西安 710054)

摘 要:在光学元件的抛光阶段,通常采用干涉仪对光学元件的面形数据进行检测,为进一步的加工工作提供指导意见.为了利用干涉仪检测数据给出被测光学元件面形上的各点空间坐标准确位置,对面形数据的原始数据做二值化处理,用 Sobel 算子采用基于边缘检测的方法准确提取光学元件的外形轮廓数据,采用基于半径约束的最小二乘拟合方法对被测光学元件的内、外圆边缘数据进行多次处理,求取内、外圆的圆心位置,半径大小,根据等准确度测量原则获得光学元件面形数据的准确值,为在干涉仪检测所得面形数据上准确建立坐标系提供依据.

关键词:光学检测;数控加工;边缘检测;随机误差

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1191

0 引言

大型非球面光学元件具有提高光学系统性能,改善成像质量,缩小外形尺寸,减轻仪器重量等优点^[1-2],已成为空间光学、天文光学、国防光学等领域的关键部件之一.传统的大型非球面加工分为粗磨、精磨、抛光三个阶段^[3].粗磨和精磨加工是实现最接近球面和非球面化的阶段;抛光阶段是最终达到所需面形的阶段,因此抛光阶段的工作量是非常大的.针对检测所得光学元件的制造误差数据选用合适的处理方案,在被加工光学元件上实现检测数据数字化定位对于利用数控加工技术提高大型非球面加工的质量和效率具有重要意义.

在光学元件的抛光阶段,通常采用干涉仪检测技术获取光学元件的面形数据^[4].仪器检测所得光学元件的面形数据由单次测量中检测效果最好的测量数据做为最终结果,检测结果的准确度取决于检测仪器的准确度,为了提高检测准确度,主要通过研制高准确度精密光学检测设备来解决问题^[5-6].干涉仪通过 CCD 成像,所获得的波面相位数据是一个同像素点位置相联系的量,在加工过程中,由于元件加工质量,测量环境干扰等不确定因素,常常得到的是有残缺的干涉采样图像,给数控加工中应该在什么位置对光学元件表面材料去除带来了困惑.本文通过边缘检测获取被检光学元件轮廓,再利用最大内接圆法求解所得轮廓数据的圆心位置、半径大小,在

检测所得的干涉图上建立坐标系,最终实现检测数据的数字化定位.基于等准确度测量原则利用这种定位方法可以较为准确地获取光学元件面形的准确数据.

1 干涉仪检测数据的定位处理方法

1.1 轮廓提取

边缘是指图像局部亮度变化最显著的部分,是物体的轮廓或物体不同表面之间的交界位置在图像中的反映^[7].边缘检测在图像处理与计算机视觉中占有特殊位置,它是底层处理中最重要的一环之一,其结果的正确性和可靠性将直接影响对客观物体的理解.

在干涉仪检测中,元件的塌边,表面上的灰尘等干扰都会使干涉仪无法检测到数据.因此在对于干涉仪数据利用最小二乘法消除倾斜项和常量项的影响后,可以采用简单的二值化处理,有数据位置置 1,无数据点置 0 获取检测数据的二值化图像.

索贝尔算子是由索贝尔(Sobel)提出的一种将差分运算与局部平均相结合的边缘检测方法^[8],该算子是在以 $f(x, y)$ 为中心的 3×3 领域上计算 X 和 Y 方向的偏导数,包括检测水平边沿的

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

和检测垂直边沿的

基金项目:陕西省教育厅专项(No.09JK566)资助

第一作者:陈伟(1972-),男,讲师,博士,主要研究方向为光学测试与光信息处理. Email:zebeck@163.com

收稿日期:2011-01-29;修回日期:2011-06-01

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Soble 算子利用像素的上下左右领域的数值加权算法,根据在边缘点处达到极值这一原理进行边缘检测.该方法不但产生较好的检测效果,而且对噪音具有平滑作用,可以提供较为精确的边缘方向信息.

1.2 内、外圆直径检测

圆方程可表示为

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=R^2 \quad (1)$$

残差为

$$\xi_i=(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-R^2 \quad (2)$$

残差平方和为

$$Q=\sum_{i \in C} \xi_i^2=\sum_{i \in C} [(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-R^2]^2 \quad (3)$$

式中, (x_0, y_0) 为圆心坐标, R 为半径, $i \in C$, C 为圆上所有边界点的集合^[9-10].

根据最小二乘法原理有

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0}=\frac{\partial Q}{\partial y_0}=\frac{\partial Q}{\partial R}=0 \quad (4)$$

计算式(4),可得

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x_0}=2 \sum_{i \in C} [(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-R^2] \cdot (-2)(x_i-x_0)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial y_0}=2 \sum_{i \in C} [(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-R^2] \cdot (-2)(y_i-y_0)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial R}=2 \sum_{i \in C} [(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-R^2] \cdot (-2)R=0 \end{cases} \quad (5)$$

化简式(5),可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 2x_i & 2y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^2-x_0^2-y_0^2 \\ x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = x_i^2+y_i^2, i \in C \quad (6)$$

求解式(6)即可得到所得面形检测数据的外形轮廓最小二乘解.

由于被测光学元件的内、外圆存在一定的不同心度,需要对内、外圆数据分别进行数据拟合,求解内、外圆的圆心位置和半径大小.利用边缘检测所得的面形轮廓数据计算获得一个初始圆心位置和半径值,利用它们把面形轮廓数据分为内圆轮廓数据和外圆轮廓数据,分别拟合内圆和外圆的圆心位置、半径大小.

外圆拟合选点的约束条件为

$$R_i \leq \sqrt{(x_i-x_{j_0})^2+(y_i-y_{j_0})^2} \leq R_i+t \quad (7)$$

式(7)中, (x_{j_0}, y_{j_0}) 为当前外圆的圆心坐标值, R_i 为当前的外圆半径数值, t 为步长值,数值为大于零的

几何量,在该条件约束下把满足该条件的所有的外圆轮廓数据 (x_i, y_i) 记入一个集合,拟合下一个外圆圆心位置和半径大小,只要集合中的数据少于 3 个或前后两次计算的外圆半径的误差满足准确度要求则停止计算,通过这种逐步外扩的方式找到精确的外圆特征数据.

内圆拟合选点的约束条件为

$$R_j-t \leq \sqrt{(x_j-x_{j_0})^2+(y_j-y_{j_0})^2} \leq R_j \quad (8)$$

式(8)中, (x_{j_0}, y_{j_0}) 为当前内外圆的圆心坐标值, R_j 为当前的内圆半径数值, t 为步长值,数值为大于零的几何量,在该条件约束下把满足该条件的所有的内圆轮廓数据 (x_j, y_j) 记入一个集合,拟合下一个内圆圆心位置和半径大小,只要集合中的数据少于 3 个或前后两次计算的内圆半径的误差满足准确度要求则停止计算,通过这种逐步内缩的方式找到精确的内圆特征数据.

2 实验与分析

实验中采取一块口径为 $\Phi 110$ mm 的圆形口径光学元件,元件中心有一个 $\Phi 20$ mm 的圆孔,采用游标卡尺对该光学元件的内、外直径各做了 5 次检测,数据记录如表 1. 内、外圆边缘分别做了 0.5 mm 的倒边,故干涉仪所检测的内外圆直径比应为 1:5.14.

表 1 被测光学元件内、外圆直径检测数据

Table 1 Inner and outer diameter of measured component					
Times/n	1	2	3	4	5
Inner diameter/mm	20.20	20.18	20.18	20.16	20.18
Outer diameter/mm	109.94	109.92	109.96	109.94	109.94

利用 ZYGO 干涉仪检测该光学元件,分辨率选用 160×120 . 第一次所得原始面形数据如图 1. 图 2 为最小二乘法去常量项和倾斜后的面形分布显示. 图 3 为由轮廓数据拟合的用于划分内、外圆轮廓数据的圆心位置和半径大小. 外圆数据点用“+”表示,

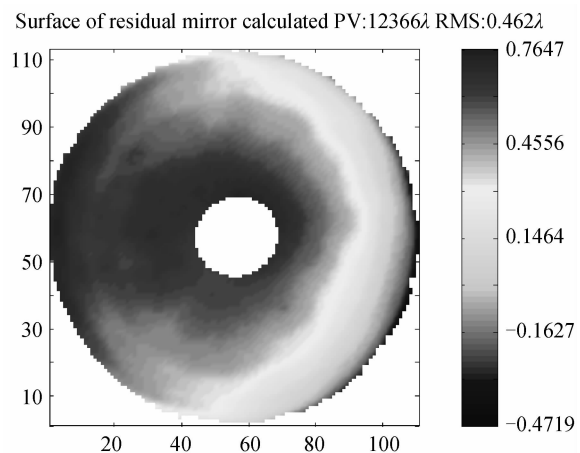


图 1 原始面形
Fig. 1 Origin figure

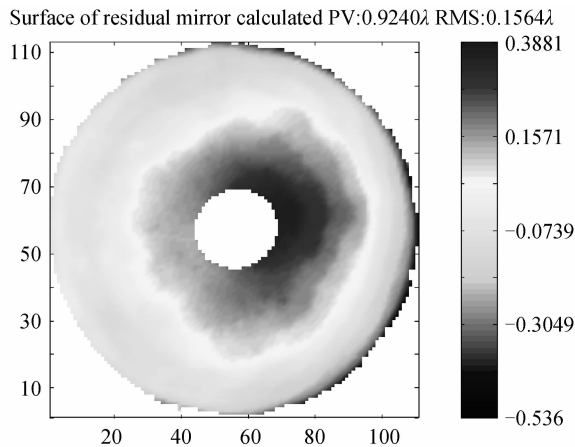


图2 去常数项和倾斜项面形
Fig. 2 Figure without const and tilt

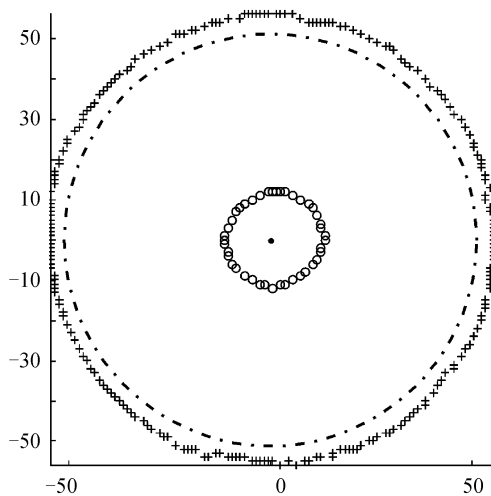


图3 Sobel 算子提取的边缘
Fig. 3 Edge by Sobel operator

内圆用“○”表示. 图中中心位置为由内、外圆数据共同拟合的圆心,虚线所示为拟合的初始圆,利用它把边缘数据划分为内、外圆数据,分别拟合内圆,外圆的圆心位置和半径大小,在此基础上,对外圆半径拟合数据递增,对内圆半径拟合数据递减重复拟合内、外圆的特征数据,直到拟合数据无法满足阈值要求.

实验在 160×120 和 320×240 的分辨率下分别对光学元件做了三次测试,检测数据分别如表 2 和表 3. 从表 2 的数据可知,拟合数据的内、外圆半径比同光学元件自身的内、外圆半径比 $1:5.14$ 要小一些. 从表 3 的数据可知,当增加采样分辨率后,拟合数据的内、外圆半径比同光学元件自身的内、外圆半径比基本一致,这说明通过提高光学元件的采样分辨率,可以建立更为准确的干涉数据的自身坐标系. 在这两种分辨率的测量下,内、外圆的圆心间距均大于光学元件设计的同心度. 产生这种情况一方面是由于干涉图采样中受各种干扰因素影响会丢失部分数据;另一方面,干涉仪采样的最小间隔为 1 个像素. 故理想情况下,拟合数据的内、外圆的圆心间距的在一个像素左右是合理的,而边缘数据损失较

多的情况下,这个间距会更大. 相对于内圆数据而言,外圆的数据保存的更为完全,其拟合的圆心位置更接近元件的真实位置,故建立坐标系时,以外圆圆心作为坐标系原点位置.

表 2 圆的特征参量拟合 (160×120)
Table 2 Simulation data of circle (160×120)

Times/n	1	2	3
The center of X/pixel	62.274 1	63.199 4	63.445 9
inner circle Y/pixel	63.159 9	63.084 3	63.241 2
Inner radius/pixel	11.244 8	11.296 9	11.237 2
The center of X/pixel	61.384 7	62.022 1	62.139 4
outer circle Y/pixel	62.985 8	62.795 0	62.889 3
Outer radius/pixle	56.394 3	56.515 1	56.797 7
Interval of centers/pixel	0.906 3	1.212 4	1.353 1
Ratio of inner to outer	1:5.015 1	1:5.002 7	1:5.054 4

表 3 圆的特征参量拟合 (320×240)
Table 3 Simulation data of circle (320×240)

Times/n	1	2	3
The center of X/pixel	126.904 1	125.925 2	125.684 4
inner circle Y/pixel	126.772 6	126.793 1	126.420 4
Inner radius/pixel	22.029 9	22.197 5	21.859 8
The center of X/pixel	123.797 9	124.189 4	123.365 5
outer circle Y/pixel	126.323 0	123.792 6	126.008 1
Outer radius/pixel	113.451 4	115.211 0	113.877 2
Interval of centers/pixel	3.138 6	3.466 5	2.355 3
Ratio of inner to outer	1:5.149 9	1:5.190 3	1:5.209 4

3 应用

目前光学元件抛光阶段通常采用干涉仪的单次检测数据作为进一步抛光的依据,通常在数据中会包含较多的随机误差. 根据误差理论中等准确度测量原则,对同一物理量的多次测量值取其均值,可以表示该物理量的真值^[11].

在实际检测中,利用移相干涉仪测试光学元件,即使是同一组测试数据,不同次的的面形数据矩阵的维数通常也存在着一定的差异,使得对检测数据直接取其算术平均值以获取被测光学元件的真实面形数据变得难以实现. 为了解决这个问题,采取了如图 4 所示的解决方案.

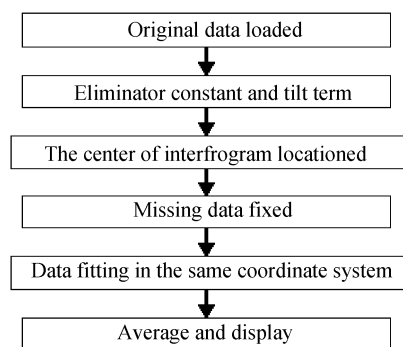


图4 干涉检测数据抗振动计算方法
Fig. 4 Vibration resistance calculation way of interference test data

首先读入干涉仪检测所得的原始面形数据;利用最小二乘法做曲线拟合消去面形检测数据中常量项和倾斜项的影响;再用最小二乘法做圆的拟合,对圆形口径光学元件做中心定位,确定坐标系的原点位置;采取图像复原技术修复干涉仪采样时丢失的数据;然后对同组测量数据中不同次的测量数据在统一的坐标值下用三次样条插值拟合其数据;最终对多个数据取其算术平均值作为该光学元件面形检测数据的最终检测数据.

图 5 所示为测量组中 4 次测量数据的面形图,可以看到测量中由于环境的影响,干涉图中振动的影响很明显,无法反映被测元件表面的真实情况.采用图 4 所示方案对这 4 次的面形数据分别做了数据拟合,将拟合数据统一在同样的坐标节点上,将这 4 次拟合的面形数据取其算术平均值,结果如图 6,可以看到图中数据的振动影响受到了明显的抑止.图 7 所示为该光学元件单次测量效果比较好的面形图,比较图 6 和图 7 中的干涉图,可见二者在面形上

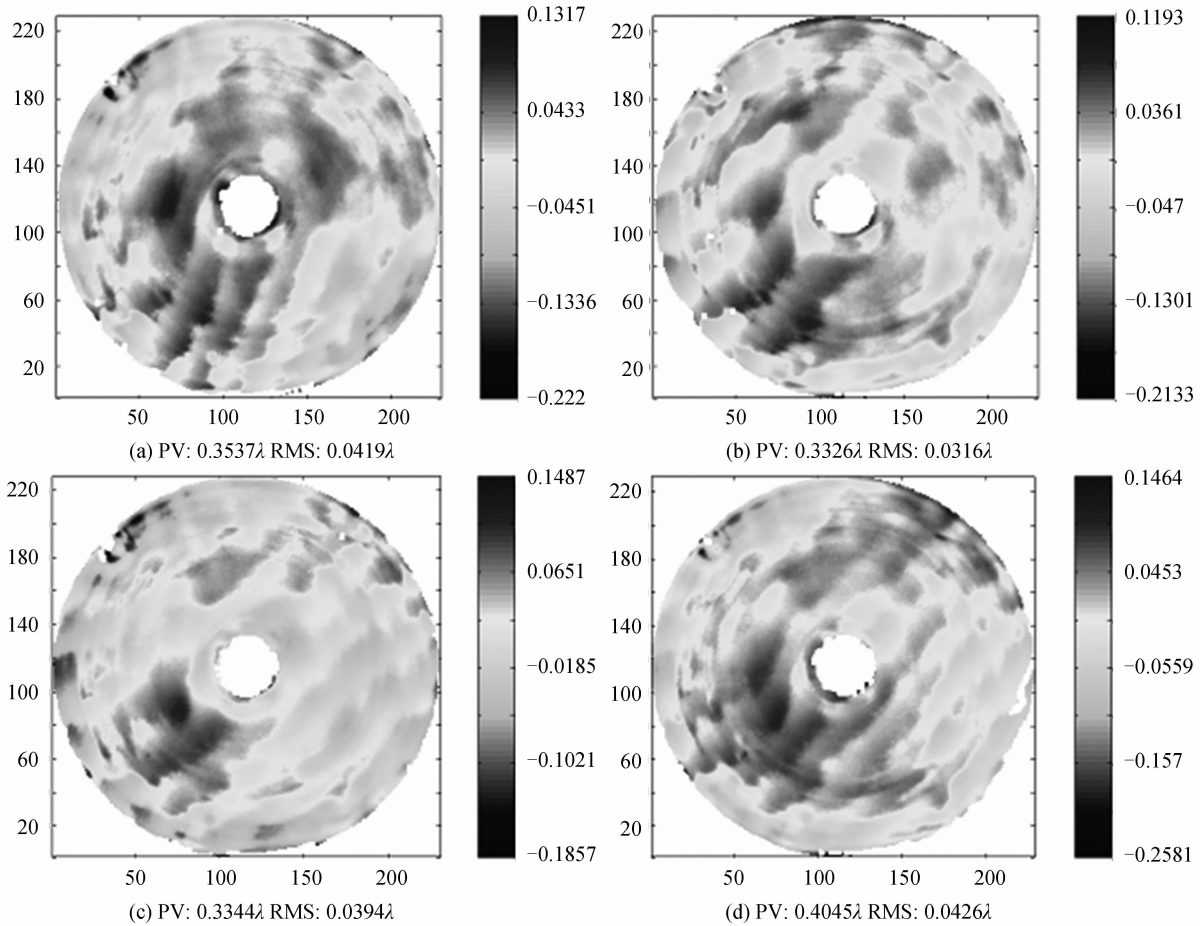


图 5 测量组中 4 次测量数据的面形图

Fig. 5 Figure of four test data in measured group

Surface of residual mirror calculated PV:0.2965λ RMS:0.0330λ

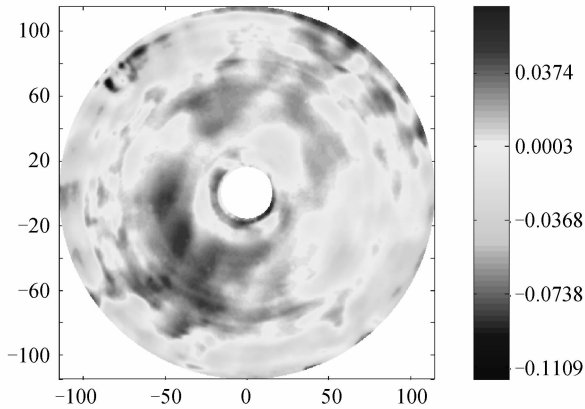


图 6 4 次拟合数据的算术平均值

Fig. 6 Arithmetic average value of 4 test data

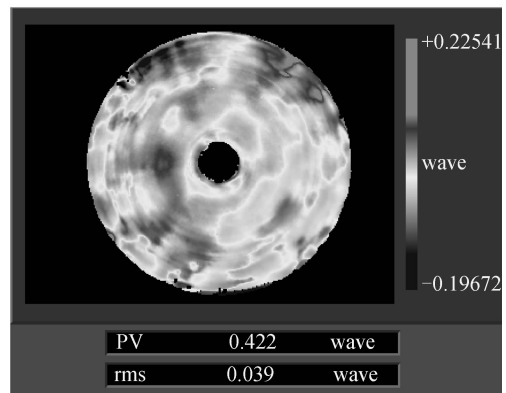


图 7 单次测量数据的干涉图

Fig. 7 Inteferogram of measured data

趋于一致, PV 与均方根值也比较接近. 表明采用本文所述方案求取被测光学元件表面面形的多次数据的算术平均值可以较好的表征光学元件真实的面形分布特征.

4 结论

随着计算机控制加工的研究及发展, 利用干涉仪检测的数据在被加工的光学元件上实现精确定位具有实际的意义. 本文初步分析了利用干涉仪检测的数据拟合圆形口径光学元件外形轮廓, 实现圆心精确定位, 半径精确求解的途径, 并给出了实验结果, 其求解方法对实现数控加工中对加工位置的数字化定位, 准确标定光学元件面形误差数据具有实际意义.

参考文献

- [1] FAN Bin, WAN Yong-jian, CHEN Wei, *et al.* Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspheric optics[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, **33**(1): 128-132.
范斌, 万勇建, 陈伟, 等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 128-132.
- [2] HUI Bin, LI Jing-zhen, PEI Yun-tian, *et al.* Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1117-1120.
惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1117-1120.
- [3] WAN Yong-jian, YUAN Jia-hu, YANG Li, *et al.* A model with sub-aperture lap for lapping[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 500-502.
万勇建, 袁家虎, 杨力, 等. 大型非球面环带精磨方法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 500-502.
- [4] YU Jing-Chi, SUN Xia-fei, GUO Pei-ji, *et al.* A study on testing techniques for optical elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(Suppl): 15-18.
余景池, 孙侠菲, 郭培基, 等. 光学元件检测技术的研究[J]. *光电工程*, 2002, **29**(增刊): 15-18.
- [5] WANG Dong-sheng, WANG Kai-wei, SHNE Yi-bing, *et al.* Error analysis of spherical ultra-precision measurement[C]. *SPIE*, 2010, **7656**: 76560O-76560O-7.
- [6] CAO Zhao-jing, HU Wu-sheng, MU Quan-quan, *et al.* Investigation of the connection accuracy of the sub-aperture optical testing with experiment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1233-1237.
曹召良, 胡五生, 穆全全, 等. 子孔径光学检测拼接准确度实验研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1233-1237.
- [7] WU You-fu. A survey of the research on edge detection in image processing[J]. *Ship Electronic Eng', leerin*, 2006, **26**(4): 35-38.
伍尤富. 图像处理中边缘检测研究方法[J]. *舰船电子工程*, 2006, **26**(4): 35-38.
- [8] LIU Ke, ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Radius constraint least-square circle fitting method and error analysis[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(5): 604-607.
刘珂, 周富强, 张广军. 半径约束最小二乘圆拟合方法及其误差分析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(5): 604-607.
- [9] LIU Yuan-peng, ZHANG Ding-hua, Gui Yuan-kun, *et al.* Fitting planar circles with constrained least squares [J]. *Journal of Computer Xi'an Aided Design & Computer Graphics*, 2004, **16**(10): 1382-1385.
刘元朋, 张定华, 桂元坤, 等. 用带约束的最小二乘法拟合平面圆曲线[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, **16**(10): 1382-1385.
- [10] CAO Zheng-wen, ZHAO Jian, GAO Bao-jian. The research of location about the infrared multisites system based on the weighted least square method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1001-1004.
曹正文, 赵健, 高宝建. 基于加权最小二乘法的红外多站定位的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1001-1004.
- [11] 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.

Interferogram Processing Method of Optical Surfaces

CHEN Wei

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Interferometers are used to test the surface shape data of optical component for further processing to provide guidance. Various spatial point on the tested optical component are given by interferogram analysis. The binary image is get from the raw data, then the edge of optical component is differentiated with a sobel exactly. A coefficient constraint condition is incorporated into the least squares method for geometric parameters of circles, and the location of the centre of the circle and the size of the radius will be calculated by the method. Various spatial points on the tested optical component are given by calculation method, and arithmetic average value of equal precision is provied. The coordinate of the interferogram can be established exactly.

Key words: Optical test; Computer control optical surface; Edge detectiion; Random error