

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904961

无需精确调整被测镜的平面面形检测新方法^{*}

张培洁, 赵维谦, 杨 帅, 邱丽荣

(北京理工大学光电学院 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室 北京 100081)

摘 要: 现有的面形绝对检测法为了保证检测精度, 在测量过程中需要耗费大量时间对被测镜进行精密的姿态调整。针对上述问题, 提出了一种无需精密调整被测镜姿态的两平面面形检测方法。该方法需被测镜在 3 个位置进行测量: 初始位置、旋转未知角度后的位置、横向平移未知距离后的位置。通过特征匹配求解被测镜实际旋转角度和平移量, 通过迭代算法和拟合 Zernike 多项式恢复被测镜面形, 并对被测镜面形中损失的角频率项进行补偿。该方法在保证精度的同时, 避免了被测镜的精密调整, 缩短了测量时间。实验表明, 该方法与 Vannoni 的方法相比, 二者检测结果的残差均方根 (RMS) 值为 0.004λ , 测量中被测镜调整过程快速简单连贯, 为光学元件的面形检测提供了一种新的技术途径。

关键词: 面形检测; 旋转平移; 特征匹配; 迭代; Zernike 多项式

中图分类号: TH744 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 140.30

Flat measurement method without high precision adjustment of tested flat

Zhang Peijie, Zhao Weiqian, Yang Shuai, Qiu Lirong

(Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Existing absolute measurement methods take a lot of time to align and adjust the tested flat precisely during the measurement process to ensure the high accuracy. In this paper, we propose a two-flat measurement method that does not require high precision adjustment of the tested flat. The method requires the tested flat measured three times, including the original position, the unknown angle after rotating, and the unknown distance after lateral shifting. The actual rotation angle and shift displacement of the tested flat are solved by feature matching. The surface of the tested flat is reconstructed by the iterative algorithm and Zernike polynomial fitting. Meanwhile, the compensation of the lost angular frequency terms is considered. This method avoids the precise adjustment and shorten the measurement time while ensuring the measurement accuracy. Compared with Vannoni's method, experimental results show that root mean square (RMS) of the residual of the two measurement methods is 0.004λ , and the adjustment process of the tested flat is fast, simple and coherent. The proposed method provides a new way of surface measurement for optical components.

Keywords: Surface measurement; rotation-shift; feature matching; iteration; Zernike polynomial

0 引 言

干涉法是常用的高精度光学元件面形检测方法。在干涉测量中, 通常被测镜面形测量结果是以参考镜和被测镜的相对面形结果来表示, 测得的被测镜面形精度受限于参考镜的面形精度。为了得到被测镜的真实面形, 需要对被测镜进行面形绝对检测。现有的面

形绝对检测方法在测量过程中需花费大量的时间进行被测元件的装卸或高精度姿态调整, 极大地制约了测量效率的提升。

三面互检法是早期的绝对检测技术, 由 Schulz 等^[1]在 1967 年提出。起初的三面互检法只能检测被测镜在水平和垂直两条线上的面形分布, 在此基础上, 发展出了可以恢复被测镜全面形的方法, 例如 Zernike 多项式法^[2-4]、迭代算法^[5-6]、奇偶函数法^[7]、旋转剪切

收稿日期: 2019-04-11 Received Date: 2019-04-11

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0701203)、北京理工大学创新人才科技资助专项 (2019CX01020) 项目资助

法^[8]、斜入射法^[9-12]、全区域矩阵分析方法等^[13]。该类方法需要3个被测镜,除了被测镜两两互检外,还需被测镜旋转至既定角度进行测量。若被测镜旋转角度不精确,将带来检测误差,因此需要花费大量时间对准与调整被测镜。

为解决三面互检法步骤繁琐、效率低下的问题,伪剪切干涉法^[14]及旋转平移法^[15-21]被提出。该类方法只需要两个光学元件,无需反复装卸被测镜。但该类方法对被测镜姿态调整精度要求较高:伪剪切干涉法需确保被测镜在 X 和 Y 方向上的平移精度;旋转平移法需确保被测镜的旋转精度和平移精度。除此之外,旋转或者平移测量后需将被测镜调整到初始位置与参考镜对准,为下一次调整做准备。上述过程同样需耗费大量时间,且会进一步引入环境误差源。Zhai等^[22]提出了结合相对倾斜测量的旋转平移法,该方法无需精确对准,但需要多次平移,以及额外的一台干涉仪用于同时测量相对倾斜,测量次数多,成本高。

针对上述问题,本文提出一种基于旋转平移及特征匹配的平面面形检测方法。该方法首先调整被测镜进行3次测量:初始位置测量、旋转任意角度后测量、平移任意距离后测量;然后,通过特征匹配来解算被测镜的实际旋转角度及平移量;最后,将解算结果代入被测镜波面恢复算法,恢复被测镜的旋转非对称面形、旋转对称面形和损失的角频率项面形。该方法在保证检测精度的同时,免去了被测镜的高精度姿态调整要求及反复调整,步骤简单,有效提高了测量效率。

1 基于旋转平移及特征匹配的平面面形检测方法原理

如图1所示,其中,虚线为被测镜位置,实线为参考镜位置。基于旋转平移及特征匹配的平面面形检测方法共需被测镜在3个位置进行相对测量:1次初始位置测量、1次旋转位置测量、1次平移位置测量。这3个位置的测量数据分别表示为 $W_1(x, y)$ 、 $W_2(x, y)$ 、 $W_3(x, y)$,表达式如下:

$$W_1(x, y) = R(-x, y) + T(x, y) \quad (1)$$

$$W_2(x, y) = R(-x, y) + T^R(x, y) \quad (2)$$

$$W_3(x, y) = R(-x, y) + T^R(x, y + \Delta y) \quad (3)$$

式中: $R(-x, y)$ 表示参考镜翻转后的面形分布; $T(x, y)$ 表示被测镜在初始位置的面形分布; $T^R(x, y)$ 表示被测镜绕光轴旋转某未知的角度后的面形分布; $T^R(x, y + \Delta y)$ 表示旋转未知角度后的被测镜向 Y 方向平移未知距离 Δy 后的面形分布。

根据获得的3个位置测量数据 W_1 、 W_2 、 W_3 解算被测镜的旋转角度及平移量,将其代入到后续的波面恢复算

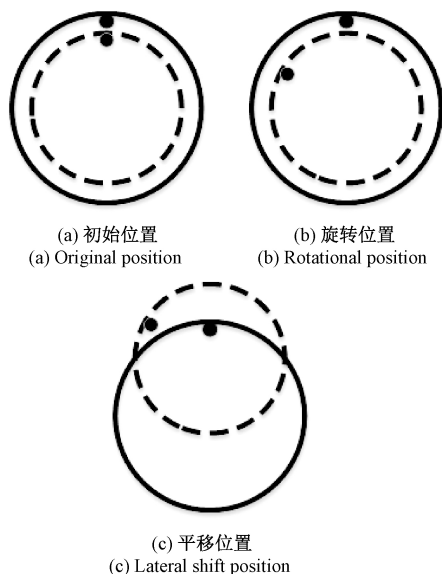


图1 3次测量位置

Fig.1 Three measurement position represented by the solid circle

法中:通过迭代算法恢复被测镜的旋转非对称面形 T_{Asym} ;通过拟合Zernike多项式恢复被测镜的旋转对称面形和补偿的 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项面形 $[T_{Sym} + T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}]$ 。将 T_{Asym} 和 $[T_{Sym} + T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}]$ 相加,得到被测镜的面形分布 T ,即:

$$T = T_{Asym} + [T_{Sym} + T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}] \quad (4)$$

1.1 解算被测镜旋转角度及平移量

W_1 和 W_2 、 W_2 和 W_3 分别用尺度不变特征变换^[23](scale invariant feature transform, SIFT)算法进行特征提取和特征匹配,过程如图2所示。首先,保证 W_1 、 W_2 和 W_3 的数据矩阵的尺寸相同,并将 W_1 、 W_2 和 W_3 归一化到0~255。然后依次进行SIFT特征点提取及描述、STFT特征向量匹配等。

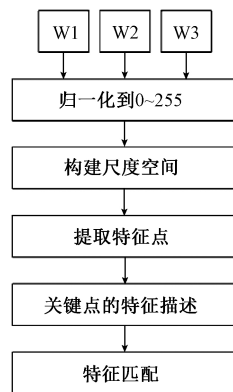


图2 SIFT特征匹配步骤

Fig.2 SIFT feature matching process

旋转角度通过匹配 W_1 和 W_2 求解。设定合适的匹配阈值匹配 W_1 和 W_2 后,设得到的某对匹配点在 W_1 和 W_2 上的坐标分别为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 。将点 P_1 和 P_2 的坐标转换成极坐标:

$$\rho_1 = \sqrt{y_1^2 + x_1^2}, \theta_1 = \arctan2(y_1, x_1) \quad (5)$$

$$\rho_2 = \sqrt{y_2^2 + x_2^2}, \theta_2 = \arctan2(y_2, x_2) \quad (6)$$

由 P_1P_2 该对匹配点计算出被测镜的旋转角度为:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (7)$$

将每对匹配对按照式(5)~(7)求解出旋转角度信息 $\Delta\theta$ 后,将 $\Delta\theta$ 转化到 $0^\circ \sim 360^\circ$, 然后进行排序。中间一段大小变化几乎为 0 的数据段即为被测镜旋转角度信息(有效匹配对解算出的稳定有效结果)。对其取平均作为最终旋转角度结果 $\Delta\theta'$ 。

平移量通过匹配 W_2 和 W_3 求解。设定合适的匹配阈值匹配 W_2 和 W_3 后,设得到的某对匹配点在 W_2 和 W_3 上的坐标分别为 $P_2(x_2, y_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3)$ 。由 P_2P_3 该对匹配点计算出的平移像素量为

$$\Delta y = y_3 - y_2 \quad (8)$$

将得到的每对匹配对按照式(8)进行计算后,对 Δy 进行排序,中间一段大小变化几乎为 0 的数据段即为被测镜平移量信息,对其取平均得到解算结果。由于平移量涉及到实际运算中矩阵元素的下标序号,对解算结果四舍五入取整作为最终平移量结果 $\Delta y'$ 。

1.2 重构被测镜旋转非对称面形

式(1)和(2)相减得到:

$$S(x, y) = W_1(x, y) - W_2(x, y) = T(x, y) - T^R(x, y) \quad (9)$$

由于旋转对称部分抵消,式(9)可转换为:

$$S(x, y) = T_{\text{Asym}}(x, y) - T_{\text{Asym}}^R(x, y) \quad (10)$$

式中: T_{Asym} 表示被测镜 T 的旋转非对称面形,上标“ R ”表示绕光轴旋转 $\Delta\theta$ 后的面形分布。

式(10)通过迭代算法^[6]来重构被测镜的旋转非对称面形 T_{Asym} 。迭代过程如下:

1) 设置初始的 $T_{\text{Asym}} = 0$, 即从一个标准平面开始迭代。

2) 代入 1.1 节计算出的最终旋转角度结果 ($\Delta\theta = \Delta\theta'$), 根据式(10)计算新的剪切结果。

3) 计算步骤 2) 的剪切结果和实际剪切结果的差值:

$$\Delta S(x, y) = [S(x, y)]_{\text{exp}} - S(x, y) \quad (11)$$

式中: exp 表示实际剪切结果。

4) 校正迭代中的 T_{Asym} 分布:

$$(T_{\text{Asym}})_{\text{new}} = T_{\text{Asym}} + \frac{1}{c} \frac{[\Delta S - (\Delta S)^{-R}]}{2} \quad (12)$$

式中: c 为收敛系数, c 必须大于 1。 $(\Delta S)^{-R}$ 表示 ΔS 以与

R 相同的角度、相反的方向旋转。

5) 将 $(T_{\text{Asym}})_{\text{new}}$ 的值替换 T_{Asym} 的值, 回到步骤 2) 继续迭代。迭代直到步骤 3) 的 ΔS 的 RMS 值达到最小值停止。

迭代停止后得到被测镜的旋转非对称面形 T_{Asym} 。由于单次旋转, 迭代计算出的 T_{Asym} 损失了 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项面形信息, 这部分面形将在 1.3 节进行补偿。

1.3 重构被测镜旋转对称面形及补偿面形

式(1)和(3)相减得到:

$$W_3(x, y) - W_1(x, y) = T^R(x, y + \Delta y) - T(x, y) \quad (13)$$

在进行拟合之前, 代入 1.1 节计算出的最终结果 ($\Delta\theta = \Delta\theta', \Delta y = \Delta y'$), 将已经计算出来的 T_{Asym} 从式(13)中剔除:

$$D(x, y) = W_3(x, y) - W_1(x, y) - T_{\text{Asym}}^R(x, y + \Delta y') + T_{\text{Asym}}(x, y) \quad (14)$$

式中: $T_{\text{Asym}}^R(x, y + \Delta y)$ 为 T_{Asym} 绕中心旋转 $\Delta\theta'$ 后在 y 方向上平移 $\Delta y'$ 。

式(14)包含两部分信息, 被测镜 T 的旋转对称面形信息和在旋转测量中损失的角频率项面形信息, 可写为:

$$D(x, y) = T_{\text{Sym}}^R(x, y + \Delta y') - T_{\text{Sym}}(x, y) + T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}(x, y + \Delta y') - T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}(x, y) \quad (15)$$

式中: T_{Sym} 为被测镜 T 的旋转对称面形; $T_{\text{Sym}}^R(x, y + \Delta y')$ 为 T_{Sym} 绕中心旋转 $\Delta\theta'$; θ_0 为 $\Delta\theta'$ 附近 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项较多的角度值; $T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}$ 为损失的 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角频率项面形信息; $T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}(x, y + \Delta y')$ 为 $T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}$ 在 Y 方向上平移 $\Delta y'$ 。

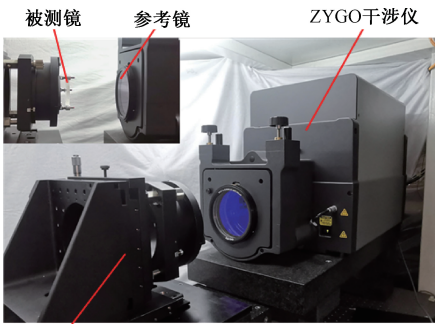
选取 Zernike 多项式中的旋转对称项和 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项, 对式(15)进行最小二乘法拟合, 解出被测镜的旋转对称面形和补偿的 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项面形为 $[T_{\text{Sym}} + T_{(2k\pi/\theta_0)\theta}]$ 。

2 实验与讨论

2.1 实验过程及结果

为了验证该方法的可行性及检测精度, 在型号为 GPI XP/D 的 ZYGO 斐素干涉仪上进行实验, 取口径 4 in 的 ZYGO 标准平面镜(精度为 $PV0.05\lambda$) 为参考镜, 口径 2.5 in 的平晶作为被测镜进行实验, 如图 3 所示。

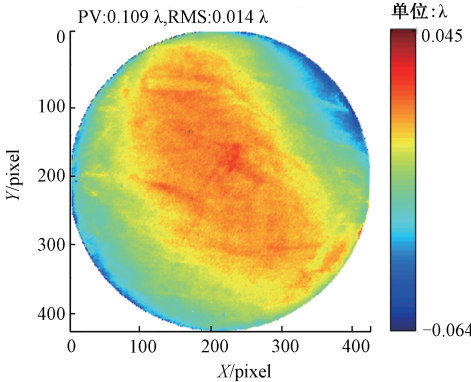
使参考镜和被测镜按照图 1 所示过程进行测量, 3 次测量结果如图 4 所示(图像矩阵为 422×422)。图 4(a) 和(b) 进行特征匹配, 在匹配阈值为 0.7 的情况下, 得到的匹配对如图 5 所示。解算出旋转角度为 -40.76° (负号表示被测镜顺时针旋转)。



五维调整架

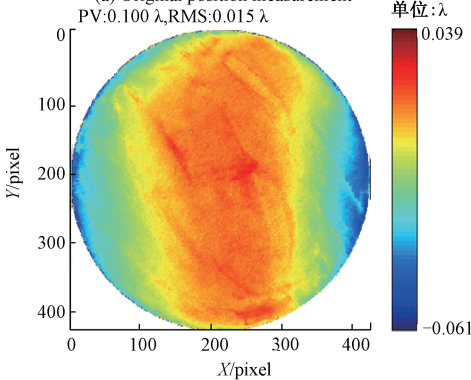
图3 实验装置

Fig.3 Experimental facility



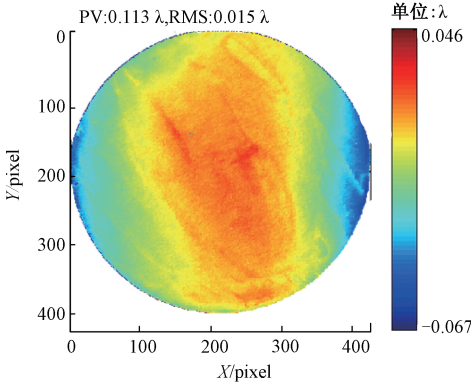
(a) 初始位置测量

(a) Original position measurement



(b) 旋转位置测量

(b) Rotational position measurement



(c) 横向平移位置测量

(c) Lateral shift position measurement

图4 3个位置测量结果

Fig.4 Measurement results of three positions

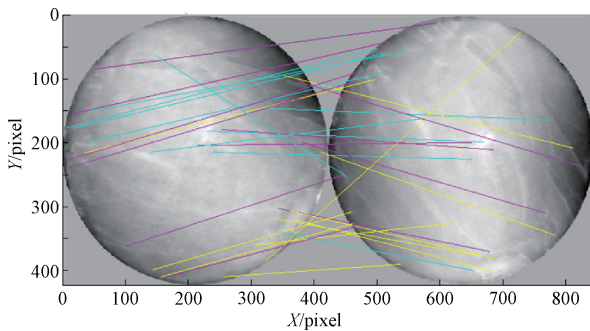


图5 常规位置测量和旋转位置测量结果特征匹配对

Fig.5 Feature matching pair of original position measurement and rotational position measurement

图4(b)和(c)进行特征匹配,在匹配阈值为0.7的情况下,得到的匹配对如图6所示。平移量计算结果为-23.37 pixel,四舍五入取整为23 pixel(负号表示被测镜向上平移)。

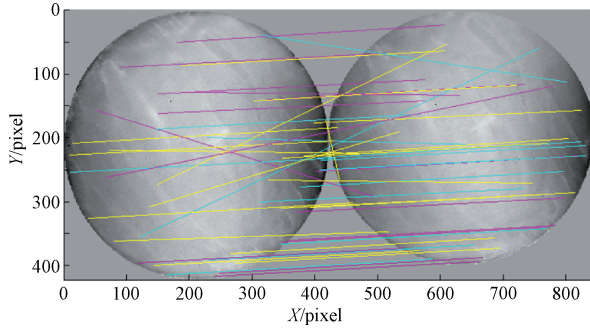
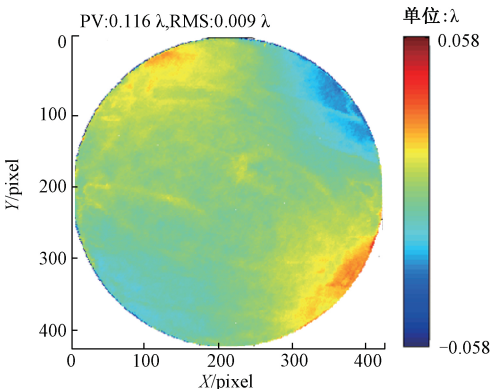


图6 常规位置测量和横向平移位置测量结果特征匹配对

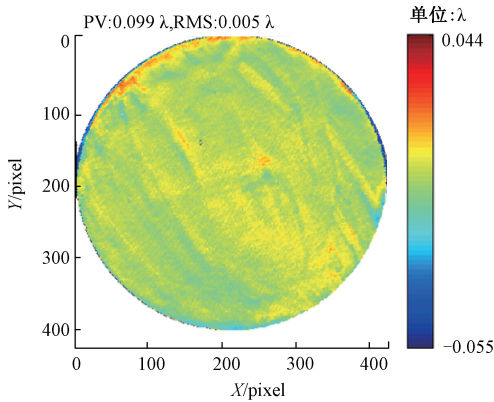
Fig.6 Feature matching pair of original position measurement and lateral shift position measurement

图4(a)和(b)通过1.2节描述的算法恢复出的旋转非对称面形结果如图7(a)所示。图4(a)和(c)根据式(13)构造的差分图如图7(b)所示。根据式(14)去除旋转非对称部分后结果如图7(c)所示。对图7(c)进行最小二乘法拟合恢复的波面如图7(d)所示。在该拟合中,选取了前15项Zernike多项式中的旋转对称项以及前10项 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ ($\theta_0 = 40^\circ$)角频率项进行拟合。

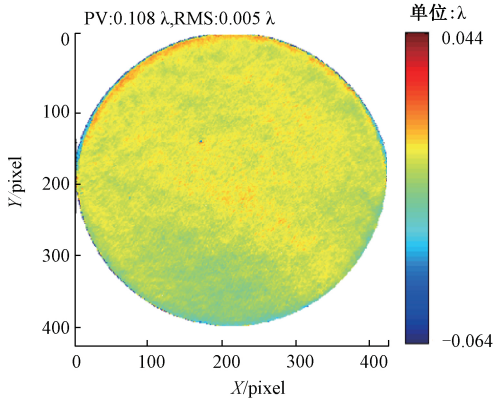


(a) 旋转非对称面形

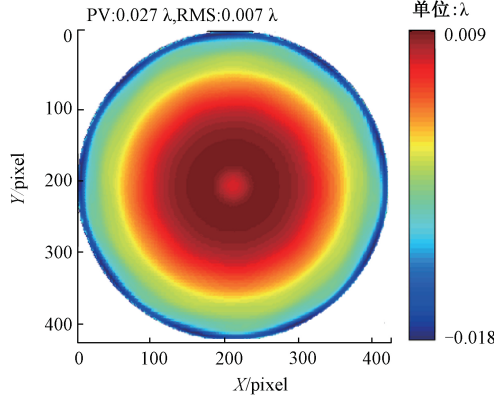
(a) Rotationally asymmetric surface



(b) 差分图
(b) Difference map



(c) 去除旋转非对称部分的差分图
(c) Difference map without rotationally asymmetric surface



(d) 旋转对称和补偿的角频率项面形
(d) Rotationally symmetric surface and the compensation

图 7 算法恢复被测波面过程

Fig.7 The process of algorithm recovering the tested wavefront

将解出的旋转非对称面形、旋转对称面形及补偿的角频率项面形相加,得到完整的被测镜面形如图 8 所示, PV 值为 0.120λ , RMS 值为 0.011λ 。

2.2 实验结果讨论

为了进一步分析该方法的准确性,使用 Vannoni 的方法测量同个被测镜,得到被测镜的面形结果如图 9 所示, PV 值为 0.125λ , RMS 值为 0.014λ 。

当进行平移测量时,被测镜的倾斜变化将在检测结

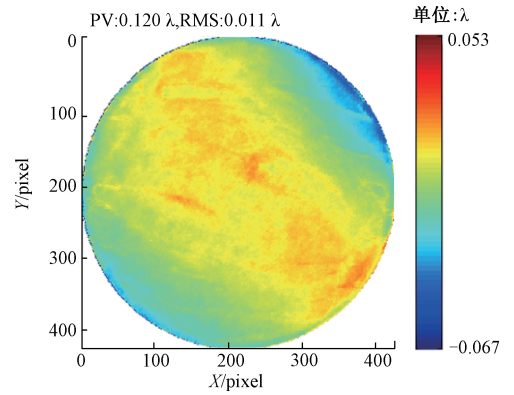


图 8 被测镜面形检验结果

Fig.8 Surface measurement result of the tested flat

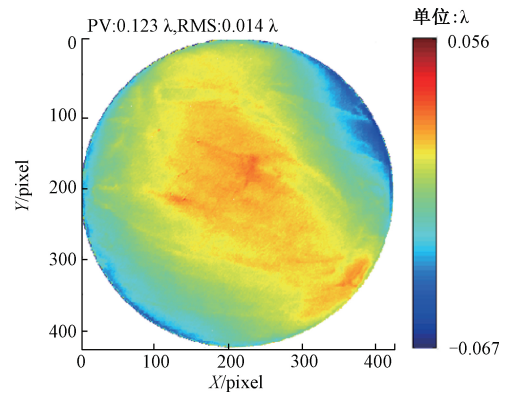


图 9 Vannonid 方法检测结果

Fig.9 Surface measurement result of Vannoni's method

果中引入较大的离焦项面形误差,被测镜的离焦项面形误差无法测得^[16]。为了进一步确定该方法的检测精度,需对两种方法的残差结果去除离焦项面形误差。

去除离焦项面形误差后的残差图如图 10 所示, PV 为 0.056λ , 均方根 (RMS) 为 0.004λ 。提出的方法与 Vannoni 的方法相比,二者检测出的面形结果接近。

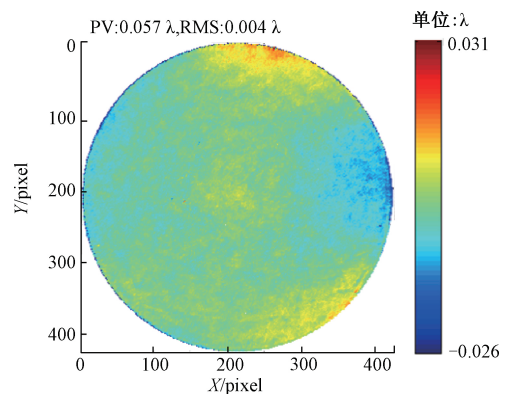


图 10 2 种方法的检测结果残差

Fig.10 Residual result of two methods

3 误差分析

3.1 特征匹配解算旋转角度和平移量误差

为了评估特征匹配解算旋转角度和平移量的精度,附加实验使被测镜进行已知的角度旋转及平移,预定的旋转角度为 54° (顺时针),预定的平移量为 15 pixel (平移方向向上)。在被测镜靠近边缘的区域做两个小标记点,在 ZYGO 测量软件 MetroPro 中蒙板编辑器 (Mask Editor) 功能的辅助下,对被测镜进行精密的对准与调整。被测镜的旋转精度优于 0.1° , 平移精度优于 0.5 pixel^[24]。为了防止偏心误差对解算结果造成影响,设置了略微大于被测镜尺寸的蒙板,使用全口径数据进行特征点提取与匹配。

特征匹配是对两幅图提取出的特征点进行匹配,当前匹配的一对点是否正确地匹配,是根据最近邻距离与次近邻距离欧氏距离比率 (阈值) 的大小来判定的^[23]。正确匹配的欧氏距离比率值比较小,而对于错误匹配或带有较大误差的匹配,它的欧氏距离比率值比较高。故在特征匹配过程中,通过设定不同的阈值,可以得到不同数量的匹配对。按照 1.1 节所述过程,在满足匹配要求的阈值范围内,得到的匹配对数量及解算出的被测镜旋转角度及平移量结果如表 1、2 所示。

表 1 不同匹配阈值下解算出的旋转角度结果

Table 1 Rotation angle results calculated under different matching thresholds				
阈值大小	总匹配对数量	有效匹配对数量	解算角度均值/ $(^{\circ})$	有效匹配对解算结果标准差/ $(^{\circ})$
0.6	11	10	54.41	0.42
0.7	31	19	54.41	0.37
0.8	94	45	54.41	0.48
0.9	366	75	54.45	0.59
1	1895	133	54.32	0.80

表 2 不同匹配阈值下解算出的平移量结果

Table 2 Shift distance results calculated under different matching thresholds				
阈值大小	总匹配对数量	有效匹配对数量	解算平移量均值/pixel	有效匹配对解算结果标准差/ $(^{\circ})$
0.5	7	5	14.69	0.504
0.6	14	7	14.89	0.552
0.7	28	15	14.93	0.824
0.8	82	21	15.21	0.898
0.9	322	35	15.38	1.042

从表 1、2 可以看出,随着匹配阈值的增大,有效匹配对数量增加,但总占比降低,且有效匹配对解算旋转角度及平移量结果的标准差增大。尽管如此,在不同匹配阈值的条件下,由有效匹配对解算出的旋转角度及平移量的均值结果都较为稳定,解算的旋转角度及平移量平均值的标准差分别为 0.04° 和 0.24 pixel。考虑到附加实验中实际旋转的角度及平移量存在误差,故通过特征匹配计算出的被测镜旋转角度误差不超过 0.6° , 平移量误差不超过 1 pixel。

3.2 偏心误差

被测镜旋转后的偏心会引入旋转角度解算误差。在本文实验数据矩阵大小的条件下,在圆域内生随机成 200 个初始位置点,并计算生成绕中心旋转 54° 后的 200 个旋转位置点。对旋转位置点分别引入 X 方向和 Y 方向 $\pm 1 \sim 5$ pixel 的偏心误差,反求解旋转角度。上述过程共进行 100 次。

每次计算出的 X 和 Y 方向偏心引入的最大旋转角度误差绝对值如图 11 所示。在 X 或者 Y 方向 ± 5 pixel 的偏心误差内,解算出的被测镜旋转角度误差不超过 0.4° 。

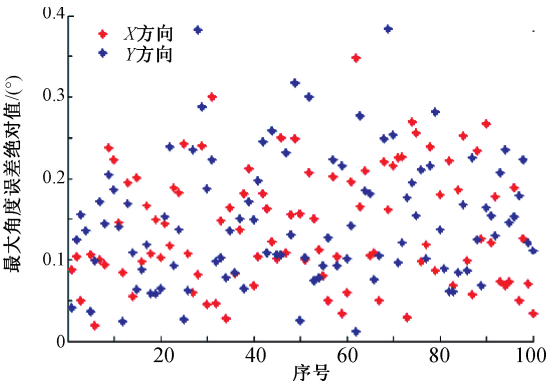


图 11 偏心误差对计算旋转角度的影响

Fig.11 The effect of eccentricity error on the calculation of the rotation angle

3.3 旋转角度误差和平移量误差对被测镜面形检测精度的影响

旋转角度误差和平移量误差是旋转平移法最大的误差源。以 Vannoni 方法的检测结果 (见图 9) 作为真值,使用 1.2 节和 1.3 节描述的波面恢复算法进行被测镜面形解算,仿真分析旋转角度误差和平移量误差对被测镜面形检测精度的影响,结果如图 12 所示。

图 12(a) 表明,随着角度误差的增大,恢复出的被测镜面形与真值面形的点对点残差的 RMS 值增大;在旋转角度误差不超过 1° 的情况下,残差的 RMS 值不超过 0.002λ 。图 12(b) 表明,残差 RMS 值随着平移误差的增大而线性增长;在平移误差不超过 ± 5 pixel 的情况下,残差的 RMS 值不超过 0.004λ 。

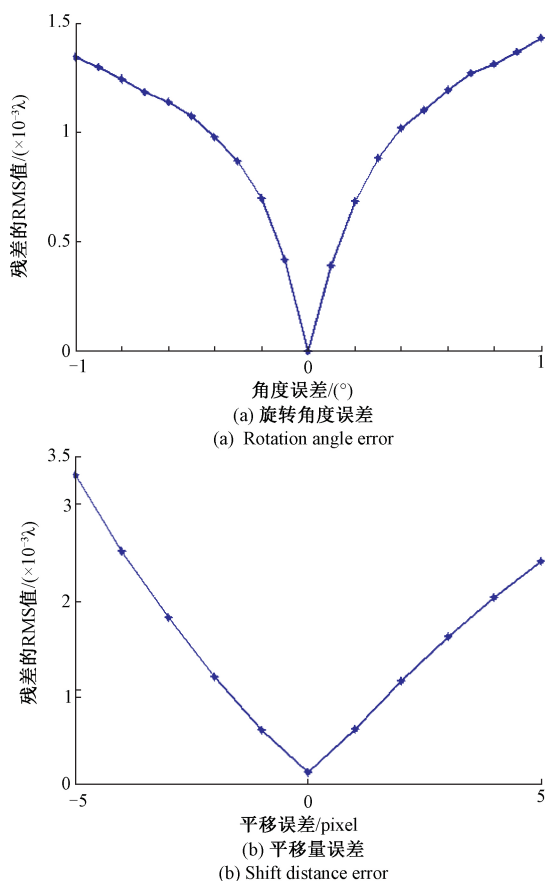


图 12 旋转角度误差和平移量误差对面形检测结果的影响

Fig.12 Influence of rotation angle error and shift distance error on surface measurement result

4 结 论

本文提出了一种基于旋转平移与 SIFT 特征匹配的两平面面形检测方法,该方法只需常规测量后对被测件进行未知角度的旋转,在旋转后的基础上直接进行未知距离的横向平移。首先通过 SIFT 特征匹配计算出被测件的实际旋转角度及平移量,其次通过迭代算法和拟合 Zernike 多项式恢复被测镜面形,并对旋转测量中损失的 $m\theta = (2k\pi/\theta_0)\theta$ 角度项进行了补偿,实现了被测镜的面形重构。实验结果表明,与现有的绝对检测方法相比,该方法在保证被测镜检测精度的同时,免去了高精度姿态控制要求及反复调整过程,测量步骤简单连贯,缩短了测量时间,提高了测量效率,为光学元件的高精度检测提供了一种新的技术途径。

参考文献

[1] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement of planeness [J]. Applied Optics, 1967, 6(6): 1077-1084.
[2] FRITZ B S. Absolute calibration of an optical flat [J].

Proceedings of SPIE, 1984, 23(4): 379-383.

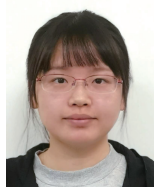
- [3] 高飞,李晋惠,田爱玲,等.基于 Zernike 多项式拟合三平面互检的误差分析[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 187-194.
GAO F, LI J H, TIAN A L, et al. Error Margin Analysis of Three-flat Test Based on Zernike Polynomials Fitting [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 187-194.
[4] LYU H Y, HUANG Y S, et al. Absolute optical flatness testing by surface shape reconstruction using Zernike polynomials [J]. Optical Engineering, 2018, 57(9): 094103.
[5] VANNONI M, MOLESINI G. Iterative algorithm for three flat test[J]. Optics Express, 2007, 15(11): 6809-6816.
[6] HE Y, GAO B, XU K, et al. Iterative algorithm for absolute planarity calibration in three-flat test[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27669-27674.
[7] AI C, WYANT J C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd functions[J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 1992 (1776): 73-83.
[8] FREISCHLAD K R. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear[J]. Applied Optics, 2001, 40(10): 1637-1648.
[9] VANNONI, MAURIZIO. Absolute flatness measurement using oblique incidence setup and an iterative algorithm A demonstration on synthetic data [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3538-3546.
[10] LIU S, ZHOU Y, SHAO J, et al. Absolute surface form measurement of large flat optics based on oblique incidence method [C]. Proceedings of SPIE, 2017: 104481J.
[11] 韩志刚,陈磊,高波,等.基于斜入射的平面度绝对检验方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 708-712.
HAN ZH G, CHEN L, GAO B, et al. Absolute flatness measurement method based on oblique incidence testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 708-712.
[12] 孟诗,刘世杰,陈磊,等.光学面形绝对测量方法仿真和实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 222-230.
MENG SH, LIU SH J, CHEN L, et al. Simulation and Experimental Study of Absolute Measurement Method for Optical Surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 222-230.
[13] MENG L Q, HAN Z G, SHAN X Q. Theoretical and experimental studies of the decorrelation residuals of the matrix-analysis three flat test [J]. Optical Engineering,

- 2018, 57(7):074108.
- [14] KEENAN P B. Pseudo-Shear Interferometry [C]. Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 1983:936333.
- [15] FUJIMOTO I, TAKATSUJI T, NISHIMURA K, et al. Autonomous calibration method of the reference flat surface of an interferometer without using a standard flat surface[J]. Applied Optics, 2012, 51(20):4754-4767.
- [16] SU D, MIAO E, SUI Y, et al. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials[J]. Optics Letters, 2012, 37(15):3198-3200.
- [17] SONG W, WU F, HOU X, et al. Optimized absolute testing method of shift-rotation [J]. Applied Optics, 2013, 52(28):7028-7032.
- [18] 高波,李强,刘昂,等. 基于迭代算法的两平板互检求解方法[J]. 光学学报,2014,34(12):129-134.
GAO B, LI Q, LIU A, et al. Two-flat test solution based on iterative algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12):129-134.
- [19] HE Y, LI Q, WAN D, et al. New reconstruction algorithm for absolute shape calibration in two-flat test [C]. Proceedings of SPIE, 2016:96842N.
- [20] DU J Y, YANG Z M, LIU Z J, et al. Three-step shift-rotation absolute measurement of optical surface figure with irregular shaped aperture [J]. Optics Communications, 2018(426):589-597.
- [21] KEWEI E, LI D, ZHANG C, et al. Four-step shear method for the absolute measurement of a flat surface based on phase measuring deflectometry [J]. Applied Optics, 2016, 55(30):8419-8425.
- [22] ZHAI D, CHEN S, PENG X, et al. Absolute flat test using rotated and multi-shifted maps with relative tilt

measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019(114):121-128.

- [23] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [24] HOU X, YANG P, WU F, et al. Comparative experimental study on absolute measurement of spherical surface with two-sphere method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7):833-840.

作者简介



张培洁, 2017 年于北京理工大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为精密光学检测。

E-mail: zpjlyc@126.com

Zhang Peijie received her B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2017.

She is currently a M. Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. Her main research interest is precise optical test technique.



邱丽荣(通信作者), 分别在 1997 年和 2000 年在西安交通大学获学士学位和硕士学位, 2005 年于哈尔滨工业大获博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为差动共焦检测方法和精密光电测试技术。

E-mail: qiugrass@126.com

Qiu Lirong (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 1997 and 2000, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005, respectively. She is currently a professor at Beijing Institute of Technology. Her main research interests include differential confocal testing method and precision photoelectric testing technology.