

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209220

基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法

许 斌, 徐凡颖, 辛若铭
(四川大学机械工程学院 成都 610044)

摘 要:石英摆片是石英挠性加速度计的核心器件,其关键特征尺寸的加工精度由摆片基片加工精度决定。常规使用工具显微镜对基片表面特征尺寸进行测量,此测量过程复杂、重复性精度弱且效率低。提出了基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸测量方法。首先对视觉测量系统硬件结构进行了设计研制,然后建立了基于区域灰度梯度的摆片基片边缘检测算法,其次围绕摆片基片结构特点提出了其特征边缘点的搜索分类方法,最后开展了摆片基片特征尺寸测量实验。实验结果表明,提出边缘检测方法在摆片基片圆心拟合偏差小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下可替代 Zernike 矩方法以提高边缘检测效率;所研测量系统 2 s 内即可完成摆片基片特征尺寸测量且不同位姿下的摆片基片特征尺寸测量重复性精度优于 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。相较于工具显微镜,测量结果可靠性及重复性均有所改善,测量效率显著提升。

关键词: 摆片基片;边缘检测;特征搜索;视觉测量

中图分类号: TP391.4 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

A visual measurement method for feature size of pendulum substrate based on regional gray gradient difference

Xu Bin, Xu Fanying, Xin Ruoming

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610044, China)

Abstract: Quartz pendulum reed is the core device of the quartz flexible accelerometer, and the machining accuracy of its key feature size is determined by the machining accuracy of the pendulum substrate. The feature size of the substrate surface is routinely measured with a tool microscope. This measurement process is complex, with poor repeatability and low efficiency. In this article, a method for measuring the feature size of the pendulum substrate based on the regional gray gradient difference is proposed. Firstly, the hardware structure of the visual measurement system is designed and developed. Secondly, the edge detection algorithm of the pendulum substrate based on the regional grayscale gradient is established. Thirdly, the search and classification method of the feature edge points is proposed around the structural characteristics of the pendulum substrate. Finally, the feature size measurement experiment of the pendulum substrate is carried out. Experimental results show that the proposed edge detection method based on regional gray gradient can replace the Zernike moment method to improve the edge detection efficiency when the fitting deviation of the center of the pendulum substrate is less than $3\text{ }\mu\text{m}$. The measurement system can complete the measurement of the characteristic size of the pendulum substrate within 2 s , and the repeatability of the measurement of the characteristic size of the pendulum substrate in different postures is better than $8\text{ }\mu\text{m}$. Compared with the tool microscope, the reliability and repeatability of the measurement results are improved, and the measurement efficiency is significantly improved.

Keywords: quartz pendulous reeds substrate; edge detection; feature recognition; visual measurement

0 引 言

石英挠性加速度计因其具有体积小、灵敏度高、长期稳定性好等优点,在航空航天、测绘和交通等领域具有广泛用途^[1-2],尤其在惯性导航以及惯性制导领域应用更加普遍,目前常规导弹的制导系统多采用石英挠性加速度计作为其惯性测量传感器^[3]。石英挠性加速度计的敏感元件是石英摆片,它将所受外力转化为自身挠性梁的挠度变化,进而实现加速度的测量。石英摆片加工过程中,采用化学刻蚀、镀膜^[4-6]等工艺对摆片基片进行处理完成挠性桥及凸台的加工。加工过程中摆片基片表面特征尺寸的几何精度,直接决定了石英摆片特征尺寸的精度,进而影响到加速度计的测量精度和灵敏度等重要性能指标。对摆片基片特征尺寸进行精密检测,是保障石英摆片加工精度、提升挠性加速度计工作性能的重要工具。

摆片基片特征尺寸的测量方式仍以传统测量方式为主,采用卡尺和工具显微镜等测量工具进行测量^[7-9]。卡尺接触式测量易划伤摆片表面,造成边缘破损。工具显微镜非接触式测量不会损坏摆片,但测量效率低且测量重复性差。目前对摆片基片特征尺寸快速精密检测方法的研究较少。部分学者对石英摆片特征几何量的视觉测量方法进行了研究。李晶^[10]将 Zernike 矩亚像素边缘检测方法用于摆片边缘检测,然后对摆片半径进行测量,测量重复性达到 6 μm ,取得不错效果;田春苗^[11]提出基于 Sobel-Zernike 矩的石英摆片外形参数测量方法,用 Sobel 算子处理后再用 Zernike 矩计算得出摆片亚像素边缘位置,然后对摆片圆心位置和半径进行测量,该方法矩计算量有所降低,但圆心定位误差偏高,横坐标定位误差 73.8 μm ,纵坐标定位误差 70.4 μm ;佟庆彬^[12]等将形态学操作与改进的 Zernike 矩方法结合实现摆片亚像素级边缘位置检测,完成摆片参数测量,圆心定位不确定度达到 2.409 μm ,但该方法采用 4 个结构元对图像进行 4 次腐蚀膨胀操作,然后才进行 Zernike 矩运算,过程繁琐且只测量了摆片圆心和半径 2 个参数,测量参数少。由于摆片基片成像特性与石英摆片类似,上述石英摆片特征尺寸视觉测量方法的研究为摆片基片特征尺寸视觉测量方法的研究提供了借鉴意义。但采用 Zernike 矩亚像素边缘检测算法对摆片基片边缘进行提取,虽然可达到亚像素级边缘检测结果,但检测过程复杂^[13-17]。对此本文提出一套基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法,对摆片基片 5 个特征尺寸进行测量,测量过程高效可靠。

本文首先对所测特征尺寸以及研制的视觉测量系统进行介绍,然后对摆片基片的边缘检测算法进行研究,建立了基于区域灰度梯度差异的摆片基片边缘检测算法,

紧接着围绕摆片基片结构特点,设计了摆片基片不同特征区域边缘点的识别分类方法及特征尺寸测量方法,最后开展了摆片基片特征尺寸测量实验。

1 测量参数与测量系统

摆片基片如图 1 所示,其特征尺寸主要包括特征窗口高度 A 、宽度 B 、摆片圆心到特征窗口下框线距离(简称框心距) C 、摆片外圆半径 R 以及圆心 O 位置。

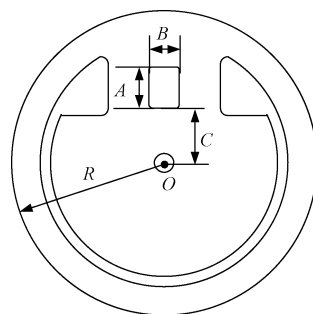


图 1 摆片基片特征尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feature size

测量系统主要由位姿调节机构和视觉检测单元组成。将摆片基片放置于安装在三维 $XY-Z$ 向位移机构的载物台上,视觉检测单元采集摆片基片图像,然后利用本文方法对图像进行处理得到各特征尺寸测量结果。由于摆片基片制作材料为石英玻璃,高透明高反光,测量系统以蓝色同轴光作为光源能够保证采集到高对比度的摆片基片图像。视觉检测单元所用 CMOS 图像传感器分辨率为 5 496×3 672,像元大小 2.4 μm 。

2 区域灰度梯度差异边缘检测

摆片基片图像中,边缘包含了关键信息,对其进行检测是后续特征尺寸测量的基础。对测量系统获取的摆片基片图像,提出基于区域灰度梯度差异的边缘检测方法并构建了数学模型。

图 2 为摆片基片图像,边缘作为摆片基片与背景分界,一侧区域属于物体,另一侧区域属于背景,两区域灰度均值差值在 140 以上,具有较大的区域灰度梯度。根据这一特点设计了摆片基片的边缘检测方法。

从区域特征来看,边缘点两侧区域灰度存在跃变。图像中的边缘点,设其水平方向区域灰度梯度为 G_x ,竖直方向区域灰度梯度为 G_y 。以两者的较大值表征该点的区域灰度梯度 G ,阈值 T_c 描述跃变程度。则有如下条件成立:

$$G(x, y) = \max(G_x, G_y) \quad (1)$$

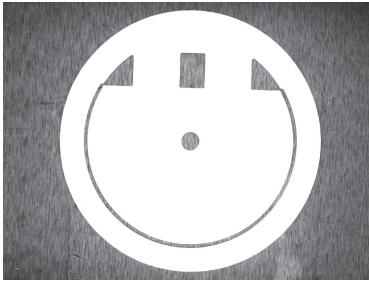


图 2 摆片基片图像

Fig. 2 Image of pendulum substrate

$$f(x,y) = \begin{cases} 1, & G(x,y) > T_c \\ 0, & G(x,y) \leq T_c \end{cases} \quad (2)$$

依据式(1)与(2),对图像中每个像素点,计算其左侧 15 个像素灰度均值与右侧 15 个像素灰度均值的差值绝对值 G_x ,表征其水平方向上的区域灰度差异。同理计算其上方 15 个像素灰度均值与下方 15 个像素灰度均值的差值绝对值 G_y ,表征其竖直方向上的区域灰度差异,取两者较大值作为该点区域灰度梯度 G ,保留 G 值大于设置阈值 T_c 的点。

从像素特征来看,边缘两侧像素灰度值存在跃变。对于图像中边缘点,设其左右两像素灰度差值绝对值 g_x ,上下两像素灰度差值绝对值 g_y 。以两者中的较大值表征该点灰度跃变程度 g ,阈值 T_g 描述边缘两侧灰度跃变程度。有如下条件成立:

$$g(x,y) = \max(g_x, g_y) \quad (3)$$

$$F(x,y) = \begin{cases} 1, & g(x,y) > T_g \\ 0, & g(x,y) \leq T_g \end{cases} \quad (4)$$

对经过式(1)、(2)筛选后保留的点,计算其左右两像素灰度差值绝对值 g_x ,上下两像素灰度差值绝对值 g_y ,取两者中的较大值表征该点灰度跃变程度 g ,保留 g 值大于设定阈值 T_g 的点。

3 特征搜索与特征尺寸测量模型

得到摆片基片边缘检测结果之后,对不同区域的边缘点进行分类以实现其相关联的尺寸测量。围绕摆片基片的结构特点以及各特征尺寸的名义尺寸,开发了摆片基片特征窗口各条框线边缘点的搜索方法,并依据搜索结果设计了特征尺寸测量模型。

3.1 特征窗口下框线边缘点搜索

如图 3 所示,下框线边缘点到圆心 O 距离 s 介于 d_1 与 d_2 之间,搜索到圆心 O 距离 s 满足上述条件的边缘点,即可得到下框线边缘点,用于与特征窗口下框线相关的特征尺寸测量。参数 d_1 与 d_2 围绕框心距 C 的加工尺寸设计得到。

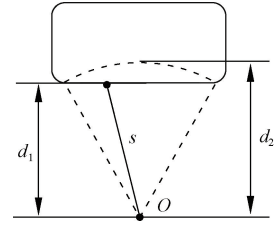


图 3 下框线边缘点搜索

Fig. 3 Recognition principle of bottom line

3.2 特征窗口上框线边缘点搜索

如图 4 所示,对下框线边缘点直线拟合可得到表征下框线的直线 l_1 ,计算过圆心 O 且与 l_1 垂直的辅助直线 L 直线方程,寻找 L 上到 l_1 距离为 d_3 的一点 P_1 , P_1 点位于上框线附近,搜索点 P_1 附近一段距离内的边缘点,即可得到上框线边缘点用于上框线相关的特征尺寸测量。参数 d_3 围绕窗高 A 的加工尺寸设计得到。

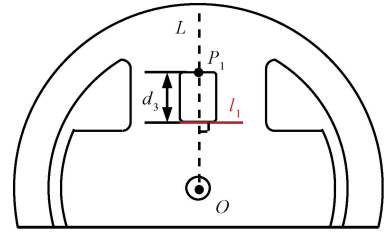


图 4 上框线边缘点搜索

Fig. 4 Recognition principle of top line

3.3 特征窗口左右框线边缘点搜索

如图 5 所示,上框线边缘点直线拟合得到表征上框线的直线 l_2 ,计算与直线 l_1, l_2 平行且到 l_1, l_2 距离相等的辅助直线 L_1 直线方程,直线 L_1 上存在两点 P_2 和 P_3 到辅助直线 L 的距离为 $d_4/2$,图 5 中 P_3 点位于左框线附近,其周围一段距离内的边缘点属于左框线, P_2 点位于右框线附近,其周围一段距离内的边缘点属于右框线,两部分边缘点可分别用于与特征窗口左右框线相关的特征尺寸测量。参数 d_4 围绕窗宽 B 的加工尺寸设计得到。

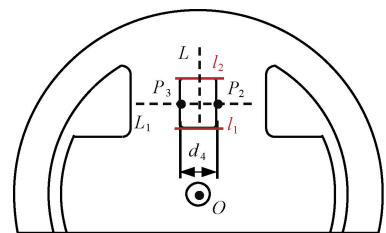


图 5 左右框线边缘点搜索

Fig. 5 Recognition principle of left line and right line

3.4 特征尺寸测量模型

摆片圆心 O 及半径 R 通过对外圆边缘点最小二乘圆拟合得到;参数 C 通过计算圆心与下框线直线 l_1 距离得到;参数 A 与参数 B 计算过程类似,以参数 A 计算过程为例,各框线表征直线如图 6 所示,参数 A 表征上下框线即直线 l_1 和 l_2 的距离,直接拟合得到的 l_1 和 l_2 为两条非平行直线,无法直接计算距离。

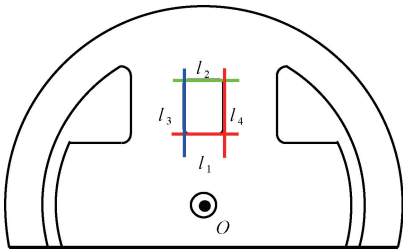


图 6 各框线表征直线

Fig. 6 Characteristic line of each frame line

本文采取确定基准直线的方式测量,首先确定两条直线中的一条作为基准直线,以基准直线斜率代替另一直线斜率然后对其重新拟合得到新直线,新直线与基准直线构成一组平行线对,此时便可计算两者距离。确定基准直线的依据是上下框线边缘点集横纵坐标之间的相关系数 r ,将相关系数 r 较大的点集拟合所得直线确定为基准直线,相关系数 r 计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

4 实验论证

用 Zernike 矩方法与文章提出的边缘检测算法进行对比,验证所提边缘检测算法的有效性。同时基于所研视觉测量系统开展了摆片基片特征尺寸测量实验,并将测量结果与万能工具显微镜、千分尺测量结果进行比较。

4.1 测量系统校准

系统校准主要涉及测量系统单像素尺度的校准,利用 0 级标准量块完成。所用量块实物图及拍摄的量块图片如图 7 所示。

校准之前需要对量块和摆片基片两者厚度差异进行补偿,保证量块标定时成像面与摆片实际成像面一致。首先利用千分尺测得两者的厚度差异,然后利用 Z 向位移机构移动进行补偿,使两者成像面高度一致。

对于测量系统拍摄的量块图片,提取其两个测量面所在位置处的边缘点并对其进行直线拟合,得到两测量面表征直线,如图 8(b)中直线 1 与直线 2,计算两直线之间的像素距离 d 。所用量块两测量面实物空间中的距离

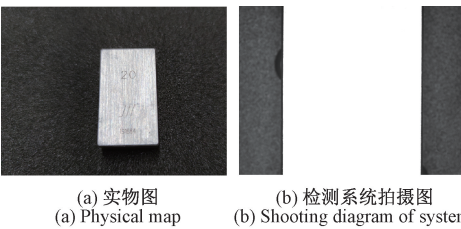


图 7 量块

Fig. 7 Gauge block

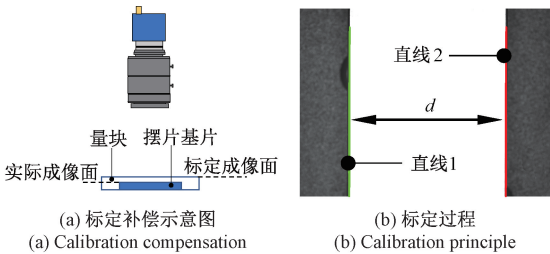


图 8 尺度校准过程

Fig. 8 Process of scale calibration

为 20 mm,计算两者之间的比值得到测量系统的单像素尺度,为 $7.797 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

4.2 边缘检测算法可靠性

随机选 4 张摆片图片,用本文边缘检测方法处理后拟合圆心坐标;同时用 3 个 7×7 大小的 Zernike 矩模板对其进行亚像素边缘检测后重新拟合圆心,比较两种检测方法圆心拟合结果的差异以及耗时,两种方法拟合结果如表 1 所示。

表 1 两种方法圆心拟合结果

Table 1 Center fitting results of two methods

图片编号	检测方法	横坐标 x/pixel	纵坐标 y/pixel	耗时/s
1	Zernike 矩方法	2 102.262	1 512.183	2.13
	本文算法	2 102.281	1 512.486	1.48
2	Zernike 矩方法	2 083.659	1 506.609	2.14
	本文算法	2 083.330	1 506.576	1.54
3	Zernike 矩方法	2 044.778	1 505.150	1.85
	本文算法	2 045.032	1 504.847	1.42
4	Zernike 矩方法	2 054.956	1 532.049	2.16
	本文算法	2 055.182	1 531.956	1.26

分析表 1 数据,两种方法拟合结果接近,横坐标最大差距 $2.565 \mu\text{m}$,纵坐标最大差距 $2.362 \mu\text{m}$ 。算法耗时方面,本文方法所花时间小于 Zernike 矩方法,检测效率提升约 $1/3$ 。

4.3 特征尺寸测量实验

对一摆片基片首先用所研制测量系统测量其初始位姿下的各特征尺寸,然后顺时针方向每次旋转约45°后再次测量,直到旋转完一周。得到摆片基片特征尺寸的

8组测量数据如图9所示。同一摆片基片置于不同位姿下用万工显测量其特征尺寸,测量数据如图10。所用万工显(新天,JX13VS)物镜放大倍率1×,测量分辨率0.1 μm。两种测量方式测量结果和测量重复性如表2所示。

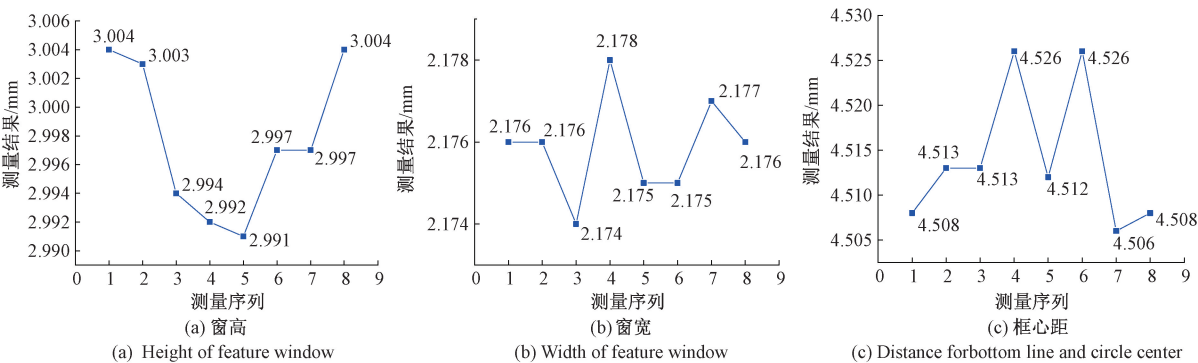


图9 研制测量系统测量数据

Fig. 9 Measured data of the developed measurement system

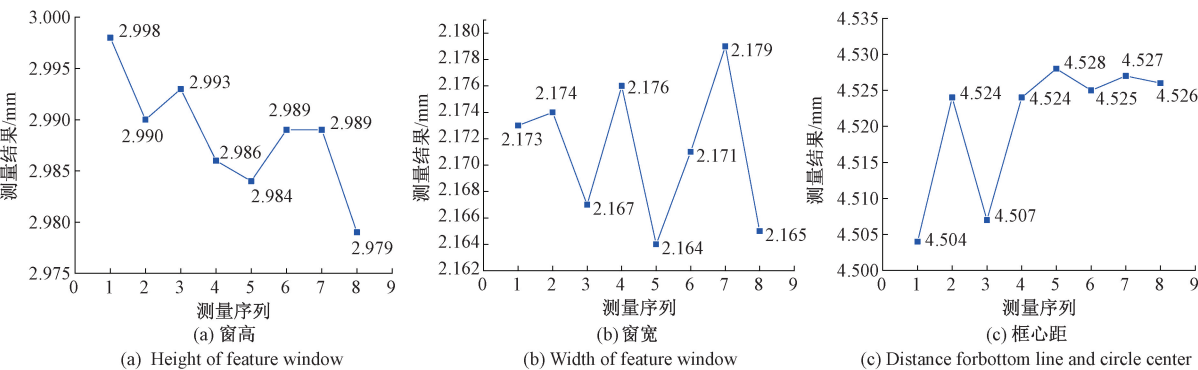


图10 万能工具显微镜测量数据

Fig. 10 Measured data of universal tool microscope

表 2 两种测量方式测量结果

Table 2 Measurement results of two methods

测量参数	测量方式	测量均值/mm	测量重复性/μm
窗高 A	万能工具显微镜	2.988	5.732
	研制测量系统	2.998	5.339
窗宽 B	万能工具显微镜	2.171	5.384
	研制测量系统	2.176	1.246
框心距 C	万能工具显微镜	4.521	9.471
	研制测量系统	4.514	7.838

由表2中数据可知,两种方法测量结果接近,窗高A测量结果差异为10 μm,窗宽B测量结果差异为5 μm,框心距C测量结果差异为7 μm。测量重复性方面,所研测量系统测量重复性相对于万工显有所改善,各参数测量重复性均优于万工显。此外测量效率方面,万工显单次

特征尺寸测量过程所花时间约为5 min,研制测量系统所花时间不超过2 s,测量效率显著提升。

万工显测量过程需手动选择边缘点计算得到测量结果,测量结果的可靠性受选点过程及选点数量影响。所研制测量系统自动识别测量点完成各参数测量,相比之下测量结果更加可靠。为验证以上结论,引入第3种测量方法对摆片基片部分参数进行高精度测量,以其测量结果为基准并比较两种测量方式测量误差大小。

用高精度千分尺对摆片基片直径进行测量,将其测量结果作为摆片基片直径基准,比较所研测量系统与万工显测量误差的大小。千分尺按图11夹持方式对摆片基片直径测量8次,取均值作为测量结果。将所研制测量系统测量结果和万工显测量结果与其进行比较,3种方式测量数据如图12所示,测量结果如表3所示。所用千分尺(Mitutoyo, MDC-25PX)标称测量精度±1 μm。

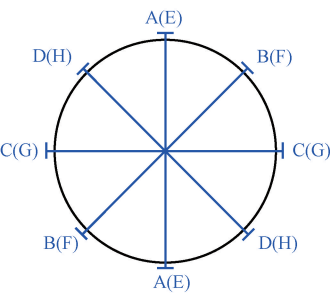


图 11 千分尺测量夹持位置
Fig. 11 Clamping position of micrometer

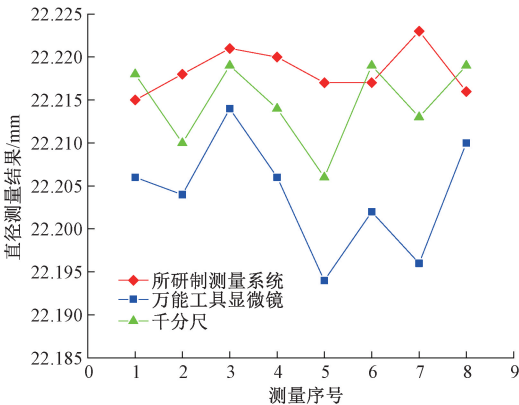


图 12 3 种测量方式测量数据
Fig. 12 Measured data of three methods

表 3 3 种方法测量结果

测量方式	测量结果/mm
研制测量系统	22.218
万能工具显微镜	22.204
千分尺	22.214

分析表 3 中数据,所研制测量系统基片直径测量误差为 4 μm ,万工显测量误差为 10 μm ,所研制测量系统直径测量精度优于万工显,验证了该测量系统测量结果可靠性。

4.4 误差因素分析

对测量过程中引入测量误差的因素进行分析,主要包括边缘检测精度造成的误差以及单像素尺度标定的误差。

1) 边缘检测结果误差

边缘检测结果会受到设定的边缘检测阈值影响,造成测量数据源不准确,导致特征尺寸测量结果存在误差,文章对此进行了实验分析。对一张摆片基片图像设置不同的区域灰度梯度阈值,比较不同阈值下特征尺寸测量结果差异,如表 4 所示。

表 4 不同阈值下特征尺寸测量结果

阈值	A/mm	B/mm	C/mm	R/mm
150	2.997	2.175	4.508	11.108
145	2.997	2.175	4.509	11.108
140	2.996	2.173	4.511	11.108
135	2.996	2.173	4.512	11.108
130	2.994	2.171	4.513	11.110
125	2.992	2.171	4.513	11.110
120	2.990	2.170	4.514	11.112

分析表 4 中数据,不同边缘检测阈值下带来的窗高 A 测量结果标准偏差为 2.7 μm ,窗宽 B 测量结果标准偏差 1.9 μm ,框心距 C 测量结果标准偏差为 2.2 μm ,摆片基片直径测量结果标准偏差为 1.6 μm 。

2) 单像素尺度标定误差

系统校准环节仅拍摄单张量块图片对单像素尺度进行标定,存在量块测量面位置边缘点提取不准确及其它随机误差导致标定结果不准的问题。考虑引入标定板对单像素尺度重新进行校准,提取圆形标志点圆心作为参考点,以多点对点进行单像素尺度校准。拍摄 3 张标定板图像,如图 13 所示。以左上角圆的圆心作为基准点,每张图片分别以点对 1~2、1~3、1~4 对单像素尺度进行校准然后取均值作为每张图片的校准结果,以 3 张图片校准结果均值作为最终校准结果。校准数据如表 5 所示。

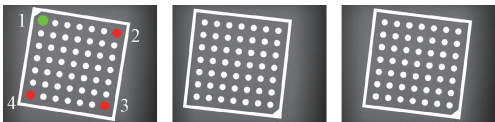


图 13 拍摄标定板图像
Fig. 13 Images of calibration board

表 5 标定板标定数据

编号	Calibration data of calibration board			
	res_{12}	res_{13}	res_{14}	$\mu\text{m}/\text{pixel}$
1	7.800	7.790	7.798	7.796
2	7.798	7.790	7.796	7.795
3	7.798	7.790	7.797	7.795
均值	-	-	-	7.795

摆片基片特征尺寸测量过程中,基片直径测量结果受单像素尺度标定误差的影响最大,比较单像素尺度修正前后摆片基片直径测量结果差异,如图 14 所示。

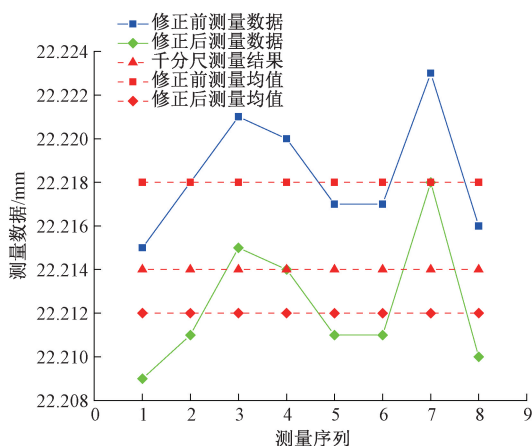


图14 修正前后直径测量结果

Fig. 14 Measurement results before and after correction

图14中可以看出,修正后的测量数据与千分尺测量结果更加接近,测量精度得到进一步提高。利用标定板进行校准能够有效提高校准精度。

5 结 论

本文提出基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法并根据该方法研制了测量系统,解决了现有摆片基片特征尺寸测量过程复杂、重复性精度弱以及效率低等问题。提出的摆片基片特征搜索方法能够为摆片基片化学刻蚀前与氟硅红膜的自动化贴合提供技术支持。建立的基于区域灰度梯度边缘检测方法,边缘检测效率相对于Zernike矩方法有所提升。文章也存在不足之处,边缘检测阈值需要随着外界光照条件变化做出相应调整,后续将对阈值的自适应设定方法进行研究。

参考文献

- [1] 何巍. 提高石英挠性摆式加速度计可靠性的技术途径[J]. 导弹与航天运载技术, 1998(6): 40-46.
HE W. Technical approach to improve the reliability of quartz flexible pendulum accelerometer[J]. Missiles and Space Vehicles, 1998(6): 40-46.
- [2] 焦晨阳, 王新龙, 王盾, 等. 一种石英挠性摆式加速度计随机振动误差建模方法[J]. 航空兵器, 2017(5): 48-53.
JIAO CH Y, WANG X L, WANG D, et al. A random vibration error modeling method for quartz flexible pendulum accelerometer[J]. Aero Weaponry, 2017(5): 48-53.
- [3] 夏剑平, 余志勇. 摆式石英加速度计传导抗扰度分析与试验[J]. 弹箭与制导学报, 2008(3): 89-90.
XIA J P, YU ZH Y. Analysis and experiment on conducted immunity of pendulum quartz

accelerometer[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008(3): 89-90.

- [4] 周岩, 刘晓胜, 杨乐民, 等. 石英器件加工工艺及最新进展[J]. 中国机械工程, 2000(6): 77-80, 7.
ZHOU Y, LIU X Y, YANG L M, et al. Quartz device processing technology and latest progress [J]. China Mechanical Engineering, 2000(6): 77-80, 7.
- [5] 谭定忠, 王启明, 曹日起, 等. 用于传感器的石英材料制造工艺研究[J]. 机械工程师, 2005(12): 58-59.
TAN D ZH, WANG Q M, CAO R Q, et al. Research on the manufacturing process of quartz materials for sensors[J]. Mechanical Engineer, 2005(12): 58-59.
- [6] 郑直. HF酸刻蚀熔石英材料研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
ZHENG ZH. Research on HF acid etching fused silica materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [7] 佟庆彬, 丁振良, 王艳, 等. 基于视觉图像的石英摆片参数精密测量方法[J]. 光电子. 激光, 2008, 19(4): 521-524.
TONG Q B, DING ZH L, WANG Y, et al. Precise measurement of quartz pendulum parameters based on visual image [J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2008, 19(4): 521-524.
- [8] 佟庆彬, 张晓冬, 丁振良, 等. 基于激光视觉的石英摆片厚度精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1358-1363.
TONG Q B, ZHANG X D, DING ZH L, et al. Accurate measurement method for the thickness of quartz pendulous reed based laser vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(6): 1358-1363.
- [9] 袁峰, 施平, 蒋祖军, 等. 石英摆片综合参数测试系统[J]. 哈尔滨科学技术大学学报, 1994, 18(3): 26-28.
YUAN F, SHI P, JIANG Z J, et al. Comprehensive parameter test system of quartz pendulum[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 1994, 18(3): 26-28.
- [10] 李晶. 基于视觉测量的石英摆片几何尺寸测量方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LI J. Research on the measurement method of quartz pendulous reed geometric size based on vision measurement[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2007.
- [11] 田春苗. 石英摆片外形参数测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
TIAN CH M. Study on shape parameters measuring technology of quartz pendulous reed[D]. Harbin: Harbin

- Industrial University, 2015.
- [12] 佟庆彬, 王立新, 丁振良, 等. 基于变结构元与参数映射的石英摆片参数测量[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(4): 395-400.
- TONG Q B, WANG L X, DING ZH L, et al. Measurement of the vibration of a quartz pendulous reed based on multiple structuring elements and parameter mapping[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(4): 395-400.
- [13] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [14] 王珏, 伍立芬, 邹永宁, 等. Zernike 矩边缘检测与多项式拟合的 CT 图像三维测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 442-449.
- WANG J, WU L F, ZOU Y N, et al. 3D measurement algorithm of CT images based on Zernike moment edge detection and polynomial fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 442-449.
- [15] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. 自动化学报, 2008(9): 1163-1168.
- GAO SH Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on zernike orthogonal moments[J]. Acta Automatica Sinica, 2008(9): 1163-1168.
- [16] 刘悦, 朱均超. 基于改进 Zernike 矩的光斑图像亚像素边缘检测算法[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 32-35.
- LIU Y, ZHU J CH. Subpixel edge detection algorithm of spot image based on improved Zernike moment[J]. Laser Journal, 2021, 42(5): 32-35.

- [17] 魏本征, 赵志敏, 华晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 838-844.

WEI B ZH, ZHAO ZH M, HUA J. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 838-844.

作者简介



许斌, 2006 年于重庆大学获得学士学位, 2009 年于重庆大学获得硕士学位, 2013 年于日本东北大学获得博士学位, 现为四川大学教授, 主要研究方向为精密测量与测试。

E-mail: bin_xu@outlook.com

Xu Bin received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Chongqing University in 2006 and 2009, respectively. He received his Ph.D. degree from Tohoku University in 2013. He is currently a professor at Sichuan University. His main research interests include precision measurement and testing.



徐凡颖(通信作者), 2019 年于四川大学获得学士学位, 现为四川大学硕士研究生, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail: 2418980796@qq.com

Xu Fanyang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Sichuan University in 2019. He is currently a master student at Sichuan University. His main research interests include testing and measuring technology and instrument.