

# 基于机器视觉的光学镜片测量方法\*

刘智慧 张承瑞 李瑞珍  
(山东大学机械工程学院 济南 250061)

**摘要:** 光学镜片的种类多,每种镜片上待测目标也比较多,现有的图像处理方法测量精度低,对多类型工件适应性差。针对上述问题,现提出基于机器视觉的光学镜片测量方法。首先基于改进的 Harris 角点检测对工件进行角点定位,其次采用最小二乘法分段拟合角点间的几何基元,最后根据每一类待测目标模板提取的尺寸索引信息,测量几何基元之间的尺寸。实验结果表明,该方法不仅可以针对多种工件,对具有毛刺边缘工件也可以做到高精度测量,通过对比本文测量与基恩士三维测量仪测量的偏差进行分析、计算均方差,得到方法的精度为 $\pm 0.02$  mm,重复测量偏差的均方差在 0.01 mm 以内。

**关键词:** 光学镜片;角点检测;最小二乘法拟合;拉依达准则

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Measuring method of optical lens size based on machine vision

Liu Zhihui Zhang Chengrui Li Ruizhen  
(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** There are many types of optical lenses, and there are many objects to be tested on each type of lens. Traditional image processing methods have low measurement accuracy and poor adaptability to multiple types of workpieces. In response to the above problems, an optical lens measurement method based on machine vision is now proposed. Firstly, the corner points of the workpiece are located based on the improved Harris corner point detection. Secondly, the geometric primitives between the corner points are fitted by the least square method. Finally, the index information of the template size of each type of target is extracted, and the geometric basis is measured. The size between yuan. The experimental results show that this method can not only target a variety of workpieces, but also can perform high-precision measurement on workpieces with burr edges. By comparing the deviation of the measurement in this paper with that of the Keyence three-dimensional measuring instrument, the paper is obtained by analyzing the deviation and calculating the mean square error. The accuracy of the method is  $\pm 0.02$  mm, and the mean square error of the repeated measurement deviation is within 0.01 mm.

**Keywords:** optical lens; corner detection; least square fit; Paūta criterion

## 0 引言

目前我国光学镜片制造业已经进入个性化定制和大规模生产的新阶段。各个工件产品均要求进行尺寸测量判断是否满足加工要求。各加工工厂对各类产品的尺寸测量精度、检测效率以及自动化程度要求越来越高,而传统的接触式尺寸测量方法一直存在局限性<sup>[1]</sup>。高效、精确测量光学镜片尺寸,对逐步实现光学镜片制造业的自动化具有重要的意义。

近年来,机器视觉技术的快速发展逐渐成为测量领域中重要发展的一个分支<sup>[2-4]</sup>,图像中待测对象提取和准确定

位是视觉测量的关键技术<sup>[5]</sup>。段振云等<sup>[6]</sup>利用曲面插值求取像素级法截线上离散的点的灰度值,再进行高斯曲线拟合实现亚像素的精定位,可靠性高、计算速度快,但测量对象以单边阶跃状边缘为主;徐平等<sup>[7]</sup>利用物体边缘投影将感光单元划分 2 个部分,利用矩阵建模求亚像素准确位置,但其对多目标测量适应性太差;谢俊等<sup>[8]</sup>采用 Canny 算子的边缘检测去除噪声,但主要用于孔类零件;谢珩等<sup>[9]</sup>基于 LabVIEW 的编程原理及思想编写了一套五金尺寸测量系统,但是测量目标主要以圆孔为主。

结合上述问题和处理方法,本文提出了一种基于机器

收稿日期:2021-09-19

\* 基金项目:轮胎帖生产线智能管理与控制系统开发及应用示范项目(2019JZZY020121)资助

视觉的镜片测量方法。采用最小二乘法将角点间的像素拟合直线和圆弧,根据预先保存的标准尺寸组模板,实现不同类型镜片的测量。该方法测量效率高,适应性强、鲁棒性强,可满足工厂实际的测量需求。

## 1 测量方法

光学镜片尺寸测量流程如图 1 所示。测量开始前通过 CAD 导入或人为选取的方法,获得待测工件的所需测量尺寸,以索引号的形式保存至数据库中,测量时将待测目标分割成不同的几何基元,最后查询数据库的模板索引号,实现同批次工件全部尺寸自动测量。

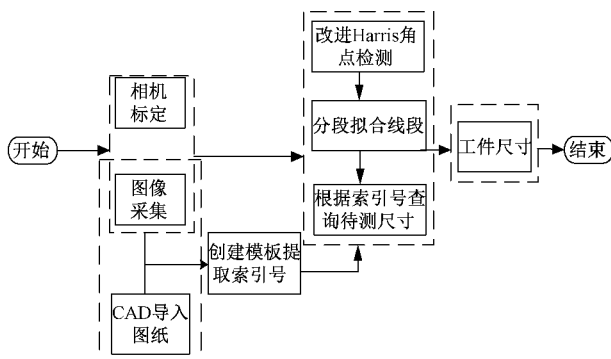


图 1 尺寸测量方法流程

### 1.1 改进的 Harris 角点检测

工件测量的前提是精确分割轮廓的几何基元,角点作为分割轮廓的关键特征,具有边缘变换不连续,一阶导数局部最大等特点。Harris 角点检测算法由 Harris 等于 1988 年提出,Harris 角点检测用一阶梯度描述灰度值变化,依据灰度变换进行角点识别<sup>[10]</sup>。这种方法对于图像灰度仿射变换具有不变性,因此镜片边缘的反光光影对角点提取精度影响不大。但是此方法鲁棒性差,角点定位不准确,直接使用 Harris 角点检测出的结果如图 2(b)所示。角点检测的算法精度和运算速度严重依赖平移窗口的大小,窗口大检测精度高运行速度慢。针对上述情况,结合多边形逼近与 Harris 角点检测提高角点检测的鲁棒性,改进角点的判定条件提高程序运行速度,改进算法的测量结果如图 2(a)所示。

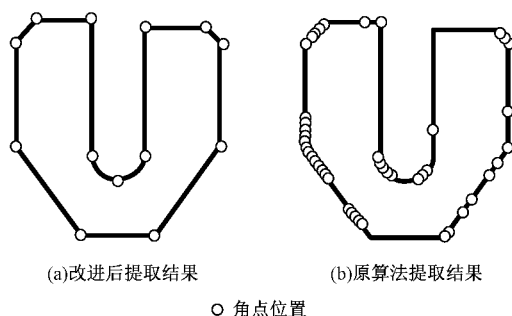


图 2 角点提取结果

角点检测前由于光照不均匀,采用经典的拉普拉斯锐化,对图像进行增强处理,原图像参数化表示为  $f(x, y)$ ,输出图像参数化表示为  $g(x, y)$ ,锐化公式如式(1)所示。

$$g(x, y) = f(x, y) + c[\nabla^2 f(x, y)] \quad (1)$$

比例因子  $c$  越大,对比度越大,图像轮廓与真实轮廓差距越大。

基于 Harris 镜片角点检测的改进算法步骤如下。

1) 锐化后的图像进行轮廓提取,得到与原图轮廓相近的边缘轮廓点集记为初始点集(init\_point)。

2) 对初始点集(init\_point)进行近似多边形逼近,获得近似多边形图像和近似多边形轮廓点集,并初始化多边形图像轮廓灰度值为 0 背景色灰度值为 255。工件轮廓在转角处存在圆角,需要降低多边形近似算法的阈值来保证近似精度,但降低阈值会引起程序运算量增加,故采用基于矩的多边形逼近算法。

3) 使用较小窗口对多边形图像各个方向滑动,获得多边形图像每个像素点的角度响应值,将角度响应值更新至多边形图像灰度值并做归一化处理,计算多边形轮廓点灰度值的直方图分布,以灰度值像素点比例占总像素 80% 的灰度值作为分割阈值,轮廓灰度值大于分割阈值的点则判定为角点。

本文采用基于矩的多边形逼近算法保证多边形近似程度的同时降低运算复杂度。改进的 Harris 角点检测通过改变角度响应值的评判标准,使用小尺寸滑动窗口,保证角点测量的精度的同时提高了 Harris 角点检测的运行速度。

### 1.2 最小二乘法拟合

Harris 角点检测精度是像素级,并且倒角和圆角均会使角点位置不准确,对角点进行亚像素定位,精确角点位置。由于工件加工存在误差,造成直线度差。采用最小二乘法拟合<sup>[11, 12]</sup>,获得待测点集的统计特性,依据拉依达准则,剔除待测点集中的野值点。然后二次最小二乘法拟合,提高边缘提取的精度。具体步骤如下。

1) 将检测出的角点按照轮廓顺时针排序,根据角点位置将初始点集(init\_point)分割成与角点数目相同的点集组。

2) 分割出的点集组分别进行椭圆拟合,椭圆长宽比大于固定阈值则判定为直线点集,否则判定为圆弧点集。

3) 分割出的点集拟合标准直线或标准圆,计算所有点到标准点(圆心)或标准直线的距离,求得数据平均值和均方差  $\sigma$ 。当某一点的距离值与平均值的差超出 3 倍  $\sigma$  时,剔除该点。然后对剔除后点集重新拟合标准圆和标准直线。

4) 亚像素角点定位,通过线与线求交点的方式进一步精确角点的精度。线与线之间的交点主要分为两类,直线与直线之间,直线与圆弧之间。分割出的点集,分组拟合成首部直线、中部直线和尾部直线,直线与直线的交点采用低索引号(索引号标注下一节具体给出)尾部直线和高索引号

首部直线相交计算,结果为亚像素角点。选取直线与圆弧的切点作为直线与圆弧的交点。

直线、圆弧最小二乘法拟合公式如下。

直线的黑塞范式如式(2)所示。

$$\alpha x + \beta y + g = 0 \quad (2)$$

待拟合点到直线的距离如式(3)所示。

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha x_i + \beta y_i + g)^2 \quad (3)$$

若  $\alpha = \beta = g = 0$ , 会得到一个 0 的误差,因此必须引入拉格朗日乘子  $\alpha^2 + \beta^2 - 1 = 0$ 。

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha x_i + \beta y_i + g)^2 + \lambda (\alpha^2 + \beta^2 - 1)n \quad (4)$$

求对应的拟合  $\epsilon^2$  最小值  $\alpha, \beta$ , 经推导后,最优值  $(\alpha, \beta)$  是  $M$  中最小特征值对应的特征向量。

$$M = \begin{pmatrix} M_{20} & M_{11} \\ M_{11} & M_{02} \end{pmatrix} \quad (5)$$

圆弧拟合的最小化公式如式(6)所示。

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2} - \gamma)^2 \quad (6)$$

### 1.3 模板索引号定位待测尺寸

由于同批次光学镜片具有相同的外部轮廓和测量标准,且同一光学镜片通常包含多个待测尺寸。针对这一情况提出基于建立模板索引号的方式,对同一待测目标实现多尺寸测量。测量开始前采集待测工件图像作为测量模板,根据前两节方法分割出的几何基元与角点,以左上角为起始索引号顺时针排序,如图3所示。实际需要测量的尺寸主要分为点到直线的距离、直线与直线之间的距离、圆弧半径与角度。采用CAD导入图纸的方式或者人为选择索引号的方式,将待测尺寸的索引号分组存入数据库。实际测量时,人为摆放工件的角度是任意的,摆放角度很难与模板角度相同,因此采用旋转模板匹配的方法将待测工件图像旋转至与模板角度相同的位置。采用与模板索引号相同的标记方式标记待测工件,查询数据库中对应模板索引号完成对工件的测量,实现对不同目标工件的高适应性测量。

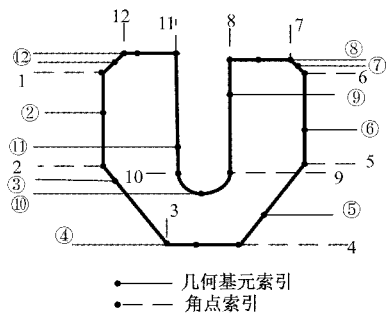


图3 模板索引号

## 2 实验与分析

精度是衡量仪器的重要指标,一般包括复现精度和重

复精度两种。其中,复现精度是仪器测量值精确度的体现,通过测量结果的偏差值表示。而重复精度则表现出仪器多次重复测量结果的精密程度,一般使用偏差均方差值进行评定。为验证此方法多目标适应性和复现精度,选取3种工件进行实验,如图4所示。基恩士三坐标测量仪的重复测量精度可达到  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ,可作为标准量计算。对比此方法的测量结果和基恩士三坐标测量仪 LM1100 的测量结果,得到尺寸偏差,方法的重复精度通过多次改变待测工件位置,计算此方法与测量仪偏差的均方差进行验证。

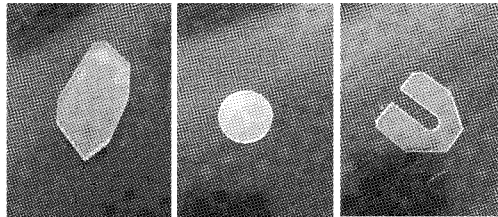
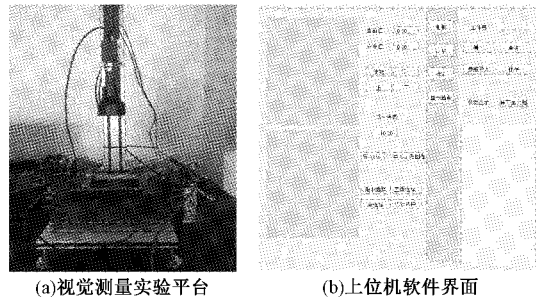


图4 试验样本3种镜片

为此搭建了视觉测量实验平台进行验证,如图5所示。平台包括3部分:机械本体、图像采集系统、运动控制系统。图像采集系统包括相机、光源、镜头。相机采用海康威视的CMOS面阵相机,分辨率  $5472 \text{ pixel} \times 3648 \text{ pixel}$ ,镜头采用双向远心镜头,打光方式采用条形光源进行侧面打光。控制系统包括电机和丝杠,电机选用100W伺服电机,丝杠有效行程为200mm。上位机软件结合opencv和qt开发。



(a)视觉测量实验平台 (b)上位机软件界面

图5 测量系统平台

多目标适应性和复现精度验证的具体步骤如下。

1) 相机光轴与被测面的不垂直,导致同张图像不同像素点与实际尺寸的换算比例不同,引起误差。本文采用圆形标准标定板对相机进行位姿估计,调整相机位置使光轴与被测面垂直。以标准镜片计算换算比例,多次测量的换算比例为  $0.0086 \text{ mm/pixel}$ 。

2) 手动选择3种镜片的模板索引号存入数据库。实际测量镜片时,从数据库选择对应的镜片工件号,程序自动导入该工件所需测量的模板索引号。

3) 采集待测图像,采用旋转模板匹配的方法将待测工件角度调整与模板的角度相同。使用改进的Harris角点检测提取角点,并根据角点将轮廓分割成不同的几何基元,使用最小二乘法拟合得到几何参数,几何基元相交获得角

点位置。

不同种类工件的测量结果如表 1~3 所示。3 种工件

4) 根据模板索引号计算待测工件的所需测量尺寸,获得尺寸测量结果。

对比此方法与基恩士测量仪测量结果,存在部分粗大偏差 0.02 mm,在可接受范围以内。

表 1 八边形的测量精度

尺寸号	八边形 1			八边形 2		
	本文测量	测量仪测量	偏差	本文测量	测量仪测量	偏差
1	30.017 2	30.03	-0.013	29.962 8	29.98	-0.017
2	5.021 1	5.039	-0.018	4.995 9	4.998	-0.002
3	24.004 3	24.004	0.000 3	24.008 6	23.992	0.017
4	4.980 5	4.984	0.004	4.952 66	4.939	0.013
5	34.988 7	34.998	-0.01	34.988 2	34.985	0.002 8
6	9.937 2	9.938	-0.001	9.900 86	9.88	0.02
7	25.054 5	25.034	0.02	25.125 4	25.113	0.012
8	19.984 8	19.981	0.004	20.014 3	20.001	0.013

表 2 多边形的测量数据

尺寸号	多边形 1			多边形 2		
	本文测量	测量仪测量	偏差	本文测量	测量仪测量	偏差
1	11.728 6	11.721	0.007	11.724 6	11.719	0.006
2	28.575 1	28.56	0.015 1	28.546	28.526	0.02
3	3.044 74	3.026	0.019	3.075 08	3.082	-0.007
4	10.980 6	10.97	0.012	10.994 6	10.975	0.02
5	3.048 42	3.035	0.013	3.082 19	3.066	0.016
6	28.123 7	28.123	0.000 3	28.144 8	28.128	0.017
7	2.052 21	2.043	0.009	1.974 99	1.966	0.009
8	2.052 05	2.048	0.004	1.978 85	1.966	0.013
9	6.070 53	6.072	-0.001	6.082 71	6.073	0.01
10	27.564 6	27.558	0.007	27.527 2	27.543	-0.016
11	10.146 8	10.126	0.021	10.07	10.087	-0.017
12	11.685 1	11.67	0.015	11.817 3	11.833	-0.016

表 3 圆形测量数据

尺寸号	圆 1			圆 2		
	本文测量	测量仪测量	偏差	本文测量	测量仪测量	偏差
1	25.398 6	25.369	0.012	25.407 3	25.393	0.014

为验证此方法的重复精度,将同一圆片以不同的位姿进行 10 组测量,获得此方法与测量仪的测量偏差,测量数据如表 4 所示。按照 GB/T19022-2003 (idt ISO10012:2003)标准,测量设备固有的最大允许误差与产品检验公差极限的对应值之比选择 1/3~1/10,最大允许误差为标准均方差的 3 倍。即公差带为±0.05 mm,普通测量重复测量均方差应该在 0.005 5 mm 以内,精密测量的均方差值在 0.001 6 mm 以内。此方法 10 组数据的均方差值为 0.007 478 93 mm,可根据接受程度,选择测量公差带 ≥±0.067 mm 的工件。

表 4 多组圆片尺寸测量数据

组别	本文测量	基恩士测量	偏差
1	6.995 2	7.000 0	0.004 8
2	6.992 8	7.000 0	0.007 2
3	7.004 7	7.000 0	-0.004 7
4	6.999 7	7.000 0	0.000 3
5	6.981 8	7.000 0	0.018 2
6	6.985 4	7.000 0	0.014 6
7	6.988 1	7.000 0	0.011 9
8	6.996 6	7.000 0	0.003 4
9	7.000 5	7.000 0	-0.000 5
10	7.001 1	7.000 0	-0.001 1



视觉检测中,尺寸测量误差主要分为算法误差和系统误差<sup>[13]</sup>。算法误差主要是由于不同批次工件图像明亮度不同,而轮廓提取采用同一套参数进行算法处理,导致轮廓提取存在一定误差;系统误差主要包括机械结构误差以及光学系统的误差<sup>[14]</sup>。机械结构误差主要由于机械调焦系统,使得相机的位姿无法固定,那么丝杠的直线度误差导致光轴与被侧面的垂直度不稳定误差。光学系统的误差主要由相机、镜头和光源的误差组成,相机由于转化电荷的不稳定导致图像噪声的误差。远心镜头仍存在一定的畸变误差,现有针孔摄像机模型无法反映真实情况<sup>[15-16]</sup>。由于待测量材料具有很强的反光性,以及形状的不规则导致不同面的反光能力不同,尽管进行了增强处理但是不可避免的仍会导致误差。

### 3 结 论

针对现有的视觉图像处理方法对多目标测量适应性差、测量精度低的问题,提出了基于机器视觉的镜片测量方法。利用改进 Harris 角点检测粗定位角点,角点间的轮廓点集分类拟合,依据拉以达准则剔除待拟合点中的野点后二次拟合,提高直线拟合的精度,对角点进行亚像素定位,提高角点提取的精度。最后进行精度和多目标适用性验证实验,实验结果表明本文方法能够对多种镜片测量有较好的适应性,复现精度最大偏差在 $\pm 0.02$  mm,重复测量均方差优于 0.01 mm,测量精度高且鲁棒性强,可应用于工业实际测量。

### 参考文献

- [1] 吴代思,范勇,陈念年,等.一种适用于零件批量检测的尺寸批量测量方法[J].计算机测量与控制,2020,28(10):46-50.
- [2] 宋帅帅,黄锋,江燕斌.基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J].电子测量技术,2021,44(3):22-26.
- [3] 张喜民,余奇颖,张金博,等.基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(10):47-54.
- [4] 初孟霖.高精度机器视觉测量方法研究[D].吉林:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2021.
- [5] 刘斌,董正天,胡春海,等.基于机器视觉的丝网印刷样

- 板尺寸测量方法[J].计量学报,2021,42(2):150-156.
- [6] 段振云,王宁,赵文辉,等.基于高斯积分曲线拟合的亚像素边缘提取算法[J].计量学报,2016,37(4):371-374.
- [7] 徐平,薛凌云,常英杰.汽车发动机进气歧管高精度亚像素边缘检测[J].计量学报,2018,39(3):321-325.
- [8] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等.基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J].电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [9] 谢珩,汪成龙,黄振雄,等.基于 LabVIEW 的五金件尺寸检测方法[J].电子测量技术,2019,42(24):152-156.
- [10] 周伟,巢渊,李奠,等.基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正[J].电子测量与仪器学报,2020,34(10):74-81.
- [11] 杨林,鄢红章,晏涛,等.基于机器视觉的多圆弧对称零件测量方法研究[J].激光与红外,2021,51(9):1149-1154.
- [12] 朱周,路小波.基于椭圆拟合的车辆遮挡处理算法[J].仪器仪表学报,2015,36(1):209-214.
- [13] LIU J, WANG G L, WANG J, et al. Gross error detection in pneumatic measurement of form tolerance based on fuzzy assessment[J]. Advanced Materials Research, 2011, 305:69-74.
- [14] 凌云.磁材自动光学检测设备的评价要素[J].国外电子测量技术,2015,34(7):13-18.
- [15] 郑冬,冯鹏,龙邹荣,等.面向多因素工况下的相机标定精度综述[J].国外电子测量技术,2020,39(8):109-116.
- [16] 赵文辉,赵萍,段振云,等.微米级机器视觉系统中随机误差与系统误差的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2013,55(9):108-110,114.

### 作者简介

刘智慧,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、图像处理。

E-mail:1739910497@qq.com

张承瑞,工学博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能制造系统与控制。

E-mail:Crhzhzhang@sdu.edu.cn

李瑞珍,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:1249736480@qq.com