

# 微小型光学元件尺寸的视觉测量系统研制

赵美丹, 余桂英, 瞿永顺, 林瑞杰, 林敏\*

中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 设计了一种微小型光学元件尺寸的视觉测量系统。提出一种穹顶光和同轴光结合的暗场散射照明方案来突出元件的表面特征; 利用子区域和全图的亮度差值进行光照补偿, 以消除边缘重影; 针对边缘局部亮度过高且不均的问题, 使用基于区域分割的 Otsu 算法提取边缘。使用最小二乘法拟合元件边缘计算尺寸。实验结果表明: 基于区域分割的 Otsu 算法测量长和宽的平均误差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $4.1 \mu\text{m}$ , 较 Canny 边缘检测算法测量的结果, 减小了  $10 \mu\text{m}$  以上, 测量不确定度为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.1 \mu\text{m}$ , 较改进前的算法, 受光照影响小, 准确度和鲁棒性更高。

**关键词** 机器视觉; 图像处理; 微小型光学元件; 尺寸测量; 区域分割

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0815006

## Development of Visual Size-Measurement System for Micro-Optical Components

Zhao Meidan, Yu Guiying, Qu Yongshun, Lin Ruijie, Lin Min\*

College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** In this work, we designed a visual size-measurement system for micro-miniature optical components. We proposed a dark-field scattering illumination scheme combining dome light and coaxial light to highlight the surface features of the element and used the brightness difference between the subregion and the full image for illumination compensation to eliminate edge ghosting. For the excessively high and uneven local edge brightness, we used a region segmentation-based Otsu algorithm to extract edges. In addition, we used the least square method for the component edge-fitting to calculate the size. Experiment results show that the region segmentation-based Otsu algorithm has an average error of  $1.5$  and  $4.1 \mu\text{m}$  for measuring length and width, respectively, which reduced by more than  $10 \mu\text{m}$  compared to the Canny edge detection algorithm-based measurement results. The measurement uncertainties of the region segmentation-based Otsu algorithm are  $0.5$  and  $1.1 \mu\text{m}$  for length and width, respectively. The system is less affected by light, and the accuracy and robustness are higher than the algorithm before improvement.

**Key words** machine vision; image processing; micro-optical component; size measurement; area segmentation

**OCIS codes** 150.0155; 100.2000; 150.3045

## 1 引言

光通讯设备进一步向精密化、微型化发展, 其核心光学元件的制造水平制约着光通讯技术能到达的

高度。光学元件的几何尺寸不合格除了会影响自身的性能, 还会损害与其配合的其他零件甚至整个系统的性能。微型尺寸、玻璃材质, 切割时易崩边等情况为光学元件尺寸测量带来了巨大挑战, 而其高透

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-09-13; 录用日期: 2020-09-22

基金项目: 浙江省公益技术计划(LGG18F050001)

\* E-mail: 1143692784@qq.com

射、高反射的特点和崩边等造成的边缘复杂成像也成为了图像采集与处理的难题。

目前光学元件检测的研究方向集中于轮廓(如面形、形位误差)检测<sup>[1-2]</sup>,少有关于外形尺寸检测的研究。传统光学元件尺寸测量方法有接触式和非接触式两种,前者易损伤元件,精度受测量者影响。非接触测量法中的激光扫描法成本较高、效率一般;万能工具显微镜和光学测量投影仪精度较高,但需离线测量,不能进行多数据测量<sup>[3]</sup>,且每次测量时要重新定位和对焦,过程复杂。概括地说,传统测量方法复杂,效率及自动化程度低,而机器视觉方法凭借高自动化程度及低成本、高效率、高稳定性,在尺寸自动测量领域赢得一席之地。

虽然视觉测量方法较少运用在光学元件尺寸的测量研究中,但是已经广泛运用于非光学微小型元件及物体的尺寸测量中。乐静等<sup>[4]</sup>提出一种点映射互相关配准算法,该算法通过拼接局部重叠的序列图像来进行微小零件测量;Haiden 等<sup>[5]</sup>采用暗场视频显微镜装置和微流体样品单元来测量油中悬浮的金属磨损颗粒的尺寸;张喜民等<sup>[6]</sup>引入轮廓匹配获取图像的几何信息,并设计了一种 Hough 空间投票权重分配新策略提高边缘检测精度,实现了手机尾插工件尺寸的高精度测量。关于边缘检测算法<sup>[7-9]</sup>、亚像素级边缘检测算法<sup>[10-12]</sup>等的研究也为元件尺寸的高精度测量奠定了基础。许楠楠等<sup>[13]</sup>采取平行光投影的方法获取圆柱形光学元件的轮廓,使用最小二乘线性回归检测边缘,实现了外径的微米级精度测量;Kim 等<sup>[14]</sup>提出了一种结合数字全息和模式识别算法的阵列结构微光学元件的三维测量方法,该方法测量微透镜的直径和高度,测量平均误差在 2% 以内,说明视觉方法实现光学元件尺寸的高精度测量可行性极高。但是这些检测方法都无法解决本文中光学元件边缘成像复杂的问题,还需探索其他方法进行检测。

针对传统测量方法的不足,本文利用机器视觉方法对光学元件尺寸测量进行研究。提出了一种穹顶光和同轴光结合的暗场散射照明方案突出表面特征;使用不均匀光照补偿算法<sup>[15-16]</sup>减轻光照和重影的干扰;使用改进的 Otsu 方法提高边缘检测的精度和算法的鲁棒性,改进后测量相对误差不超过 0.80%;开发了对应的尺寸测量软件,实现了高精度、非接触的多种微小型光学元件的尺寸测量。

## 2 测量原理

### 2.1 边缘提取

#### 2.1.1 不均匀光照补偿

受崩边和打光方式影响,元件边缘会出现重影,处理不当可能会引起较大的测量偏差,于是使用光照补偿算法消除重影,光照补偿算法流程如图 1 所示。设原图的灰度矩阵为  $I_{MN}$ ,则其平均灰度为

$$g = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} p_{ij}}{M \times N}, \quad (1)$$

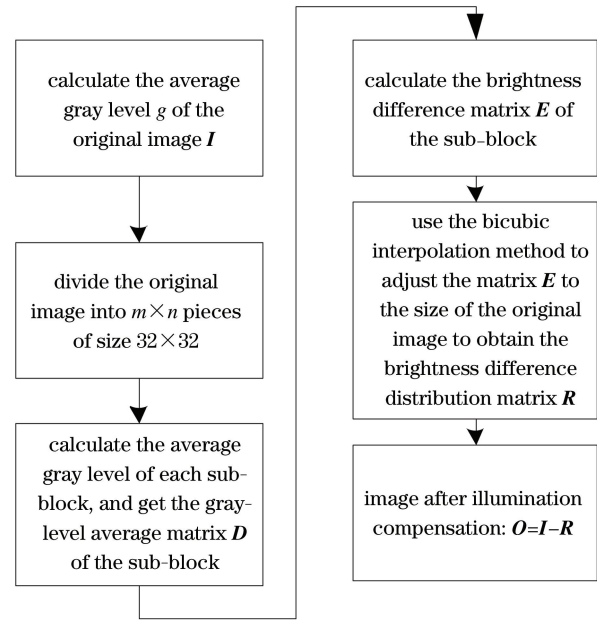


图 1 不均匀光照补偿算法流程

Fig. 1 Flowchart of uneven illumination compensation algorithm

式中:  $p_{ij}$  为原图坐标  $(i, j)$  处的灰度值;  $M$  和  $N$  分别为原图的长度和宽度。将原图  $I_{MN}$  分割成大小为  $32 \times 32$  的  $m \times n$  个子块, 每个子块的灰度均值  $d$  为

$$d = \frac{\sum_{i=0}^{31} \sum_{j=0}^{31} q_{ij}}{32 \times 32}. \quad (2)$$

全部子块的灰度均值矩阵为

$$D_{mn} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

计算得到的亮度差值矩阵  $E$  为

$$E_{mn} = D_{mn} - G_{mn}. \quad (4)$$

其中,

$$G_{mn} = \begin{bmatrix} g & \cdots & g \\ \vdots & & \vdots \\ g & \cdots & g \end{bmatrix} \quad (5)$$

使用双立方插值公式对  $E$  进行插值, 将其放大到原图  $I$  的大小, 得到全图的亮度差值分布矩阵  $R$ 。双立方插值公式为

$$F(i+v, j+u) = \sum_{a=-1}^2 \sum_{b=-1}^2 f(i+a, j+b) S(a-v) S(b-u) \quad (6)$$

式中:  $S(\cdot)$  为采样函数;  $f(i, j)$  为  $E$  中点  $(i, j)$  处

的灰度值;  $F(i+v, j+u)$  为  $R$  经插值后在点  $(i+v, j+u)$  处的灰度值。

$$S(t) = \begin{cases} 1 - 2|t|^2 + |t|^3, & |t| < 1 \\ 4 - 8|t| + 5|t|^2 - |t|^3, & 1 \leq |t| < 2 \\ 0, & |t| \geq 2 \end{cases} \quad (7)$$

将原图  $I$  和  $R$  相减, 即可对原图中过亮和过暗的区域进行一定的补偿, 得到图像  $O$ 。图 2 为光照补偿前后的图像对比, 经补偿算法处理后, 元件上方重影被消除了, 边缘部分也更加突出。

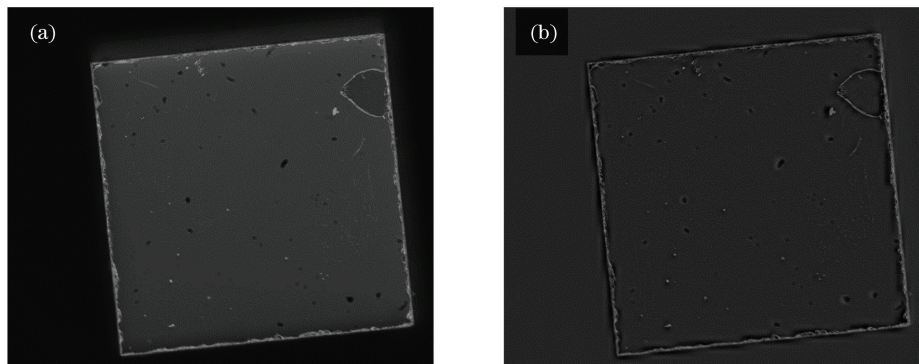


图 2 光照补偿前后元件的对比。(a)光照补偿前;(b)光照补偿后

Fig. 2 Comparison of components before and after illumination compensation. (a) Before illumination compensation; (b) after illumination compensation

### 2.1.2 基于区域分割的 Otsu 方法

Otsu 方法(最大类间方差法)是一种可根据某一阈值将图像分成背景和前景两部分, 使得两部分的类间方差最大的方法。该阈值分割方法的原理为: 设阈值  $T(k) = k (1 < k < L)$ , 通过阈值  $k$  可以将图像分为  $\mu_0$  和  $\mu_1$  两类。为使目标和背景之间的方差最大, 目标函数为

$$k = \max_{1 < k < L} [\sigma^2(k)] \quad (8)$$

按照阈值  $k$ , 可将原图分为背景和前景两部

分, 两者的交界处即为元件的边缘。用 Otsu 方法提取边缘时, 测量得到的结果误差较大, 所以使用区域分割算法<sup>[17]</sup>对原方法进行改进。首先用 Otsu 方法分离如图 3(a)所示的原图中的元件与背景, 得图 3(b), 再进行图 3(c)的膨胀和图 3(d)的腐蚀, 使用集合运算得到图 3(e)中元件的边缘区域。使用最大类间方差法对图 3(e)边缘局部区域中的背景和崩边进行细分, 得到元件的边缘位置。

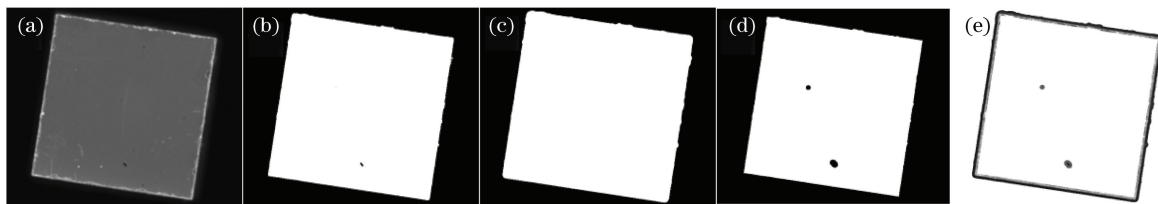


图 3 光学元件边缘提取。(a)原图;(b)Otsu 阈值分割;(c)边缘膨胀;(d)边缘腐蚀;(e)区域分割

Fig. 3 Edge extraction of optical element. (a) Original image; (b) Otsu threshold segmentation; (c) edge expansion; (d) edge corrosion; (e) region segmentation

图 4 中线条(a)和(b)分别为 Otsu 方法和基于区域分割的 Otsu 算法提取到的边缘, 线条(b)相

较线条(a)更贴近实际边缘, 且受边缘重影影响小。

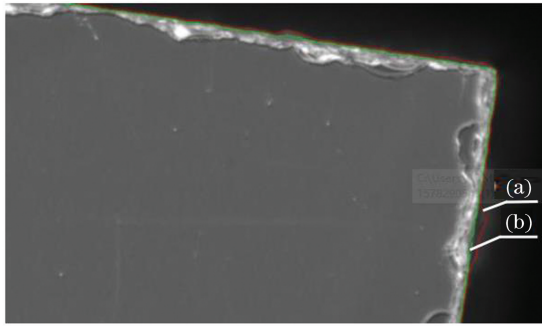


图 4 边缘提取结果对比

Fig. 4 Comparison of edge extraction results

## 2.2 尺寸测量

1) 确定角点位置。在所有轮廓点中任取其中一个点  $S$ , 搜索与  $S$  之间距离最大的点为第一个角点, 随后以与已知角点间距离 (当有多个已知角点时为距离和) 最大为依据依次找到其余三个角点。

2) 补足完整轮廓。将轮廓点按边分为四组, 使用最小二乘直线拟合法计算四条边的直线方程。假设某边上共有  $n$  个点, 每个点的坐标为  $(x_{i'}, y_{i'}) (i' = 1, 2, \dots, n)$ , 且所有点之间存在线性关系, 则可设该线性模型为

$$\bar{y} = wx + b, \quad (9)$$

式中:  $w$  为拟合直线的斜率;  $b$  为拟合直线的截距;  $\bar{y}$  为拟合后直线在该点处的纵坐标值。根据优化

的目标, 可以解得各边的直线方程, 优化目标的方程为

$$\min L = \sum_{i'=1}^n (y_{i'} - wx_{i'} - b)^2. \quad (10)$$

图 5 中的线条 (a) 和 (b) 分别为 Otsu 方法和基于区域分割的 Otsu 算法检测到的边缘经最小二乘拟合后得到的元件边缘, 相较之下, 线条 (b) 更接近实际边缘, 测量结果更为准确。

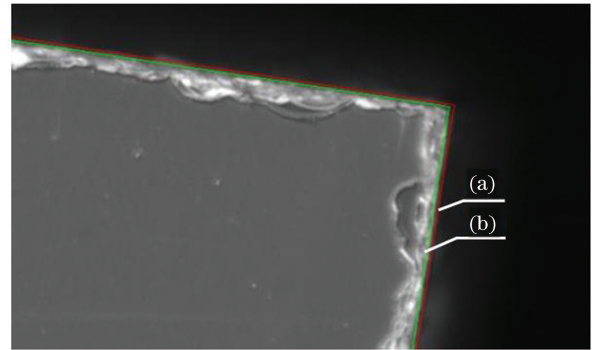


图 5 目标检测结果

Fig. 5 Target detection results

### 3) 尺寸标定

图 6(a) 为本系统采用的标定板。经图像处理, 得到标定线竖直和水平时首尾线条间的像素距离分别为 2230.38 pixel 和 2028.20 pixel, 如图 6(b) 和 (c) 所示。

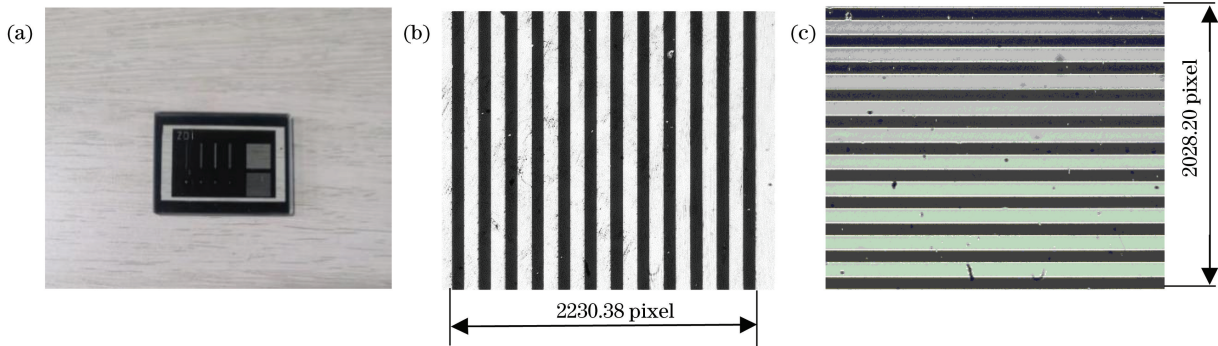


图 6 标定板和标定线。(a) 标定板; (b) 垂直的标定线; (c) 水平的标定线

Fig. 6 Calibration plate and calibration lines. (a) Calibration plate; (b) vertical calibration line; (c) horizontal calibration line

用 Accura III A 影像仪测量的数据作为本系统的标定依据, 测量精度为  $(3.0 + L/200) \mu\text{m}$ 。测量首尾标定线间的距离, 结果如表 1 所示, 垂直和水平时首尾线条之间的距离分别为 1.9219 mm 和 1.7519 mm。根据比例关系, 计算得到水平和垂直方向一个像素的长度分别为  $8.617 \times 10^{-4} \text{ mm}$  和  $8.638 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。

4) 尺寸计算:  $l_1 \sim l_4$  为元件的四条边,  $A, B, C, D$  为四个角点。对  $l_1$  上的线段  $AB$  上所有点到对

表 1 标定线间距

Table 1 Calibration line spacing

Item	Vertical calibration line spacing/mm	Horizontal calibration line spacing/mm
1	1.9211	1.7527
2	1.9205	1.7494
3	1.9232	1.7491
4	1.9214	1.7551
5	1.9233	1.7531
Mean value	1.9219	1.7519

边  $l_2$  的距离求均值, 可得  $l_1$  和  $l_2$  的间距, 同理可知  $l_3$  和  $l_4$  的距离, 即元件的长和宽。

### 3 实验结果及精度分析

分别使用 Otsu 方法、Canny 边缘检测算法、基于区域分割的 Otsu 算法测量同一光学元件 10 次, 得到的元件尺寸如表 2 所示。

表 2 光学元件尺寸测量结果

Table 2 Measurement results of optical components for size

Item	Otsu method		Canny operator edge detection algorithm		Otsu algorithm based on region segmentation	
	Length	Width	Length	Width	Length	Width
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm
1	1.4599	1.4559	1.4891	1.4782	1.4638	1.4550
2	1.4872	1.4603	1.6697	1.4977	1.4639	1.4516
3	1.4601	1.4578	1.4868	1.4855	1.4656	1.4617
4	1.4597	1.1703	1.4868	1.4778	1.4611	1.4575
5	1.4601	1.4562	1.4860	1.4783	1.4618	1.4516
6	1.4567	1.4526	1.4821	1.4750	1.4628	1.4595
7	1.4582	1.4445	1.6530	1.4783	1.4648	1.4546
8	1.4571	1.0586	1.4818	1.4567	1.4642	1.4585
9	1.4573	1.4540	1.4827	1.4673	1.4616	1.4590
10	1.4572	1.4544	1.4915	1.4815	1.4633	1.4581

根据标准差公式,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N'-1} \sum_{j'=1}^{N'} (x_{j'} - \bar{x})^2}, \quad (11)$$

Otsu 方法测量长度和宽度的标准差分别为  $9.2 \mu\text{m}$  和  $145.8 \mu\text{m}$ 。其中  $N'$  为总测量次数,  $x_{j'}$  为第  $j'$  次测量结果,  $\bar{x}$  为测量的平均值。同理, Canny 边缘检测算法测量长度和宽度的标准差分别为  $74.2 \mu\text{m}$  和  $10.7 \mu\text{m}$ ; 基于区域分割的 Otsu 算法测量长度和宽度的标准差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $3.4 \mu\text{m}$ , 均小于 Otsu 方法和 Canny 边缘检测算法测量得到的长度和宽度的标准差, 说明基于区域分割的 Otsu 算法的稳定性更高。

使用 JC-1 系列数显测长仪连续测量该光学元件 5 次, 结果如表 3 所示, 取均值得到该元件的长度为  $1.4632 \text{ mm}$ , 宽度为  $1.4601 \text{ mm}$ 。

表 3 数显测长仪测量光学元件尺寸的结果

Table 3 Results of measuring size for optical components obtained by digital length gauge

Item	Length/mm	Width/mm
1	1.4635	1.4606
2	1.4630	1.4608
3	1.4633	1.4586
4	1.4614	1.4599
5	1.4605	1.4606
Mean value	1.4623	1.4601

机器视觉测量的结果相较测长仪测量结果的绝对误差和相对误差如表 4 所示。分析发现: Otsu 方法对一些容易产生粗大误差的情况不能很好地进行处理, 如表 4 的第 4、8 组实验, 该两组实验具有较大的误差, 剔除这两组粗大误差后, 得到测量长度和宽度的平均误差分别为  $6.4 \mu\text{m}$  和  $5.7 \mu\text{m}$ , 最大相对误差为  $1.70\%$ 。使用 Canny 边缘检测算法进行边缘检测时也会产生一些测量偏差, 如表 4 的第 2、7 组实验, 同样剔除这两组粗大误差, 得到测量长度和宽度的平均误差分别为  $23.6 \mu\text{m}$  和  $16.1 \mu\text{m}$ , 最大相对误差为  $2.00\%$ 。而基于区域分割的 Otsu 算法测量结果的最大绝对误差为  $-8.5 \mu\text{m}$ , 最大相对误差为  $-0.58\%$ , 无较大的偏差, 测量长度和宽度的平均误差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $4.1 \mu\text{m}$ 。

比较可知, 基于区域分割的 Otsu 算法相较改进前测量准确度有一定的提高, 且两种 Otsu 算法的准确度均优于 Canny 边缘检测算法检测的结果。相较 Canny 边缘检测算法, 基于区域分割的 Otsu 算法检测边缘尺寸的平均误差减小了  $10 \mu\text{m}$  以上, 测量准确性和稳定性也有很大的提高。

为验证本系统对不同规格光学元件的适应性, 选取两种不同规格的光学元件进行测量。表 5 为测长仪测得该元件的尺寸。比较测长仪与机器视觉方法测得的结果, 如表 6 所示。分析可知, 滤波片 1 的长度和宽度的最大误差分别为  $-8.8 \mu\text{m}$  和  $6.1 \mu\text{m}$ , 滤波片 2 的长度和宽度的最大误差分别为  $9.3 \mu\text{m}$  和  $-5.7 \mu\text{m}$ , 绝对误差均小于  $10 \mu\text{m}$ , 相对误差不超过  $1\%$ , 故本系统对于不同类型的光学元件均有较好的检测效果。

表 4 机器视觉测量尺寸的误差分析

Table 4 Error analysis for measuring size of machine vision

Item	Otsu method				Canny operator edge detection algorithm				Otsu algorithm based on region segmentation			
	Length		Width		Length		Width		Length		Width	
	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %
1	-2.4	-0.16	-4.2	-0.29	26.8	1.83	18.1	1.24	1.5	0.10	-5.1	-0.35
2	24.9	1.70	0.2	0.01	207.4	14.18	19.8	1.36	1.6	0.11	-8.5	-0.58
3	-2.2	-0.15	-2.3	-0.16	24.5	1.68	25.4	1.74	3.3	0.23	1.6	0.11
4	-2.6	-0.18	-289.8	-19.85	24.5	1.68	17.7	1.21	-1.2	-0.08	-2.6	-0.18
5	-2.2	-0.15	-3.9	-0.27	23.7	1.62	18.2	1.25	-0.5	-0.03	-8.5	-0.58
6	-5.6	-0.38	-7.5	-0.51	19.8	1.35	14.9	1.02	0.5	0.03	-0.6	-0.04
7	-4.1	-0.28	-15.6	-1.07	190.7	13.04	18.2	1.25	2.5	0.17	-5.5	-0.38
8	-5.2	-0.36	-401.5	-27.50	19.5	1.33	-3.4	-0.23	1.9	0.13	-1.6	-0.11
9	-5.0	-0.34	-6.1	-0.42	20.4	1.40	7.2	0.49	-0.7	-0.05	-1.1	-0.08
10	-5.1	-0.35	-5.7	-0.39	29.2	2.00	24.1	1.47	1.0	0.07	-2.0	-0.14

表 5 数显测长仪测量两种不同规格光学元件尺寸的结果

Table 5 Results for measuring the size of two kinds of optical elements using digital length gauge

Item	Filter 1		Filter 2	
	Length/mm	Width/mm	Length/mm	Width/mm
1	1.3974	1.0005	1.4003	0.7491
2	1.3964	0.9992	1.3996	0.7475
3	1.3969	1.0008	1.3944	0.7488
4	1.3992	1.0017	1.3986	0.7486
5	1.4069	1.0009	1.4001	0.7505
Mean value	1.3994	1.0006	1.3986	0.7489

表 6 元件尺寸测量结果及误差分析

Table 6 Measurement results and error analysis of component size

Item	Filter 1						Filter 2					
	Length			Width			Length			Width		
	Measured size/ mm	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Measured size/ mm	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Measured size/ mm	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %	Measured size/ mm	Absolute error/ $\mu\text{m}$	Relative error/ %
1	1.3906	-8.8	-0.63	1.0032	2.8	0.28	1.3908	-7.8	-0.56	0.7452	-3.7	-0.49
2	1.3941	-5.3	-0.38	1.0027	2.3	0.23	1.3902	-8.4	-0.60	0.7445	-4.4	-0.59
3	1.3940	-5.4	-0.39	1.0054	5.0	0.50	1.4018	3.2	0.23	0.7432	-5.7	-0.76
4	1.3929	-6.5	-0.46	1.0031	2.7	0.27	1.4072	8.6	0.61	0.7500	1.1	0.15
5	1.4025	3.1	0.22	1.0065	6.1	0.61	1.4079	9.3	0.66	0.7487	-0.2	-0.03

分别对本系统测量长度和宽度的结果进行不确定度分析。根据表 2 得到测量长度和宽度的标准差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $3.4 \mu\text{m}$ ，由不确定度计算公式计

算得到本系统测量长度和宽度的不确定度分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.1 \mu\text{m}$ ，测量稳定性较高。不确定度计算公式为

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{N'}} \quad (12)$$

## 4 测量系统设计

### 4.1 图像采集系统

针对微小型光学元件尺寸微小的特点,系统采用高分辨率的海康威视 MV-CA050-10GM 相机(分辨率为  $2448 \times 2048$ )和高分辨率的灿锐 XF-MT3X65D 远心镜头(光学放大倍率为  $3 \times$ )进行图像采集。

光学元件具有高透射、高反射的特性,受光照影响大,采集图像易失真。为了更好地采集其表面的图像信息,减弱环境光的影响,系统采用暗场散射照明的方式进行图像采集:使用穹顶光形成暗场,在暗场散射下结合同轴光进行照明,不仅可以打亮多膜面,更好地区分出孔洞区域,还可以利用穹顶光打亮元件的边缘,更完整地呈现出整个元件的表面特征。

### 4.2 测量软件设计

采集到的图像传送至个人计算机,使用 Visual Studio 软件进行图像处理与尺寸计算。软件分为检测准备、待测元件类型选择、图像显示、检测与结果显示 4 个模块。检测流程如图 7 所示,给系统导入检测标准,进行尺寸标定,选择待测元件的种类后进行尺寸测量,最后显示检测结果。

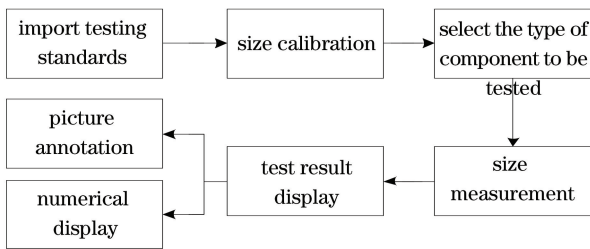


图 7 软件测量过程

Fig. 7 Software measurement process

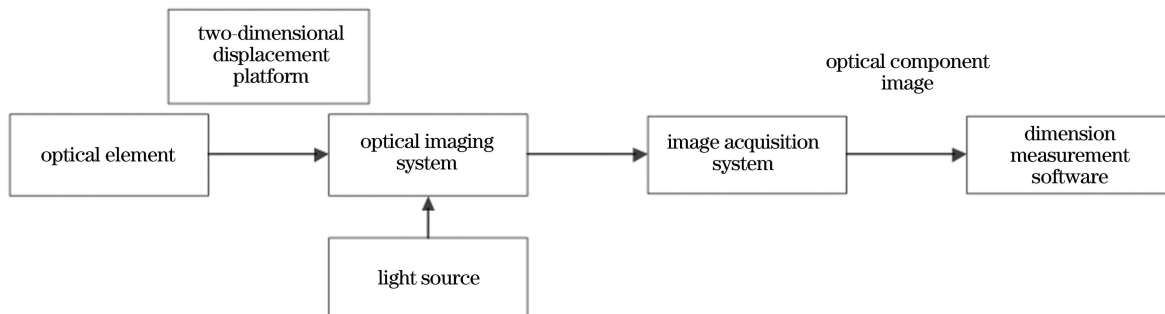


图 9 光学元件尺寸测量流程图

Fig. 9 Flow chart of optical element size measurement

图 8 为系统的软件界面。检测准备模块包括两个部分:“元件参数导入”选择 Excel 文件后可将文件内的检测标准(元件的长度、宽度、角度及尺寸公差等)批量导入到系统中;“尺寸标定”功能用于图上距离与实际距离之间的比例尺换算。

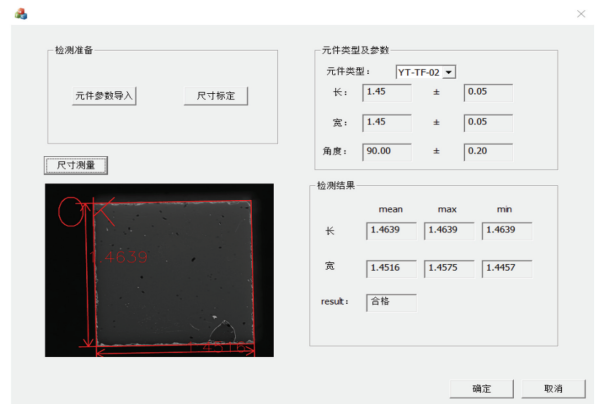


图 8 光学元件尺寸测量软件界面

Fig. 8 Software interface of optical component dimension measurement

测量前先选择元件类型,选定后,“元件类型及参数”栏显示检测标准。图像传入软件后开始测量并显示计算结果。界面显示测量到的两对边间距离的平均值、最大距离、最小距离,并根据标准判断元件是否合格,并显示在“result”一栏;在原图上标注测量值,根据元件是否合格标注“OK”或“NG”。

### 4.3 整体系统设计

所提微小型光学元件尺寸测量系统主要包括图像采集系统、软件测量系统、一个二维位移平台。图 9 为系统的工作流程,由位移平台带动元件移动至成像系统的视场范围内,再通过图像采集系统获取图像,将采集到的图像传入个人计算机中的尺寸测量软件进行测量。本测量系统的结构如图 10 所示。

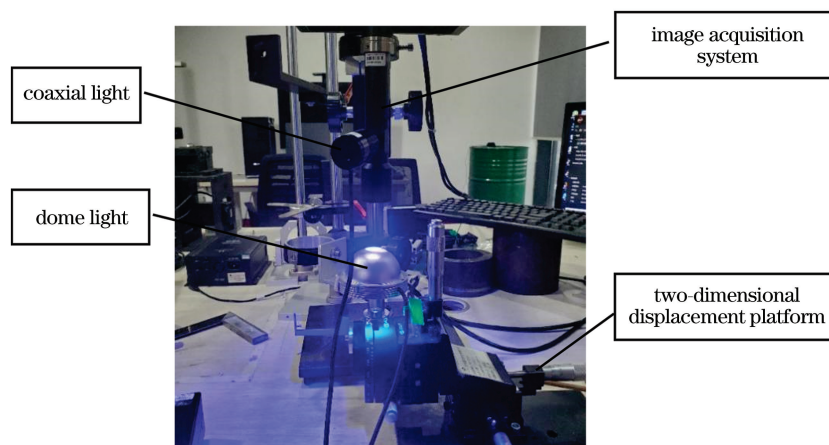


图 10 光学元件尺寸测量系统

Fig. 10 Optical element size measuring system

## 5 结 论

设计了一套微小光学元件尺寸的视觉测量系统。针对光学元件高反射性、高透射性等特点,使用同轴光和穹顶光进行暗场散射成像,突出了光学元件的边缘和表面特征。使用不均匀光照补偿法消除边缘重影,在保护真实边缘的基础上减弱重影的影响;又使用区域分割算法对边缘进行细分,解决了崩边造成的边缘成像复杂性对尺寸测量的影响;最后利用最小二乘法重建完整元件的边缘,计算得到元件尺寸。

实验结果表明:使用 Canny 算子边缘检测算法计算长度和宽度的平均误差分别为  $23.6 \mu\text{m}$  和  $16.1 \mu\text{m}$ ,测量误差较大;Otsu 算法测量长和宽的标准差分别为  $9.2 \mu\text{m}$  和  $145.8 \mu\text{m}$ ,易产生粗大误差,测量稳定性不高;基于区域分割的 Otsu 算法测量长和宽的标准差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $3.4 \mu\text{m}$ ,平均误差分别为  $1.5 \mu\text{m}$  和  $4.3 \mu\text{m}$ ,无较大的偏差。基于区域分割的 Otsu 算法不易受光照、重影和崩边等情况的影响,最大测量误差不超过  $10 \mu\text{m}$ ,具有较高的准确性。本系统测量长度和宽度的不确定度分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $1.1 \mu\text{m}$ ,稳定性较高。

## 参 考 文 献

- [1] Lei W Z, Yuan L J, Kang Y, et al. Nonlinear optimization method for reconstruction of the off-axis aspherical surface by profile measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1212004.  
类维政, 袁吕军, 康燕, 等. 基于非线性优化方法的离轴非球面轮廓测量面形恢复技术[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1212004.
- [2] Guo M, Dai Y F, Peng X Q, et al. Shape and position error measurement of cuboid optical element in high precision[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(6): 21-25.  
郭蒙, 戴一帆, 彭小强, 等. 长方体类光学元件形位误差高精度测量方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(6): 21-25.
- [3] Chen Y M, Zhang G M, Yuan Y H. Online calibration of infrared binocular vision measurement system with large field of view[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2013, 35(5): 692-697.
- [4] Le J, Li L, Yang Y X, et al. Vision coordinate measurement method and evaluation for small workpiece dimensions [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(4): 8-13.  
乐静, 李乐, 杨宇祥, 等. 微小零件尺寸的视觉坐标测量方法和评价[J]. 光电工程, 2013, 40(4): 8-13.
- [5] Haiden C, Wopelka T, Jech M, et al. Amicrofluidic chip and dark-field imaging system for size measurement of metal wear particles in oil[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(5): 1182-1189.
- [6] Zhang X M, Yu Q Y, Zhang J B, et al. Research on precision measurement method for mobile phone tail plug part based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 47-54.  
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.
- [7] Li S X, Cao G Z, Li Q, et al. Research on anchor points based edge detection optimization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 9-16.  
李世雄, 曹广忠, 李庆, 等. 基于锚点的边缘检测优



- 化算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 9-16.
- [8] Bharodiya A K, Gonsai A M. An improved edge detection algorithm for X-Ray images based on the statistical range[J]. Heliyon, 2019, 5(10): e02743.
- [9] Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604003.  
高佳月, 许宏丽, 邵凯亮, 等. 基于局部边缘特征描述子的自适应边缘检测算法[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604003.
- [10] Liu T T, Wang P G, Zhang N. Subpixel defect detection in highly reflective workpieces based on Zernike moments [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121203.  
刘婷婷, 王培光, 张娜. 基于 Zernike 矩亚像素的高反光金属工件缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121203.
- [11] Gan H, Zhang C, Li L, et al. Sub-pixel extraction of laser stripe in complex background [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(2): 180457.  
甘宏, 张超, 李林, 等. 复杂背景下激光条纹中心亚像素提取方法[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 180457.
- [12] Liu M P, Zhu W B, Ye S L. Sub-pixel edge detection based on improved Zernike moment in the small modulus gear image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 259-267.  
刘明佩, 朱维斌, 叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 259-267.
- [13] Xu N N, Liu C L. Research on machine vision measurement technology for measuring optical element diameter[J]. Optical Instruments, 2016, 38(4): 292-296.  
许楠楠, 刘缠牢. 光学元件外径的机器视觉测量技术研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(4): 292-296.
- [14] Kim D H, Jeon S, Cho J, et al. Three dimensional measurement of micro-optical components using digital holography and pattern recognition [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(9S): 09ME01.
- [15] Peng X B, Jiang J G. Aimage segmentation thresholding method based on luminance proportion [J]. Computer Technology and Development, 2006, 16(11): 10-12.  
彭兴邦, 蒋建国. 一种基于亮度均衡的图像阈值分割技术[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(11): 10-12.
- [16] Yang M, Tan Z F, Cai L, et al. Illumination compensation for face images based on anisotropic Retinex [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 121007.  
杨梅, 谭泽富, 蔡黎, 等. 基于各向异性 Retinex 的人脸图像光照补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121007.
- [17] Liang X M, Liu W T, Niu F S, et al. Research on measurement of volume and surface area of flotation bubbles based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215009.  
梁秀满, 刘文涛, 牛福生, 等. 基于机器视觉的浮选气泡体积和表面积测量研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215009.