

机器视觉应用中物体离焦及过厚对测量精度的影响

来先家 徐文东 赵成强 肖 阳

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 机器视觉技术在工业测量中具有广泛应用,实现高精度的机器视觉测量对精密加工、制造具有重要意义。针对机器视觉应用中待测物体偏离焦面及在纵深方向过厚导致测量结果出现误差的问题进行了研究。重点讨论了系统中镜头远心度引起的平行性误差及其对离焦物体测量结果的影响。实验结果表明,在物体偏离最佳成像面而引入的误差中,平行性误差占到90%左右,因此可通过后期对平行性误差进行补偿以较大程度地提高系统测量精度。此外,针对待测物体过厚导致边缘模糊这一问题采用多种边缘检测算法进行了分析。结果表明在一定范围内,物体纵深方向越厚,边缘检测误差越大。在这一结果的基础上,对算法进行改进,提出一种基于图像灰度曲线的补偿方法,使测量误差由超过20 μm 降至10 μm 以下。

关键词 机器视觉; 测量精度; 远心度; 厚度; 边缘检测; 双远心光学

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0815002

Influence of Sample Defocus and Large Thickness on Measurement Error in Machine Vision Application

Lai Xianjia Xu Wendong Zhao Chengqiang Xiao Yang

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Machine vision technology is widely used in industrial measurement. To realize high precision measurement of machine vision is of great significance to precision machining and manufacturing. The problem that measuring object will cause measurement error in machine vision application is studied when it deviates from the focal plane or has a certain thickness. The influence of parallelism error caused by lens telecentricity on measurement error of defocus sample is discussed on emphasis. The experimental results show that among all measurement errors caused by sample deviation from the optimal imaging plane, the proportion of parallelism error accounts for about 90%. Measuring accuracy can be improved greatly by compensating parallelism error. Additionally, in order to analyze the problem that the edge is fuzzy when sample has a large thickness, several edge detection algorithms are used. The results show that within a certain range, the thicker the object is, the larger the edge detection error is. On the basis of this result, a compensation method based on image gray-level curve is put forward. As a result, measurement error has decreased from more than 20 μm to less than 10 μm .

Key words machine vision; measuring accuracy; telecentricity; thickness; edge detection; double telecentric optics

OCIS codes 150.3040; 110.2970; 120.4630

1 引言

机器视觉作为一种利用机器代替人眼的现代技术,可以快速获取大量信息并进行自动处理,为工业、农业测量提供了一种重要手段^[1-3]。随着图像处理技术的发展以及远心镜头的使用,其测量精度也得到了极大的提高。目前,基于机器视觉的薄零件尺寸测量精度可达10 μm 以下^[4-6],但是对于非薄片零件则很难实现高精度的测量。这是因为当物体具有一定的空间形状或者厚度时,无法保证物体的所有部分均位于最佳成像面内,从而导致测量结果出现较大误差。虽然待测物离焦及过厚会导致测量误差已成为共识,但并没有研究者在这方面做出针对性的研究。本文以此为着落点,对这两个影响因素进行了讨论,并提出相应的改善测量精度的建议及方法。

目前改善机器视觉测量精度的方法主要有两种:1)提升硬件指标,如优化系统光源,采用成像性能更好的双远心镜头等^[7-11],但是硬件设备的改善意味着成本也会相应提高;2)对软件进行改进,如在对图像进行后

收稿日期:2015-04-14;收到修改稿日期:2015-05-19

作者简介:来先家(1989—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:hustlai@hotmail.com

导师简介:徐文东(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光直写、关联成像与机器视觉等方面的研究。

E-mail:xuwendong@mail.siom.ac.cn

期处理时不断优化算法,实现亚像素级的分辨率。目前针对后一种方法的研究比较多,如提出基于Zernike正交矩、灰度矩、Facet模型及小波变换的亚像素边缘检测算法^[12-16]。算法的改进虽然可以使图像的分辨率突破像素级别,但却并未将硬件参数本身给测量结果带来的误差考虑在内。对此,从两方面考虑,分析硬件设备给测量结果带来的影响,并在软件上进行补偿,取得了较好的实验结果。

2 待测物离焦分析

在机器视觉测量中,当待测物体位于镜头的前焦面时,即使入射主光线与光轴不平行,其成像结果也不会出现明显的偏差,这是由透镜的光学特性所决定的。然而,若物体发生平移,偏离焦面,则会引入较大的误差,包括畸变误差、系统误差及光线平行性误差等。虽然此时可以利用标定板等标准器件对该平面进行误差校正,但是如果物体继续发生偏离,则该校正量将不再适用。因此,有必要采取更有效的误差校正方法。分析结果表明,光线平行性误差与物距有关,因此可以通过找出其变化规律来进行消除。

2.1 远心度与平行性误差

对于物方远心透镜,其入瞳位于无穷远处,等价于孔径光阑在物镜的焦平面上。但在实际制造过程中,物方远心透镜的孔径光阑不可能严格放在物镜的焦平面上,一般会在调试的时候将入瞳位置优化到一个很远的地方,使得系统基本上是一个物方远心光路。在这种情况下,物方主光线与光轴之间通常会存在一个很小的夹角,如图1所示,这个夹角的度数即是远心度^[17-18]。

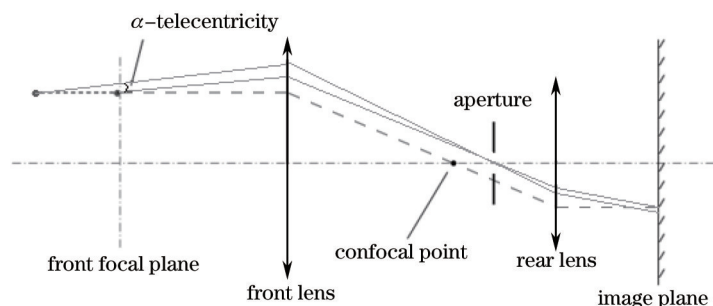


图1 远心度示意图

Fig.1 Schematic diagram of telecentricity

由于远心度的存在,当物体偏离前焦面时,入射主光线与光轴不平行将会导致成像结果出现误差,并且这种平行性误差会随远心度的增大而增大。根据光阑在远心镜头中位置的不同分为两种情况,分别如图2

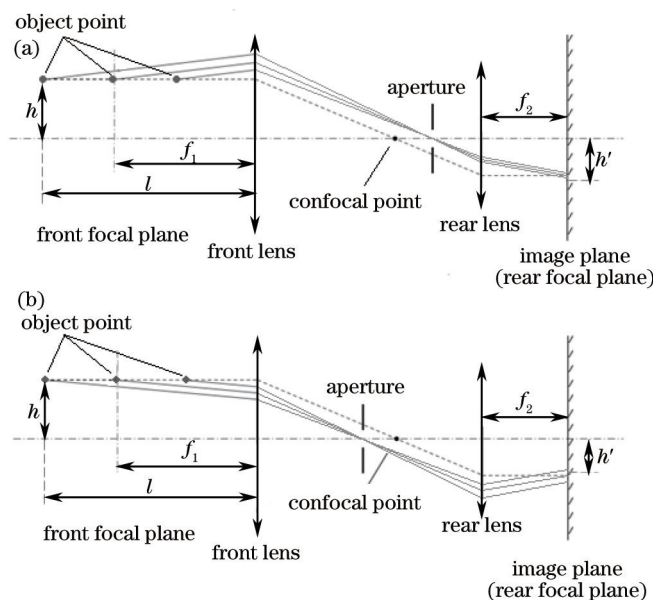


图2 光阑偏离共焦点时光路示意图。(a)光阑在共焦点之后;(b)光阑在共焦点之前

Fig.2 Schematic diagram of optical path in the case of aperture deviating from confocal point.

(a) Aperture is behind the confocal point; (b) aperture is before the confocal point

(1)、(2)式中, $(l=f_1)\alpha$ 为远心度引起的平行性误差。因此,只需要测出镜头远心度即可消除该平行性误差。

2.2 镜头远心度测量及平行性误差验证

目前常用的远心度测量工具是标定板。测量时将标定板放置于光路中,并使其与光轴成 45° ,从而使标定板的上下部分与镜头的距离不同。由于远心度的存在,图像中的标定板将出现一种近似梯形的畸变。通过测量梯形畸变的大小,并除以标定板在光轴方向的长度分量,可以计算出镜头的远心度。然而,根据远心度的定义,这并不是一个严密的远心度测量方法,因为其只考虑了横向畸变分量而忽略了纵向畸变分量。对此,采用平移法测量镜头的远心度。具体方法是:

- 1) 将待测物体垂直放置于光路中,并对其进行图像采集;
- 2) 将物体沿光轴平移一段距离,再次对其成像;
- 3) 对这两幅图像进行处理以还原特定物点的空间坐标;
- 4) 利用某一特定物点的两个坐标,可以计算出该物点对应视场处的远心度大小。

由于在待测物体上标记测量点具有一定的困难,并且精度难以得到保证,因此实验中采用了标定板,其优点主要有两个:1)标定板上有许多标准圆斑,其圆心可作为理想的测量点;2)标定板具有微米级的精度,确保了测量结果的可靠性。实验中利用 Matlab 软件对圆斑进行处理,如图 3 所示。首先采用经典的边缘检测算法提取圆斑的边缘,然后利用最小二乘法对检测到的边缘进行圆拟合,得到圆斑的圆心坐标。最后计算出该圆斑圆心的实际空间坐标。

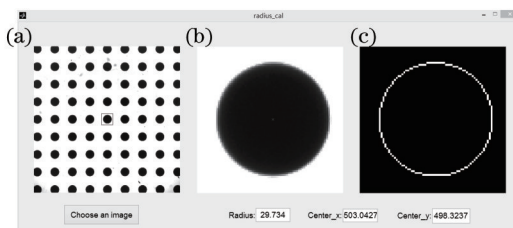


图 3 (a) 标定板图像; (b) 边缘检测结果; (c) 拟合圆

Fig.3 (a) Picture of calibration plate; (b) edge detection result; (c) fitting circle

以光轴方向为 z 轴,垂直方向为 y 轴,水平方向为 x 轴,在光学系统中建立空间直角坐标系。取物体上任意点 A 为测量点,设物体移动前,测得 A 点在 xy 平面的坐标为 (x_1, y_1) ;物体沿光轴平移距离 L 后,测得 A 点的坐标为 (x_1', y_1') 。则远心度可近似定义为

$$\alpha_{(x,y)} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_1')^2 + (y_1 - y_1')^2}}{L} \quad (3)$$

利用(3)式即可计算出各圆斑圆心对应视场处的远心度大小。实验结果如图 4 所示,其中横坐标表示视场中的某一点到光轴的距离(视场半径)。

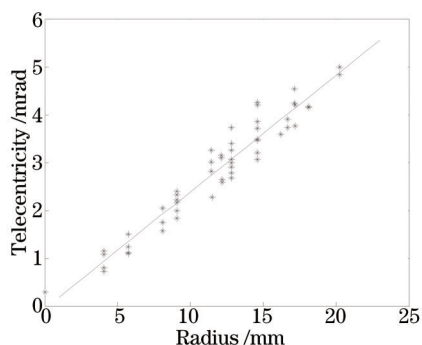


图 4 远心度与视场半径的关系

Fig.4 Relationship between telecentricity and radius of visual field

由于在远心镜头视场中,某一点到光轴的距离与该点处的远心度在理论上呈正切关系,而远心度一般很小,因此可近似认为远心度与视场半径之间的关系为线性。对图 4 中的离散点进行直线拟合得到其方程为

$$\alpha = 0.2435r - 0.0516, \quad (4)$$

式中 α 为远心度, r 为视场半径。

在测得镜头远心度后,即可对平行性误差进行计算。为此,对一颗长约9.4 mm,直径约1.9 mm的螺丝钉进行了长度测量。实验中将螺丝钉垂直放置于光学视场中,并调整位移台使螺丝钉底部位于光轴附近。通过沿光轴平移螺丝钉得到不同测量距离下的平行性误差。实验测得的平行性误差与理论计算得到的平行性误差如表1所示。

表1 平行性误差的理论值与实验值对比

Table 1 Comparison of theoretical and experimental values of parallelism error

Distance between screw and lens/mm	Parallelism error / μm		
	Theoretical value	Experimental value	Relative error
101.6	17.3	16.6	-0.7
105.6	8.3	7.1	-1.2
109.6	-0.6	1.3	1.9
113.6	-9.6	-7.0	2.6
117.6	-18.5	-17.3	1.2

从表1的数据可以看出,实验结果与理论计算结果基本吻合。

2.3 实验及分析

采用的测量系统为双远心光学系统,该系统利用了远心镜头特有的平行光路进行设计。双远心镜头具有低畸变、放大倍率一致等优点,可以实现近乎零失真、无透视误差的高分辨率成像,在机器视觉中被广泛应用。双远心光学系统结构如图5所示,平行光源发出平行光,经过待测物体后入射到双远心镜头,最后成像于电荷耦合器件(CCD)的感光面上。由于采用平行光源,图像中的阴影将十分精确地反映该物体的外轮廓。

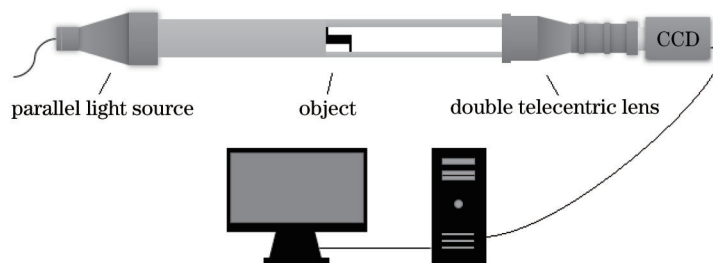


图5 远心成像光学系统结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of telecentric imaging optical system

实验前利用标定板测定视场中光轴的大概位置,并通过调节实验装置,使物体沿光轴平移时,其在光轴附近的像点的坐标基本不变。实验中将标定板置于最佳成像面,并对采集的图像进行误差校正,得到校正量。将标定板朝双远心镜头平行移动6 mm,重新采集图像,利用前面得到的校正量对此图像进行初步的校正。此时,第二幅图像中的误差均为平行移动引入的新误差。实验测得的第二幅图像上7行7列共49个圆斑的误差值如表2所示。

表2 待测物平移产生的测量误差

Table 2 Measurement error caused by sample translation

Column \ Row	1	2	3	4	5	6	7
1	17.39	13.48	10.55	9.96	9.87	11.88	12.91
2	13.51	9.96	7.57	6.67	7.37	8.24	12.55
3	11.76	8.20	3.13	1.66	5.65	6.54	10.22
4	12.44	8.36	3.34	0.47	4.33	6.65	9.96
5	14.26	9.96	5.91	4.51	5.87	8.03	10.99
6	16.90	12.44	8.32	9.30	9.85	10.37	13.64
7	18.77	17.31	14.18	13.98	12.96	15.48	15.09

对表2中的误差值进行平行性误差补偿,得到的结果如表3所示。

表3 除去光线平行性误差后的剩余误差

Table 3 Remanent measurement error after removing light parallelism error

Column Row	1	2	3	4	5	6	7
1	1.88	0.68	-0.20	0.18	-0.36	-0.04	-1.52
2	0.05	-0.25	0.09	0.65	0.65	-0.85	0.35
3	-0.50	-0.37	-1.88	-0.65	1.88	-0.66	-0.63
4	0.27	-0.08	-1.44	-1.28	0.87	-0.39	-0.79
5	1.06	0.09	-1.10	-0.91	-0.31	-0.68	-0.92
6	1.78	0.10	-1.87	0.12	0.20	-1.06	-0.37
7	1.12	1.97	0.50	1.03	-0.32	0.86	-1.63

从表2和表3可以看出,在物体偏离最佳成像面时,光线平行性是引入新误差的一个主要因素,占有新引入误差的90%左右。进行光线平行性补偿可以使平移导致的误差降到很低。因此,在选用远心镜头时,若考虑到成本因素无法购买具有低远心度的双远心镜头,通过后后期在测量结果上补偿平行性误差,同样可以改善测量精度。

3 待测物厚度对测量结果影响分析

对于薄片物体的检测,双远心光学系统具有很高的精度,这是由于当物体很薄并且位于最佳成像面时,成像十分清晰。然而实际应用中经常需要检测具有一定厚度的物体,此时图像中的物体边缘往往会比较模糊。导致边缘模糊的原因主要有两个:1)物体在纵深方向上具有厚度本身就意味着物体有很大一部分不在最佳成像面内;2)物体平行于光轴的外表面不一定十分平整光滑,可能存在一些凹凸不平,从而影响边缘灰度。

图6(a)为利用双远心光学测量系统对不同厚度标准块进行图像采集时得到的结果。可以看出,随着标准块厚度的增加,边缘模糊的现象将会越来越严重,这直接导致边缘检测误差。图6(b)为利用sobel边缘检测算法(阈值取为0.15)得到的这四个标准块的边缘检测结果。从图中可以看出,当标准块厚度为2、9、16 mm时,单个边缘点的检测误差约为 ± 1 pixel;而当标准块厚度为24 mm时,单个边缘点的检测误差约为 ± 2 pixel。即物体越厚,边缘越模糊,单个边缘点的检测误差越大。

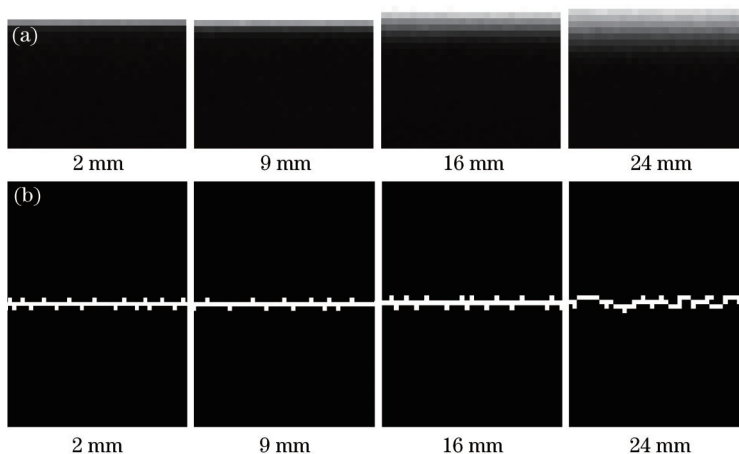


图6 不同厚度校准块的图像采集处理。(a)原始图片;(b)边缘检测结果

Fig.6 Image acquisition and processing of reference blocks with different thicknesses. (a) Original picture; (b) edge detection results

3.1 基于不同边缘检测算法的厚物体边缘提取

对图像进行边缘提取需要用到边缘检测算法,而算法的选取直接影响测量结果。目前常用的边缘检测算法有很多种,如roberts边缘检测算法、sobel边缘检测算法、prewitt边缘检测算法、LoG边缘检测算法、canny边缘检测算法等^[19-20]。

为对边缘检测结果有一个更加客观的分析,采用了上述边缘检测算法,并提出了一种专门针对水平边缘的垂直检测算法。垂直检测算法的执行流程如图7所示。

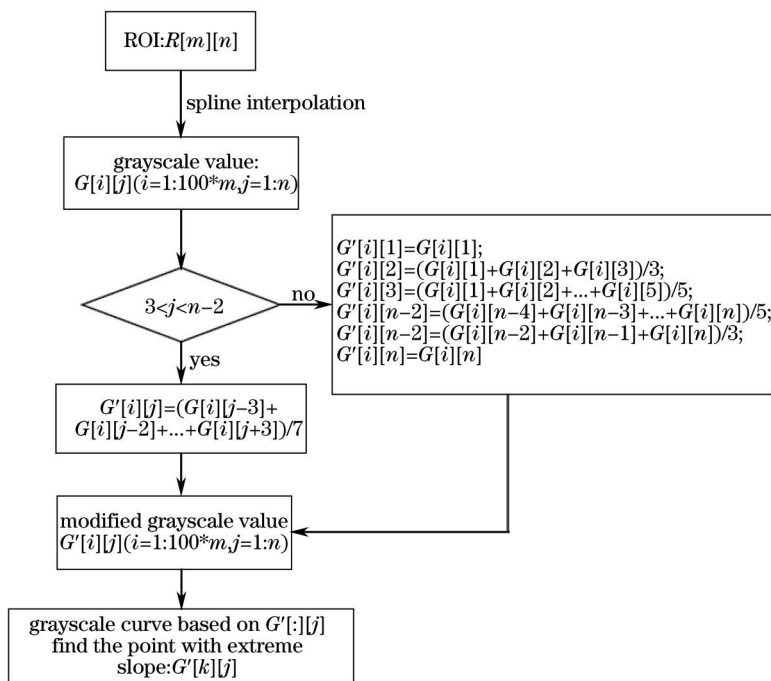


图 7 垂直检测算法流程图

Fig.7 Flowchart of vertical detection algorithm

具体检测步骤如下：

- 1) 选定图像中需要检测边缘的感兴趣区域(ROI),用二维数组 $R[m][n]$ 表示,其中, m 为行数, n 为列数；
- 2) 提取出每列像素点的灰度值,利用 spline 插值法对其进行插值处理,以达到亚像素级别,将结果存储在数组 $G[100*m][n]$ 中,其中, $G[i][j]$ 代表图像中第 j 列第 i 个亚像素点所对应的灰度值；
- 3) 对图像进行平滑处理,方法是在每列亚像素点上加上其两边紧邻的各 3 列亚像素点的灰度值并求取平均值,得到修正的灰度值,将结果存储于数组 $G'[100*m][n]$ 中。其中,起始 3 列和最后 3 列单独处理；
- 4) 根据上面得到的结果绘制每列亚像素点 $G'[:,j]$ 的灰度值曲线,并求取其斜率最大值(这里指绝对值,下同)。该斜率最大值对应的亚像素点 $G'[k][j]$ 即是所求的边缘点。

该算法无需设定阈值,所检测到的边缘点均在灰度曲线斜率最大处。

实验中对长度分别为 2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24 mm 的标准块进行了边缘检测。由于各标准块的宽度均为 9 mm,因此可以将各标准块 9 mm 宽度下检测到的上边缘作为参考值,将标准块不同长度下检测到的上边缘作为检测值。对实验得到的 46 幅图像分别采用不同的边缘检测算法进行处理,取检测值与对应参考值之差为物体厚度引起的边缘检测误差。最后对各边缘检测算法下得到的误差值进行 3 次曲线拟合,结果如图 8 所示(图中结果已经减去了实验平台转动导致的系统误差)。

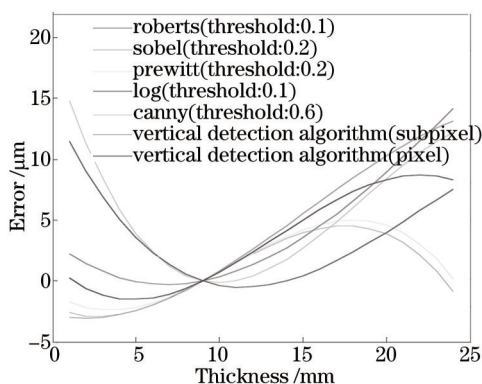


图 8 边缘检测误差与待测物体厚度关系的三次拟合曲线

Fig.8 Cubic fitting curve of edge detection error versus thickness of object

从图8可以看出,采用LoG算法、canny算法得到的结果与其他边缘检测算法得到的结果差别较大。这说明在对模糊边缘进行检测时,LoG、canny两种算法中采用的二阶导数算法并不适用,在边缘模糊问题并不严重的时候也会引入较大的误差。而其他几种边缘检测算法得到的结果显示,当物体厚度小于13 mm时,测量误差可以很好地控制在 $\pm 4 \mu\text{m}$ 内。因此,在对模糊边缘进行处理时应该尽量选择基于一阶导数的边缘检测算法。

3.2 算法改进

在物体厚度为7~15 mm范围内,当采用几种基于一阶导数的边缘检测算法时,测量误差会随待测物体厚度增大而增大且近似呈线性关系。这说明实际的边缘位置并非位于图像灰度变化的一阶导数最大处,因此需要设定新的边缘判定标准。

对此,提出一种基于图像灰度曲线的边缘补偿方法,以对原有算法进行改进。图9为实验采集到的图像中某一纵列像素点的灰度变化曲线,曲线已经过spline插值处理,达到亚像素级别。由于实验结果显示边缘越模糊,检测到的边缘点越偏离物体,因此需要加上一个偏向物体的修正量。A点为曲线斜率最大值对应点,将其作为基准进行修正。根据前面的结论,最简单的方法是做一个线性的补偿,具体步骤如下:

- 1) 对边缘点附近的灰度曲线拟合出一条直线,如图9中的直线1所示;

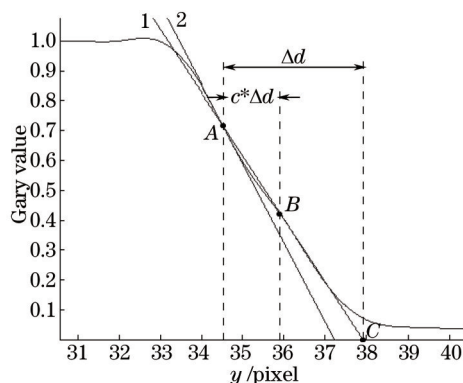


图9 灰度变化曲线

Fig.9 Grayscale curve

- 2) 令直线1与横轴交点为C点,求出其与A点的距离差 Δd ;
- 3) 在A、C之间选取一点B,使其与A点之间的距离差为 $c*\Delta d$,其中c为介于0和1之间的常数。通过取合适的c值,可以使B点接近实际的边缘点。

3.3 实验及分析

利用双远心光学测量系统,对圆柱体零件的上边缘进行检测。采用垂直检测算法得到的圆柱体上边缘如图10中的绿线所示。可以看出,从两端到中间,随着厚度的增大,边缘检测误差也逐渐增大。图10中蓝线为利用改进算法得到的边缘,该结果有效弥补了中间部分因图像模糊而导致的边缘检测误差。由于两边的边缘点也采用了改进的算法,会出现0.25 pixel值的下移,实验对改进算法下所得结果整体做了一个上移的修正,以便与垂直检测算法得到的边缘曲线做一个直观的比较。

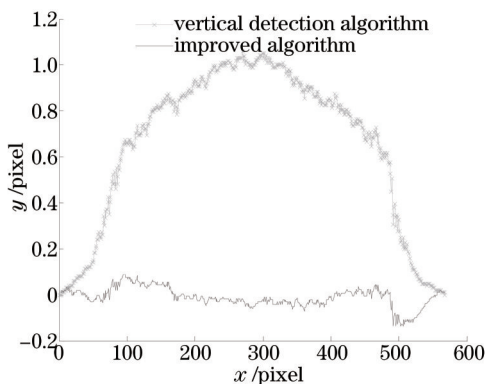


图10 圆柱体上边缘检测结果

Fig.10 Top edge detection result of cylinder

为验证该算法的实用性,以一个标准的圆柱体石英玻璃块为例,进行了高度测量,该玻璃块的实际高度为3.115 mm,直径为32 mm。实验中采集了10幅圆柱体的图像,分别采用3种方法对其进行测量,结果如表4所示。其中方法1是利用垂直检测算法得到圆柱的上边缘点,然后在两边各取总边缘点的1/8进行计算;方法2是利用垂直检测算法得到圆柱的上边缘点,然后在正中间取总边缘点的3/4进行计算;方法3是利用改进的检测算法得到圆柱的上边缘点,然后取所有边缘点进行计算。改进算法中所取常数 c 为0.25。

从表4可以看出,采用方法1和方法3得到的结果相差在2 μm 以内,且均与圆柱体玻璃块的实际厚度相差10 μm 以下。而采用方法2得到的结果则存在15~27 μm 的偏差,这说明物体厚度引起的边缘模糊对边缘检测结果有较大影响。虽然对于圆柱体可以用上述方法1来获得更加精确的结果,但是对于有一定厚度的长方体零部件,这种方法将不再适用。所提出的改进算法具有一定的普适性,有很大的参考价值。

表4 圆柱体玻璃块高度测量结果

Table 4 Height measurement results of cylinder glass block

Method	Height / mm										Mean	Standard deviation
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	3.1159	3.1131	3.1156	3.1130	3.1202	3.1172	3.1181	3.1174	3.1098	3.1206	3.1161	0.0032
2	3.1362	3.1302	3.1359	3.1344	3.1416	3.1356	3.1377	3.1349	3.1300	3.1422	3.1359	0.0038
3	3.1149	3.1130	3.1155	3.1130	3.1205	3.1177	3.1187	3.1178	3.1108	3.1217	3.1164	0.0033

4 结 论

主要对机器视觉测量中待测物体偏离最佳成像面以及纵深方向过厚两个影响测量精度的因素进行了研究,提出了可行的解决方案,并进行实验验证。实验结果表明这两个因素都会导致测量误差,由镜头远心度引起的平行性误差在物体偏离焦面所产生的误差中占绝大部分,通过计算镜头远心度可以将该部分误差消除,从而提高系统的测量精度;对于待测物体过厚导致边缘提取出现的偏差,基于传统的边缘检测算法进行了分析,并提出了一种基于灰度曲线的改进算法,使测量精度得到很大改善,为解决这一问题提供了一个可行的思路。

参 考 文 献

- 1 Lu Qinghua, Xu Chongchuan, Wang Hua, *et al.*. Research on dimension measurement of large size ceramic floor tiles based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312004.
卢清华, 许重川, 王 华, 等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312004.
- 2 Yuan Jiangtao, Yang Li, Wang Xiaochuan, *et al.*. Measurement and analysis of water mist droplet size based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2842-2847.
袁江涛, 杨 立, 王小川, 等. 基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2842-2847.
- 3 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision Geometric measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0315002.
张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0315002.
- 4 Lin Haibo. Research on high precision measurement technology of thin parts based on machine vision[J]. *Piezoelectrics&Acousto-optics*, 2015, 2: 044.
林海波. 基于机器视觉薄零件高精度测量技术的研究[J]. *压电与声光*, 2015, 2: 044.
- 5 Wang Jiwu, Zhang Xianwen, Gao Weijie, *et al.*. Study on the non-contact measurement accuracy of the rail head silhouette based on machine vision[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2014, 38(1):132-135.
王纪武, 张显文, 高伟杰, 等. 基于机器视觉的钢轨轨头非接触测量精度研究[J]. *北京交通大学学报:自然科学版*, 2014, 38(1): 132-135.
- 6 Ju Bo. High precision vision measurement equipment based on telecentric lenses[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 8, 203.
鞠 波. 基于远心镜头的高精度视觉测量仪[J]. *兵工自动化*, 2014, 8, 203.
- 7 HaoFei, Shi Jinfei, Zhu Songqing, *et al.*. Optimal positioning of forward installed square led arrays for machine vision system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215001.

- 郝 飞, 史金飞, 朱松青, 等. 机器视觉系统前置矩形LED阵列的优化布置[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215001.
- 8 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412004.
- 潘 兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- 9 Watanabe M, Nayar S K. Telecentric Optics for Computational Vision[M]. Heidelberg: Springer, 1996: 439-451.
- 10 Li Y, Ohmura I, Takauji H, *et al.*. Robust focusing using orientation code matching[J]. Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis, 2008, 7(3): 101-114.
- 11 You Qing. Telecentric lens and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1998, (12): 25-27.
- 友 清. 远心透镜和应用[J]. 激光与光电子学进展, 1998, (12): 25-27.
- 12 Tian Yuanyuan, Huang Hecheng, Tan Qingchang, *et al.*. Size measurement of parts based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, (1): 82-90.
- 田原媛, 黄合成, 谭庆昌, 等. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2010, (1): 82-90.
- 13 Gao Shiyi, Zhao Mingyang Zhang Lei, *et al.*. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on zernike orthogonal moments[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1163-1168.
- 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, 34(9):1163-1168.
- 14 Zhang Yonghong, Hu Dejin, Zhang Kai, *et al.*. Gray moment operators for subpixel edge detection on CCD images[J]. Optical Technique, 2004, 30(6): 693-687.
- 张永宏, 胡德金, 张 凯, 等. 基于灰度矩的CCD图像亚像素边缘检测算法研究[J]. 光学技术, 2004, 30(6): 693-695.
- 15 Ma Rui, Zeng Li, Lu Yanping. Improved sub-pixel edge detection method based on facet model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 296-302.
- 马 睿, 曾 理, 卢艳平. 改进的基于Facet模型的亚像素边缘检测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 296-302.
- 16 Ding Xinghao. Sub-pixel edge detection based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 801-804.
- 丁兴号. 基于小波变换的亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8):801-804.
- 17 Michalski J. What is telecentricity[J]. Technical Article, Edmund Scientific, 2002.
- 18 Shi S, Cao Y, Huang Z, *et al.*. Measurement technique of telecentricity for the illumination system in the 193 nm photolithography[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17):3079-3084.
- 19 Zeng Huan, Wang Hao. Comparison and analysis for performance of image edge detection algorithms[J]. Modern Electronics Technique, 2006, 29(14): 53-55.
- 曾 欢, 王 浩. 图像边缘检测算法的性能比较与分析[J]. 现代电子技术, 2006, 29(14): 53-55.
- 20 Li Yaya, Li Zhijie, Zheng Haixu, *et al.*. Comparison and implementation of image edge detection algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(9): 1971-1975.
- 李娅娅, 李志洁, 郑海旭, 等. 图像边缘检测算法的比较与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(9): 1971-1975.

栏目编辑: 苏 岑