

基于最大内切圆的椭圆孔组检测

宦海, 黄凌霄*, 张雨, 卢松

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044)

(*通信作者电子邮箱 694668798@163.com)

摘要:针对当前一些椭圆孔组工件检测成本高、时效低等问题,提出了一种基于最大内切圆的椭圆孔组检测方法。首先对椭圆孔组图像进行去噪、二值化和边缘检测等预处理;再根据椭圆的几何性质,结合椭圆中心估计方法和最值距离选取方法,求出椭圆最大内切圆,从而确定椭圆的中心坐标、长短轴长和倾斜角。实验数据表明,该方法能对椭圆孔组进行快速精确检测,在估计出椭圆中心的基础上能快速截取有效椭圆弧,大幅减少无效采样;与基于中心估计 Hough 椭圆检测算法和基于最小二乘改进椭圆检测算法相比,具有耗时短、精度高等优点,可有效应用于椭圆孔组工件的自动化检测。

关键词:机器视觉;边缘检测;中心估计;最大内切圆;椭圆检测

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Detection of elliptical hole group based on maximum inscribed circle

HUAN Hai, HUANG Lingxiao*, ZHANG Yu, LU Song

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: In view of the high cost and low effectiveness of current detection methods for some elliptic hole group workpieces, an elliptic hole group detection method based on maximal inscribed circle was proposed. Firstly, the image was preprocessed by denoising, binaryzation and edge detection. According to the geometric properties of ellipse, the ellipse's maximal inscribed circle was calculated by using the ellipse center estimation method and the distance selection method. Then, the center coordinates of the ellipse, the length of long and short axes and the inclination angle were determined. The experimental results show that the proposed method can quickly and accurately detect the elliptic hole group, and can quickly intercept effective ellipse arc based on the estimation of the center of the ellipse, then the invalid samples are reduced; compared with the Hough ellipse detection algorithm based on center estimation and the ellipse detection algorithm based on the improved least square method, it has the advantages of high precision, short time consumption, and can be effectively applied to automatic detection of elliptical hole group workpieces.

Key words: machine vision; edge detection; center estimation; maximum inscribed circle; ellipse detection

0 引言

在机械零件加工过程中,对生产的零件的尺寸规格进行检测是不可缺少的一个环节。传统的检测方法有综合量规测量和三坐标机检测。但是,综合量规测量检验对被测孔组的实际尺寸和形状的检测灵敏度不高;三坐标机检测对操作人员有较高的技术要求,而且成本较高。随着科技水平的不断提高,机器视觉技术被逐步运用到工业、医疗等领域的在线检测中^[1-3]。对于椭圆工件的机器视觉处理,研究人员不断地从多种方面进行探索,比如:通过利用椭圆的对称性、弦中点、梯度信息等几何性质^[4-10],预先筛选出反映椭圆部分参数的特征点,结合后续采样点计算出椭圆各参数,但是利用几何特征和梯度信息来检测椭圆,其检测精度容易受图像背景噪声的干扰。利用随机 Hough 变换及其改进方法^[11-12],通过随机采样和动态链表存储计算获取椭圆参数信息,而随机 Hough 变换存在着因采样点的随机性而造成参数空间的无效累积等

不足。文献[13]利用归一化方法改进最小二乘法拟合检测椭圆,但改进的最小二乘拟合算法存在着因多次重复迭代计算和易发生误采样等问题而降低了算法的检测精度和效率。

为了研究平行切面的三维重建,文献[14]利用逐层去除边缘和最值距离选取法提取出血管切片的最大内切圆,但这种算法需要重复多次去除边缘,占用内存较大,耗时较长,且该最值距离选取法被应用于平行切面的三维重建,尚未在椭圆检测中得到运用。

针对上述椭圆工件检测方面的不足,本文利用椭圆及其伴随圆相关性质,结合椭圆中心估计方法和最值距离选取方法,提出一种新的椭圆检测方法,即基于最大内切圆的椭圆检测算法(Ellipse Detection Algorithm based on Maximum Inscribed Circle, EDAMIC)。将此椭圆检测算法应用于孔组检测,对椭圆工件实物进行了实验。经过实验证明,该方法能有效提高椭圆检测的精度与效率,能够实现椭圆孔组工件的自动化检测。

收稿日期:2014-12-24;修回日期:2014-12-22。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61308072)。

作者简介:宦海(1978-),男,江苏南京人,副教授,博士,主要研究方向:光学测量、信息处理; 黄凌霄(1991-),男,江苏溧阳人,硕士研究生,主要研究方向:特征提取、图像处理; 张雨(1988-),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向:光学测量、信息处理; 卢松(1989-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:光学测量、信息处理。

1 图像预处理

由于基于机器视觉的零件检测在图像采样过程中会存在噪声,这对零件图像的后期检测精度与耗时上都会造成一定的误差。所以,在对孔组工件的图像样品进行相关尺寸测量之前,先要最大限度地减少噪声(为减小噪声,采用中值滤波法和形态学开运算相结合的方法);其次,对去噪后的图像作二值化和边缘检测,采用 Canny 检测算子。

2 检测原理

对于椭圆及其伴随圆有一个重要的性质,即椭圆内必存在一个最大内切圆,且最大内切圆圆心即为椭圆中心,半径即为椭圆短半轴。因此,只需计算出待测椭圆的最大内切圆,即可确定椭圆的中心点位置、短半轴。再在此基础上计算出椭圆的倾斜角和长半轴。

首先,对于理想椭圆,总存在一条水平扫描中点线 $l_{A_1A_2}$ 和一条垂直扫描中点线 $l_{B_1B_2}$,且这两条中点线在椭圆内必有一个交点,该交点即为椭圆中心点(见图1~2)^[8]。根据椭圆的对称性,进一步可知,该交点平分线段 $|A_1A_2|$ 和 $|B_1B_2|$ 。

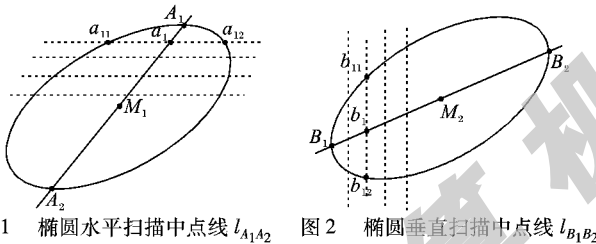


图1 椭圆水平扫描中点线 $l_{A_1A_2}$ 图2 椭圆垂直扫描中点线 $l_{B_1B_2}$

利用椭圆的这一性质,计算出每条水平扫描线与椭圆的两个交点 a_{i1} 、 a_{i2} ,将 $|a_{i1}a_{i2}|$ 中点 a_i 放入集合 S 中。

$$S = \{a_1, a_2, \dots, a_i\} \quad (1)$$

其中:

$$a_i = \frac{a_{i1} + a_{i2}}{2}; i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

通过最小二乘拟合得到水平扫描中点线 $l_{A_1A_2}$,同理得到垂直扫描中点线 $l_{B_1B_2}$ 。需要指出的是,考虑到图像背景噪声的干扰,为减小误差,取 $|A_1A_2|$ 和 $|B_1B_2|$ 各自的中点 M_1 、 M_2 ,以 M_1 、 M_2 为直径取区域圆 C_1 ,将 C_1 内的所有像素点 (i, j) 记为集合 T 。这样,就可以大致确定椭圆中心点位于圆 C_1 内。

其次,对于任意倾斜角的椭圆,根据椭圆对称性及其最大内切圆性质可知,过椭圆中心的水平直线必交椭圆于两个点,以这两个点为直径,椭圆中心为圆心的特征圆必交椭圆于四个点 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 ,即这个特征圆 C_2 内包含椭圆的两段弧 $\widehat{P_3P_4}$ 、 $\widehat{P_5P_6}$,且椭圆短轴端点 N_1 在这两段弧上(见图3)。将两段弧上所有像素点 (m_k, n_k) 记为集合 $S_w (w = 1, 2, \dots, k)$ 。

集合 T 内任取一点 (i, j) 到集合 $S_w (w = 1, 2, \dots, k)$ 的距离为:

$$d = \sqrt{(i - m_k)^2 + (j - n_k)^2} \quad (3)$$

记录下这些距离中的最小值 d_{\min} 及点 (i, j) ,遍历集合 T 内每一点,将每一点及其对应的距离最小值记入集合 H ,筛选出集合 H 内的最大值 $\max\{d_{\min}\}$, $\max\{d_{\min}\}$ 即为所求最大内切圆半径 r ,其对应点 (i, j) 就是圆心(见图4)。其中,当椭圆倾斜角为 0° 或 90° 时,由于特征圆与椭圆只有两个交点,此时

需遍历计算集合 T 内点到椭圆边界所有点的距离。

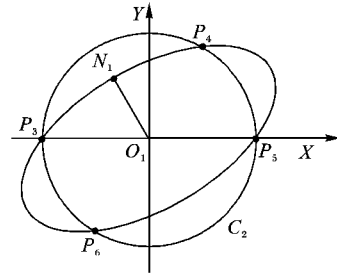


图3 特征圆 C_2 截取椭圆弧

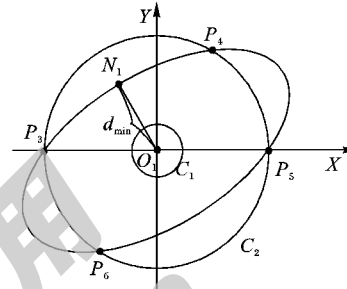


图4 圆 C_1 内的每个点到椭圆弧边界点的最小距离 d_{\min}

再通过计算最大内切圆与椭圆的交点 $N_1(x_1, y_1)$, $N_2(x_2, y_2)$,从而确定椭圆倾斜角 θ 和椭圆短轴所在直线 $l_{N_1N_2}$ 。

$$\theta = \arctan\left(-\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (4)$$

$$l_{N_1N_2}: \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

将 $|N_1N_2|$ 等分成若干份,分别求出其对应垂直线与椭圆两侧的交点,计算两交点的欧氏距离。将若干欧氏距离值通过拟合求出距离最大值 d_{\max} ,即为椭圆长轴。

利用椭圆水平扫描中点线和垂直扫描中点线估计出的椭圆中心点只需知道其大致所在区域。通过估计中心点位置及截取椭圆弧,减少最小值距离选取时所需遍历计算的对象,避免重复多次遍历椭圆上的所有点,从而大大降低方法计算过程的时空消耗。

3 本文算法流程

第1步 预处理。首先对图像进行去噪,然后进行二值化,再进行边缘检测。

第2步 对预处理后的图像进行图像分块处理,并对分块后每一块区域进行第3~13步。

第3步 计算椭圆水平扫描线,并将第 i 条水平扫描线与椭圆交点 a_{i1} 、 a_{i2} 计入集合 S 。

第4步 计算 S 集合内所有 $|a_{i1}a_{i2}|$ 的中点 a_i ,通过最小二乘拟合得到水平扫描中点线,并求出水平扫描中点线与椭圆的交点 A_1 、 A_2 ,计算线段 $|A_1A_2|$ 的中点 M_1 (见图1)。

第5步 按第3~4步的方法求出垂直扫描中点线与椭圆的交点对应的中点 M_2 (见图2)。以 $|M_1M_2|$ 中点 O_1 为圆心, $|M_1M_2|$ 为直径取圆 C_1 。

第6步 求出过点 O_1 的水平直线与椭圆的交点 P_1 、 P_2 。以 O_1 为圆心, $\max\{|O_1P_1|, |O_1P_2|\}$ 为半径作圆 C_2 ,依次记交椭圆于点 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 (见图3)。

第7步 以弧长 $\widehat{P_3P_4}$ 和 $\widehat{P_5P_6}$ 为范围,利用式(3)计算圆 C_1 内的每个点到该范围内的椭圆边界点的最小距离 d_{\min} ,并记入集合 H (见图4)。

第8步 若圆 C_2 与椭圆只有一个或两个交点时,则计算圆 C_1 内的每个点到椭圆所有边界点的最小距离 d_{\min} ,并记入集合 H 。若圆 C_2 与椭圆只有三个交点且其中两个交点在点 O_1 右侧,则认为 P_3 和 P_4 点重合;若圆 C_2 与椭圆只有三个交点且其中两个交点在点 O_1 左侧,则认为 P_5 和 P_6 点重合。执行第7步。

第9步 求出集合 H 内的 $\max\{d_{\min}\}$,及 $\max\{d_{\min}\}$ 对应的 C_1 内的点 O 。

第10步 以 O 为中心, $\max\{d_{\min}\}$ 为半径,作圆交椭圆于 N_1, N_2 两点,此圆即为椭圆最大内切圆, $|ON_1|$ 即为椭圆短半轴长。利用式(4)~(5)分别求得椭圆倾斜角 θ 和椭圆短轴所在直线 $l_{N_1N_2}$ 。

第11步 取 $K_j(j=1,2,\dots,n)$ 点将 $|N_1N_2|$ 等分成 $j+1$ 份,过 K_j 作 $|N_1N_2|$ 的垂线交椭圆与 D_{j1}, D_{j2} , 计算 $|D_{j1}D_{j2}|/2$, 记为 d_j ,将 $\{K_j, d_j\}$ 计入集合 Q (如图5所示)。

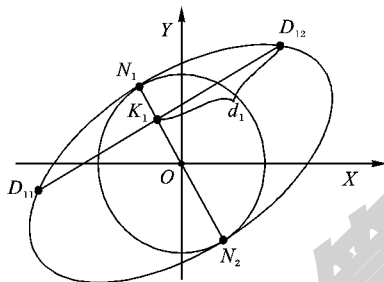


图5 $|N_1N_2|$ 过 K_j 的垂线与椭圆的交点 D_{j1} 和 D_{j2}

第12步 对集合 Q 内的元素 $\{K_j, d_j\}$ 利用最小二乘拟合,求得 $\{K_j, d_j\}$ 对应函数的最大值 d_{\max} ,从而求得椭圆长半轴长。

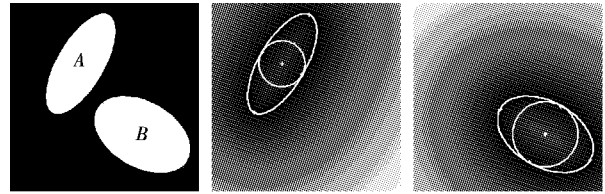
第13步 返回第3步,直至遍历结束。

4 实验与分析

为了验证本文算法的优越性,利用 Matlab 编程进行了一系列实验。实验分别通过人工合成图像与带背景噪声的实际图像,与基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法^[8]和基于最小二乘改进椭圆检测算法^[13]进行比较。

图6 是 Matlab 生成的图像及本文算法检测结果。图6(a)为 Matlab 生成的图像,其中:左上方为中心点坐标 (x_0, y_0) 为(130,250),长半轴 a 为140,短半轴 b 为60,倾斜角 θ 为 60° 的椭圆A;右下角为中心点坐标 (x_0, y_0) 为(280,

120),长半轴 a 为110,短半轴 b 为70,倾斜角 θ 为 -30° 的椭圆B。以图像左下角为原点,水平向右为横坐标,垂直向上为纵坐标建立坐标系作参考。图6(b)、(c)为通过本文算法检测的结果图,其中心点表示检测到的椭圆中心点,左右两侧的点表示检测到的椭圆长轴端点,上下两侧的点表示检测到的椭圆短轴端点,椭圆中的圆为算法检测到的椭圆最大内切圆。



(a) Matlab生成图像 (b) 椭圆A的检测结果 (c) 椭圆B的检测结果

图6 Matlab 生成的图像及本文算法检测结果

表1 给出了图6中椭圆的实际位置与算法检测得到的结果参数的比较。从表1可看出,对于人工合成图像,在检测精度上,EDAMIC 优于其他两种算法;在检测效率上,EDAMIC 与基于最小二乘改进的椭圆检测算法相接近,但明显优于基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法。

图7 为一块椭圆标准工件实物图,从中分别截取的一部分作为本文实验用图(实验中以截取图像的左下角为原点,水平向右为横坐标,垂直向上为纵坐标建立坐标系作参考)。通过计算该工件的实际长度和对应的像素值,将实际长度值除以像素值,得到测量的标定系数为 0.2118 mm/pixel 。实验采用多次测量取平均值的方法作为每种方法的测量结果,将每种方法测得的像素值乘以标定系数,得到椭圆的实际值。

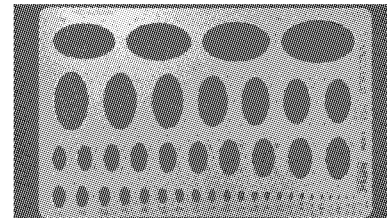


图7 椭圆标准工件实物图

图8 是水平椭圆孔组工件部分图及本文算法检测结果。椭圆C的实际尺寸为长半轴 a 为23.5 mm,短半轴 b 为13.675 mm,倾斜角 θ 为 0° 。

图9 是垂直椭圆孔组工件部分图及检测结果。该图中:左边椭圆D的实际尺寸为长半轴 a 为21.1 mm,短半轴 b 为12.3 mm,倾斜角 θ 为 90° ;右边椭圆E的实际尺寸为长半轴 a 为19.85 mm,短半轴 b 为11.575 mm,倾斜角 θ 为 90° 。

图10 是倾斜椭圆孔组工件部分图及检测结果。将图7中的椭圆工件旋转任意角度(实验中取旋转角为逆时针旋转

表1 Matlab 生成的图像(图6)中椭圆的实际位置与检测结果比较

算法	椭圆	$x_0/\text{像素}$	$y_0/\text{像素}$	$a/\text{像素}$	$b/\text{像素}$	$\theta/(^\circ)$	总耗时/s
实际位置	A	130.0000	250.0000	140.0000	60.0000	60.0000	
	B	280.0000	120.0000	110.0000	70.0000	-30.0000	
本文算法	A	128.7500	248.6667	139.4151	59.0762	60.2248	0.7568
	B	279.8333	120.0417	108.9340	69.0652	-29.5828	
基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法	A	127.7450	252.7500	138.7552	59.0000	58.5411	1.0707
	B	279.0000	120.0000	109.0241	69.0000	-32.4510	
基于最小二乘改进的 椭圆检测算法	A	129.2511	249.3100	140.2052	59.3244	59.2178	0.6985
	B	281.0130	119.5410	109.5524	70.2040	-31.0561	

60°)并取样,得到新的待测椭圆,如图 10(a)所示。其中:左下方椭圆 F 的实际尺寸为长半轴 a 为 21.75 mm,短半轴 b 为 12.7 mm,倾斜角 θ 为 -30° ;右上方椭圆 G 的实际尺寸为长半轴 a 为 21.1 mm,短半轴 b 为 12.3 mm,倾斜角 θ 为 -30° 。实验中,由于工件旋转后取得到的图像像素也随之发生了改变,所以需要重新进行系数标定。经过测量,得到标定系数为 0.265 3 mm/pixel。

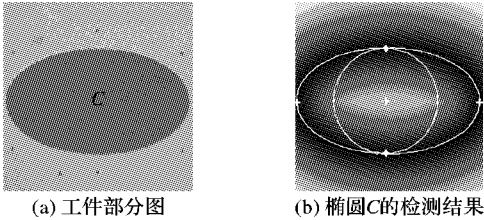


图 8 水平椭圆孔组工件部分图及本文算法检测结果

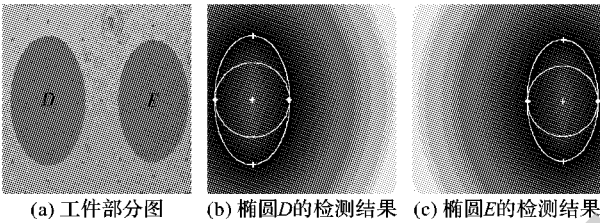


图 9 垂直椭圆孔组工件部分图及本文算法检测结果

表 2~4 为不同椭圆的实际位置与算法检测得到的结果参数的比较,从中可看出,对于带背景噪声的实际图像,总体而言,本文算法能够很好地检测出待测椭圆的各个参数,与基于中心估计的 Hough 椭圆检测法相比,具有更好的检测精度,

同时检测时间更短,检测效率提高了约 47%。同时,与基于最小二乘改进的椭圆检测法相比,两者检测耗时较为接近,但本文算法的检测精度提高了约 33%。

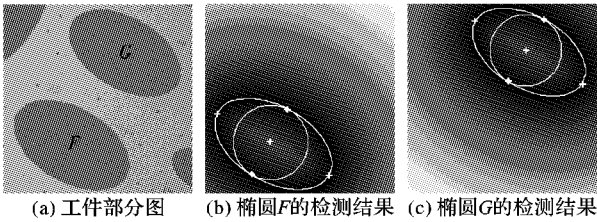


图 10 倾斜椭圆孔组工件部分图及检测结果

对于实验中产生的误差,主要有以下几个原因:

1)拍摄时的光照强度、相机分辨率等环境因素,对实验图像的预处理阶段造成影响。

2)由于计算机读取的图像是由若干个小正方形的像素点组成,实际中一条连续的曲线,在计算机程序中进行处理时是被认为由若干个相邻的像素点组成的近似曲线,导致算法在检测图像上两点之间的距离时造成一定的误差。这个误差是由计算机硬件决定的,是固有存在的。

在执行算法实验时,上述几点因素都会对算法后续的估计中心位置,确定最大内切圆以及计算椭圆各参数造成一定的影响。

5 结语

基于椭圆最大内切圆性质和机器视觉技术,提出了一种新的椭圆孔组检测方法,实现了对椭圆孔组零件的定位和尺寸检测。通过对图像进行二值化、去噪和边缘检测等预处理,

表 2 水平椭圆孔组工件部分图(图 8)中椭圆的实际位置与检测结果比较

算法	x_0/mm	y_0/mm	a/mm	b/mm	$\theta/(\circ)$	总耗时/s
实际位置	22.3000	22.4500	23.4000	13.6750	0.0000	
本文算法	23.0618	22.4416	23.0862	13.1589	-0.2138	0.7178
基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法	24.1099	24.8159	22.5952	12.3550	1.2006	1.5717
基于最小二乘改进的椭圆检测算法	23.2245	23.3381	24.1184	13.8477	0.8650	0.6448

表 3 垂直椭圆孔组工件部分图(图 9)中椭圆的实际位置与检测结果比较

算法	椭圆	x_0/mm	y_0/mm	a/mm	b/mm	$\theta/(\circ)$	总耗时/s
实际位置	D	14.4000	29.2800	20.9000	12.2000	90.0000	
	E	47.5000	28.8000	19.8500	11.3800	90.0000	
本文算法	D	14.3495	29.2284	20.2269	11.6798	90.0000	0.9595
	E	47.4432	28.8048	19.0620	11.0217	90.0000	
基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法	D	14.1906	29.0166	20.1254	11.6490	88.7939	1.6691
	E	47.2844	29.0166	18.8539	11.1195	88.8736	
基于最小二乘改进的椭圆检测算法	D	15.1520	30.1550	21.3527	12.7504	89.3411	1.0782
	E	46.9450	28.4452	20.2142	11.6031	90.4714	

表 4 倾斜椭圆孔组工件部分图(图 10)中椭圆的实际位置与检测结果比较

算法	椭圆	x_0/mm	y_0/mm	a/mm	b/mm	$\theta/(\circ)$	总耗时/s
实际位置	F	22.3500	16.7100	21.4500	12.7000	-30.0000	
	G	40.2900	47.7500	20.9000	12.2000	-30.0000	
本文算法	F	22.0597	16.8598	21.4328	12.5787	-29.7308	0.9879
	G	40.1266	47.7319	21.0446	12.0675	-30.0880	
基于中心估计的 Hough 椭圆检测算法	F	23.4127	16.4486	21.2259	12.0712	-30.0132	1.8603
	G	41.6521	47.8867	20.5008	10.8773	-29.8828	
基于最小二乘改进的椭圆检测算法	F	23.3418	17.1450	21.9132	12.2335	-30.2410	1.1531
	G	40.8612	47.3182	21.2240	11.8624	-30.4475	

再根据椭圆的几何性质,求出椭圆最大内切圆,从而确定椭圆的短轴和中心坐标,进一步确定椭圆的长轴与倾斜角,实现椭圆孔组的快速精确定位。与基于中心估计的 Hough 椭圆检测法和基于最小二乘改进的椭圆检测法相比,该算法具有更好的检测精度和更短的检测时间。与传统的椭圆孔组工件检测方法相比,该方法耗时短、精度高,既能减轻工人工作强度,又能降低生产成本,可有效应用于椭圆孔组工件的自动化检测。

参考文献:

- [1] XU D, GUO W, GE X. Wireless alarm system for transfusion security[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science, 2013, 5(6): 548–552. (徐冬冬, 郭薇, 葛小宇. 无线输液报警系统设计[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5(6): 548–552.)
 - [2] TIAN X. Based on image recognition method for the measurement of geometric parts[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2009. (田小娟. 基于图像识别的零件几何量检测[D]. 西安: 西安工业大学, 2009.)
 - [3] YANG Y. Research on the geometric dimension detection method of mechanical parts based on image processing[D]. Chengdu: Xihua University, 2011. (杨益. 基于图像处理的机械零件几何尺寸检测方法研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.)
 - [4] ZHU J. Ellipse detection with major axis estimation[J]. Application of Computer System, 2009, 18(12): 79–82. (祝建中. 利用长轴估计的椭圆检测方法[J]. 计算机系统应用, 2009, 18(12): 79–82.)
 - [5] LYU H, YAO Z, YI W. The least square fitting ellipse detection algorithm based on symmetry[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(5): 37–41. (吕洪赫, 姚振杰, 易卫东. 基于对称性的最小二乘拟合随机椭圆检测算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(5): 37–41.)
 - [6] YU H, LIU J, LIU Y. 1-D RHT method based on symmetry point searching for ellipse detection[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(8): 1830–1834. (于海滨, 刘敬彪, 刘圆圆. 基于对称点搜索的一维 RHT 在椭圆检测中的应用[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1830–1834.)
 - [7] YU H, LIU Y, CHEN K. A 1-D RHT method for ellipse detection based on symmetry point searching[C]// Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization. Piscataway: IEEE Press, 2009: 902–904.
 - [8] ZHU J. Ellipse detection based on center estimation[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(4): 65–68. (祝建中. 基于中心估计的椭圆检测[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(4): 65–68.)
 - [9] XIAO P, ZHAO G, CHEN Y. An algorithm for ellipse detection based on geometry[C]// Proceedings of the 2009 Chinese Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1–4.
 - [10] WEI H, ZHANG J, SONG X, *et al.* A method for ellipse detection based on edge-tracking and Hough transformation[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 33(3): 133–136. (韦宏强, 张建伟, 宋晓辉, 等. 基于边界跟踪及 Hough 变换的椭圆检测算法[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2010, 33(3): 133–136.)
 - [11] ITO Y, OGAWA K, NAKANO K. Fast ellipse detection algorithm using Hough transform on the GPU[C]// Proceedings of the 2011 Second International Conference on Networking and Computing. Piscataway: IEEE Press, 2011: 313–319.
 - [12] HAN F, GUO Y, WANG L. A new ellipse detector based on Hough transform[C]// Proceedings of the 2009 Second International Conference on Information and Computing Science. Piscataway: IEEE Press, 2009: 301–305.
 - [13] MA X, LI H, LIU L, *et al.* The improved algorithm in least square and ellipse fitting application[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 35(3): 18–21. (马向南, 李航, 刘丽丽, 等. 最小二乘改进算法及其在椭圆拟合中的应用[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2014, 35(3): 18–21.)
 - [14] LI W, ZHOU Z, YAN C. Research on algorithm for solving maximum inscribed circle of image[J]. Journal of Engineering Graphics, 2006, 27(2): 117–121. (李伟, 周朝晖, 严承华. 图像最大内切圆求解算法的研究[J]. 工程图学学报, 2006, 27(2): 117–121.)
-
- (上接第 1100 页)
- [6] RUI Y, HUANG T, ORTEGA M, *et al.* Relevance feedback: a power tool for interactive content-based image retrieval[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1998, 8(5): 644–655.
 - [7] RUI Y, HUANG T, MEHROTRA S. Content-based image retrieval with relevance feedback in MARS[C]// Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Press, 1997: 815–818.
 - [8] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]// Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 1999: 1150–1157.
 - [9] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91–110.
 - [10] BEIS J S, LOWE D G. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces[C]// Proceedings of the 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 1997: 1000–1006.
 - [11] BENTLEY J L. Multidimensional binary search trees used for associative searching[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(9): 509–517.
 - [12] TOMMASI T, CAPUTO B, WELTER P, *et al.* Overview of the CLEF 2009 medical image annotation track [C]// CLEF 2009: Proceedings of the 10th Workshop of the Cross-Language Evaluation Forum. Piscataway: IEEE Press, 2010: 85–93.
 - [13] LEHMANN T M, SCHUBERT H, KEYSERS D, *et al.* The IRMA code for unique classification of medical images[EB/OL]. [2010-10-10]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.72.665&rep=rep1&type=pdf>.
 - [14] GULD M O, KEYSERS D, DESELAERS T, *et al.* Comparison of global features for categorization of medical images[C]// Proceedings of the 2004 Medical Imaging. [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2004: 211–222.
 - [15] MUEEN A, BABA M S, ZAINUDDIN R. Multilevel feature extraction and X-ray image classification[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7(8): 1224–1229.
 - [16] ASHLEY J J, BARBER R, FLICKNER M D, *et al.* Automatic and semiautomatic methods for image annotation and retrieval in Query By Image Content (QBIC) [C]// Proceedings of SPIE 2420. Bellingham: SPIE Press, 1995: 24–35.
 - [17] EAKINS J P, SHIELDS K, BOARDMAN J. ARTISAN: a shape retrieval system based on boundary family indexing[C]// Proceedings of SPIE 2670. Bellingham: SPIE Press, 1996: 17–28.