

文章编号: 0253-2239(2004)08-1115-5

一种快速检测圆的抗干扰变形模板方法*

于新瑞 王石刚 关柏青 王颖峰

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘要: 提出了一种新的参量式变形模板方法,用于检测带有缺陷和噪声的圆。根据圆的几何形状特性和梯度信息定义了模板的能量函数。然后通过动态调整模板的参量使能量函数和图像进行交互以把能量函数最大化。根据能量函数的定义,在其取得最大值时的参量即为所检测圆的位置参量。为了提高匹配运算速度,先求出被检测圆的圆心和半径的估计值,然后给出缩小了的搜索区域。在此搜索区域内采用贪婪优化的算法得到最终检测结果。实验结果表明算法可以在圆有较大缺陷和噪声的情况下,定位精度在 1 个像素以内,速度在 0.5 s 左右;有很好的抗干扰和抗噪声能力,并有较快的运算速度。

关键词: 光学测量; 变形模板; 圆检测; 贪婪算法

中图分类号: TB922 文献标识码: A

A Fast Interference-Resistant Deformable Template Method for Detecting the Circle

Yu Xinrui Wang Shigang Guan Baiqing Wang Yingfeng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 9 May 2003; revised 19 August 2003)

Abstract: A new method for detecting circle with defects and noise using parametric deformable template is proposed. An energy function of the deformable template is defined according to geometric characteristics of the circle and gradient information of the image. The template then interacts dynamically with the image and energy function by altering its parameter values to maximize the energy function. The final parameter values (maximum) can give the location of the circle according to definition of the energy function. In order to raise the matching speed, a decreased search region is given by estimating values of the radius and the center of the circle. Then the energy function is optimized using greedy method in the search region. Experimental results show that the algorithm can localize the circle within a pixel and about 0.5 s; even the circle has defects and noise. This method has good resistance to interference and noise, and fast operation.

Key words: optical measurement; deformable templates; circle detection; greedy algorithm

1 引 言

在微电子装备、机器人伺服和其它一些机械装配过程中,机器视觉辅助检测有着不可或缺的作用。

* 国家自然科学基金(50375099)、国家自然科学基金重大项目子项(50390064)和 2002 年度博士基金点(20020248048)资助课题。

E-mail: yuxinrui@sjtu.edu.cn

收稿日期:2003-05-09;收到修改稿日期:2003-08-19

一是非接触性使得检测简便可行,另外还可以实现高精度和高速度,从而给出实时的反馈信息。而圆形物体在工业行业中普遍存在,如微电子器件中的球状阵列(BGA)元件(图 1)及印刷电路板(PCB)定位基准、机器人足球赛中的足球及激光光斑等,所以圆的检测也是机器视觉检测的一个典型问题。

传统的圆检测主要是指圆的形状提取和确定,较少在有缺陷的情况下对其进行定位,其抗干扰能力也较差。这些检测方法主要有中心法^[1]、中值法、

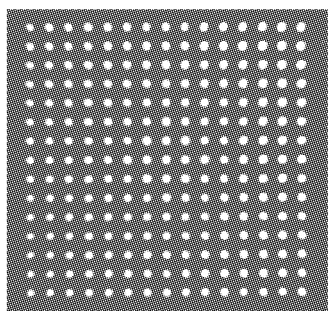


Fig. 1 BGA component

Hough 变换法及最小二乘拟合法^[2]等。前两种算法要求图像分布比较均匀,否则将会产生较大误差。Hough 变换法需逐点投票、记录,所用时间较多,而且精度也不够高。拟合法从原理上来讲,对有噪图像的效果不太理想,其精度还受边界点选取的影响较大。另外,形态学检测方法^[3]虽然对检测的抗畸变能力有一定的改善,但同上述方法一样,它们对有缺陷圆的图像的检测精度较低。为了解决这个问题,本文提出了一种新的参量化变形模板进行圆的检测,可以快速地进行圆的定位,并且可以有很好的抗干扰能力。

2 变形模板匹配方法

图像匹配方法可以分为基于不变量的匹配方法和基于局部特征的匹配方法。前者包括矩不变量、傅里叶描述子、小波描述子、形态描述子等方法。后者则有广义 Hough 变换(GHT)方法、基于神经网络和遗传算法匹配方法及变形模板方法等^[4]。变形模板匹配是一个经典的问题。由于早期的匹配算法主要集中在刚体匹配,所以应用范围有限。如本文要解决的问题,图像中的圆形物体出现了缺陷和光照不均匀及噪声干扰时(图 2),作为刚体匹配的传统方法则难以得到理想的结果。

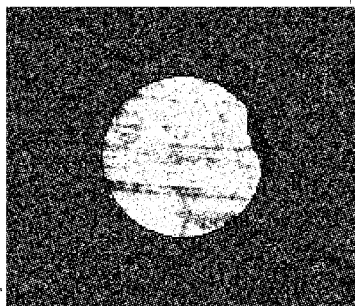


Fig. 2 Circle with flaws and noise

近些年有关变形模板的研究中,变形模板可以

分为两大类:自由式和参量式。对于自由式变形模板,没有全局结构,只要满足某些一般的正则化约束,可以表示任何形状。而参量式变形模板则用于先验形状已知,并可用少量参量表示的几何形状。参量化模板通常由一群解析函数确定,模板的形状可以通过参量的变化而变化,形状的变化确定在参量的一个合理分布中;它的目标函数由一个内部能量和外部能量加权组成,表征了变形模板和图像之间的吻合度,也称为能量函数。能量函数是变形模板的最重要特征,通过根据图像力动态调整参量实现能量函数的最大化或最小化,可以得到最终的匹配位置。Jolly 等^[5]通过定义一个多边形的模板,从序列图像中对运动车辆进行自动分割和匹配。控制模板的参量是边的斜率和各边之间的相互位置关系。Lakshmanan 等^[6]使用通过定义两条平行直线构成的变形模板来检测雷达图像中的飞机场跑道边缘。它由几个参量控制:两条边缘的斜率和起点。Yuile 等^[7]使用变形模板抽取面部特征。他们给眼睛和嘴设计了以圆和抛物线为基础的变形模板。控制模板的参量分别是圆的圆心、半径和抛物线的系数,此外根据面部的特征给这些参量加上一些正则化约束。另外,也可以从原型中提取变形模板,它是一种更灵活的方式,当然也增加了运算处理的复杂性。

3 圆的参量模板的设计

因为圆形物体几何形状较为规则,有着明确的先验知识,只要圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 r 就可以完全确定,所以适于采用参量式变形模板进行匹配。在变形模板匹配中,定义参量模板的能量函数是进行匹配检测的关键,能量函数所包含的先验形状知识及图像相关信息是能量函数有效性的保证。根据边缘的特性,边缘上点的梯度值 $|\nabla I|(i, j)$ 应该在其相应的邻域内最大(如图 3)。并且对于圆来讲,其边缘上像素点的梯度方向应该和法线方向一致,

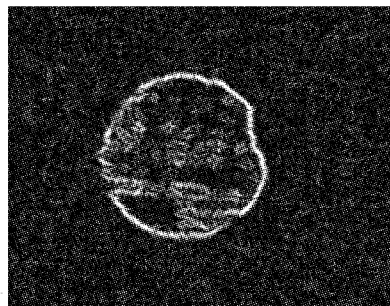


Fig. 3 The magnitude image

即和半径的方向一致,也即二者的单位向量的点乘积应该最大。综上所述,我们给出能量函数为

$$U_E = \frac{\sum_{(i,j) \in C} [|\nabla I|(i,j) \times |\boldsymbol{\varphi}(i,j) \cdot \nabla I(i,j)|]}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in C} |\nabla I|^2(i,j)} \sqrt{\sum_{(i,j) \in C} [\boldsymbol{\varphi}(i,j) \cdot \nabla I(i,j)]^2}}, \quad (1)$$

其中

$$|\nabla I|(i,j) = \sqrt{\nabla I_x^2(i,j) + \nabla I_y^2(i,j)}, \quad (2)$$

$$\nabla I(i,j) = \frac{1}{|\nabla I|(i,j)} [\nabla I_x(i,j), \nabla I_y(i,j)], \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(i,j) = \frac{1}{|\boldsymbol{\varphi}(i,j)|} [(x_i - x_0), (y_j - y_0)], \quad (4)$$

$$|\boldsymbol{\varphi}(i,j)| = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}, \quad (5)$$

(2)式所求的为图像中像素点的梯度值, $\nabla I_x(i,j)$ 、 $\nabla I_y(i,j)$ 分别为像素点在 x 和 y 方向的梯度值。(3)式中所求的是像素点的梯度单位向量,它表征了梯度的方向。(4)式表示的是像素点到圆心的单位向量。由(1)式可看出,其分子中第一项为像素梯度值,它在边缘处取得极大值;第二项为梯度单位向量和法向单位向量的点乘积,当二者的方向一致时取得最大值。根据圆的特性,当模板和圆完全匹配时能量函数取得最大值。分母的作用是对分子进行归一化,均衡模板大小对函数的影响,避免圆的大小对函数值产生影响;并且均衡梯度值和向量的数量积对整个函数的贡献;另外也有对函数的峰值点平滑过渡的作用。

由能量函数的定义可知,图像梯度值计算的精度影响模板匹配的最终精度,所以要准确计算图像的梯度值。由于边缘检测时的主要判断依据是图像的梯度值,所以可以根据图像检测算法的效果来选取求梯度的算法。Canny 早就证明了一维空间的指数滤波器的最佳性,并提出了边缘检测的准则^[8]。他还证明了最佳滤波实际是用高斯函数的一阶导数来滤波,并导出了二阶边缘检测最佳算子,由于 Canny 算子的良好特性,它已成为很多边缘检测器设计的比较标准。所以本文采用了 Canny 算子检

测边缘时求取梯度的算法。即先对图像分别进行 x 和 y 方向一维高斯卷积,求出图像在 x 和 y 方向上的梯度 $\nabla I_x(i,j)$ 和 $\nabla I_y(i,j)$,然后得到图像上各点的梯度 $|\nabla I|(i,j)$ (如图 3 所示)。

4 检测步骤及优化方法

为了提高匹配检测的计算速度,避免在整个图像范围内进行搜索而增加时间开支,本文首先对圆进行粗定位,估算圆心坐标和半径大小,从而缩小搜索空间。然后在缩小的搜索空间里进行能量函数的优化搜索,以达到较快的匹配速度。

3.1 搜索空间确定

如图 4 所示,图 4(a)、图 4(b)分别为图像二值化后在 x 轴和 y 轴上的投影。以求圆心 x 坐标为例,因为在投影点多的地方所受噪声和缺陷的干扰较小,为了减小噪声和缺陷的影响,取投影曲线最大值的 80% 为判定值[如图 4(a)中所示]。分别得曲线每侧大于判定值的第一个点的 x 坐标 C_{x1} 和 C_{x2} ,则圆心的 x 坐标估计值 $C_x = (C_{x1} + C_{x2})/2$ 。另取曲线最大值的 20% 作为判断值,从曲线每侧亦可分别得大于此判断值的第一个点,由这两个点的 x 坐标到 C_x 的距离得半径的估计值 R_{x1} 和 R_{x2} 。同样可

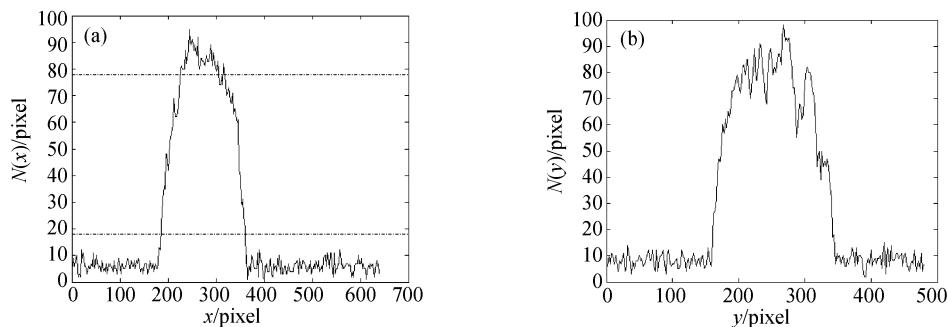


Fig. 4 (a) Projection of the binary image on x -axis, (b) projection of the binary image on y -axis

由 y 轴投影得圆心 y 坐标估计值 C_y 和半径估计值 R_{y1} 和 R_{y2} 。考虑到圆的缺陷和噪声,半径的估计值取 R 四个估计值的最大值,即 $R = \max(R_{x1}, R_{x2}, R_{y1}, R_{y2})$,由于 R 为在投影曲线最大值 20% 处取得估计值,所以接近实际值。对于理想的圆,半径估计值理论上接近实际值的 98%,但由于估计值是取的四个所得值的最大值,所以一般比实际半径偏大。图 5 和表 1 给出了具有各种缺陷的圆在叠加了均值

为 0、偏差为 0.03 噪声情况下的圆心和半径估计值,从中可以看出所得估计值有着较小的误差范围。综上所述,可以得到有关圆心和半径的搜索范围:

$$\begin{cases} C_x - \delta \leq x \leq C_x + \delta, \\ C_y - \delta \leq y \leq C_y + \delta, \\ R - \delta \leq r \leq R, \end{cases} \quad (6)$$

δ 可根据图像质量取半径 R 估计值的 10%~15%。

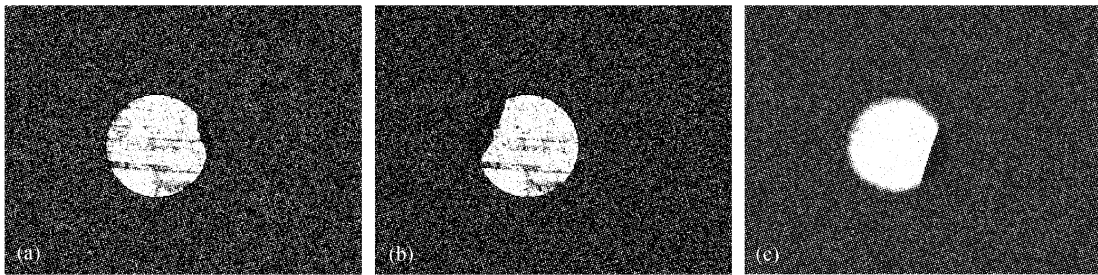


Fig. 5 Circles with noise and different flaws

Table 1 Estimated values of the center of the circle and the radius

	Parameters of Fig. 4(a)		Parameters of Fig. 4(b)		Parameters of Fig. 4(c)	
	Estimated value	True value	Estimated value	True value	Estimated value	True value
C_x/pixel	274	275	278	275	274	270
C_y/pixel	255	252	256	252	246	250
R/pixel	96	92	98	92	83	85

3.2 匹配优化

在求出图像的梯度值之后,就可以进行图像的检测。由本文能量函数的定义可知,图像的检测过程也就是搜索能量函数最大值的过程。为了进一步提高检测速度,可以采用优化的匹配策略。Jolly 等^[4]采用了模拟退火算法来进行优化,该算法为全局优化算法,但是针对随机空间的,与大的参量空间相联系,因而时间开销也很大。同样,动态规划法也是一种全局优化算法,但是其计算复杂度为 $O(nm^3)$,其较大的计算复杂度也难以使其达到全局最优。由于我们确定了小的搜索空间,所以可以选择贪婪优化算法。贪婪优化算法是一种收敛到能量函数局部最优点的局部最优算法。在算法的每个迭

代过程中,对每个轮廓点的 8 邻域进行搜索,使得能量函数最大的点被更新为新的搜索点,直到能量函数不能通过上述方法得到增加^[9,10]。本文采用分层优化的方法,即对半径的每一个值都进行搜索,而对圆心位置采用贪婪算法,最后得到使能量函数最大的参量即为变形模板的最终参量。

5 实验结果与分析

根据上述算法,本文对表 1 中有各种缺陷并叠加了噪声的图像进行了检测,图像的大小为 640×480 像素,256 级灰度,噪声为均值为 0,偏差为 0.03 的白噪声,检测结果如图 6 和表 2 所示,检测结果误

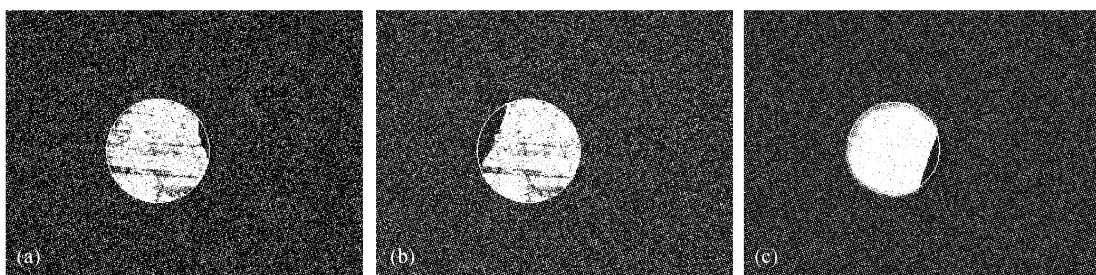


Fig. 6 The detected results of deformable templates

差都在 1 个像素以内。由于在搜索优化的过程中，所限定的步长为像素级，所以最终的检测结果也为像素级。如果缩小搜索步长，结果亦可以达到亚像素级别。同时也可看出，本文所设计的算法有很好的抗噪声和抗干扰能力。表 2 中还给出了检测算法

的运算时间，在计算机配置为：中央处理器奔腾 III 733 MHz，内存 256Mb 的情况下，所耗时间均小于 1 s，有较好的实时运算能力。而文献[2]中圆心和半径的误差都在 4 个像素左右。

Table 2 The detecting results of deformable template /pixel, second

	Fig. 5(a)		Fig. 5(b)		Fig. 5(c)	
	Detecting value	True value	Detecting value	True value	Detecting value	True value
x /pixel	275	275	275	275	271	270
y /pixel	252	252	252	252	250	250
R /pixel	92	92	92	92	85	85
Time /s	0.8510		0.9820		0.8220	

结论 本文给出了一种新的参量化变形模板，根据图像的梯度信息和检测对象的几何特征，设计出了其能量函数。该方法不仅具有较高的精度，并具有较强的抗干扰及抗噪声能力。同时通过给出缩小的搜索区域和运用贪婪优化算法，也可达到较快的运算速度。实验结果验证了算法的有效性。同时指出可以通过缩小匹配时的搜索步长方法，达到更高的匹配精度，把检测结果精确到亚像素级别。

参 考 文 献

- 1 Chen Lei, Chen Jinbang, Lu Runhua. Automatic measurement of optical fiber geometric parameters. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10):1245~1248 (in Chinese)
- 2 Hou Chenggang, Yang Wenxian, Qu Liangsheng. A robust subpixel algorithm for the center of circle detecting. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(4):481~485 (in Chinese)
- 3 Cheng Gang, Jin Guofan, Wu Minxian. Improvement of the distortion-invariant ability of hit-or-miss transformation by

using uncertain in pixels. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(2):155~162 (in Chinese)

- 4 Ding Xianfeng, Wu Hong, Zhang Hongjiang *et al.*. Review on shape matching. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2001, **27**(5):678~694 (in Chinese)
- 5 Jolly M P D, Lakshmanan S, Jain A K. Vehicle segmentation and classification using deformable templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(3):293~308
- 6 Lakshmanan S, Grimmer D. A deformable template approach to detecting straight edges in Radar images. *IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(4):438~443
- 7 Yuille A L, Hallinan P W. Feature extraction from faces using deformable template. *International J. Computer Vision*, 1992, **8**(2):99~111
- 8 Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6):679~698
- 9 Williams D J, Shan M. A fast algorithm for active contours and curvature estimation. *CVGIP: Image Understanding*, 1992, **55**(1):14~26
- 10 Lam K M, Yan H. Fast greedy algorithm for active contours. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1):21~23