

文章编号: 0253-2239(2010)09-2608-05

基于全局搜索和证据积累的多圆检测方法

罗 钧 李 锐 陈伟民

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要 针对传统圆检测算法检测速度慢、不适于多圆检测的问题,提出一种基于全局搜索的圆检测方法。将证据积累和加权平均的思想结合,对证据积累过程中产生的伪圆心进行归类、分析,并对三类伪圆心进行逐类剔除,最后计算其它圆参数。实验结果表明,该算法效率高,对局部信息缺损不敏感,检测时间不会随着圆个数的增加而线性增加,检测效果明显优于传统的随机圆检测(RCD)算法。

关键词 机器视觉;圆检测;证据积累;全局搜索

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2608

A Method for Multi-Circle Detection Based on Global Search and Evidence Accumulation

Luo Jun Li Rui Chen Weimin

(Key Laboratory and for Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract Aiming at solving the problem that the traditional circle detection algorithm is characterized by low detection speed and so is unfit for multi-circle detection, a circle detection method based on global searching is proposed. By combining the accumulation of evidence with weighted average, the pseudo-center of a circle produced in the process of accumulation of evidence is classified and analyze, then 3 pseudo-centers of a circle kind by kind are rejected and the other circle parameters are computed. The experimental results show that the proposed algorithm is of high efficiency and is not sensitive to the defect of local information. And the detection time will not increase linearly with the numbers of circle and the detection result is better than the traditional random circle detection (RCD) algorithm obviously.

Key words machine vision; circle detection; evidence accumulation; global search

1 引 言

在光学精密测量领域中,圆形零件的检测和测量占了很大的一部分。圆检测在光学测量领域^[1,2],特别是在二维机器视觉自动测量系统和智能检测等领域有着重要的地位^[3~6]。常用的圆检测方法如标准 Hough 变换^[7](SHT)由于采用“一到多”的映射机制,使其运算复杂、占用内存空间大,而且其检测多个圆的效果不佳,不适用于工业的快速自动检测。近年来,国内外学者致力于多圆快速检测方法的研究^[8~10]。Xu 等提出了随机 Hough 变

换^[11,12](RHT),该方法采用“多到一”的映射,避免了 SHT 中“一到多”映射的巨大计算量。但由于无目标的随机采样会造成大量的无效采样与无效累积,使算法性能降低。此外,Chen 等提出了一种非 RHT 系列的随机圆检测算法(RCD)^[13],它在中等以下的噪声比情况下检测速度较 RHT 快。

在实际应用中,Hough 变换和 RCD 检测算法都存在诸多问题。一是在多圆检测时无效采样概率大,且由于算法中大多都是平方和开方运算,所以算法效率低;二是在圆残缺和图像中包含直线段等较大

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-04-10

基金项目: 国防科工委“十一五”重点项目(B20301118)资助课题。

作者简介: 罗 钧(1963—),男,教授,主要从事测试计量技术及仪器 and 嵌入式系统等方面的研究。

E-mail: luojun@cqu.edu.cn

干扰时检测速度也会受到很大的干扰；三是两种算法都存在由于设定的阈值参数不同而使检测结果出现较大偏差的情况。因此，提出一种能较好地解决上述问题的新型算法具有重要的意义。

2 算法原理

2.1 全局搜索圆心坐标

图 1 为圆检测的光学结构示意图，图 2 为全局搜索圆心的示意图。假定图像大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ ，经过边缘检测后，有

$$I(x,y) = \begin{cases} 255, & \text{if edged} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $I(x,y)$ 为图像中第 x 行第 y 列的灰度值 ($0 \leq x < M, 0 \leq y < N$)。

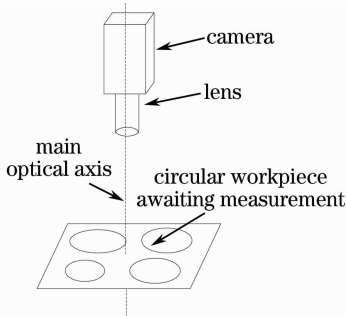


图 1 圆检测光学结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optic structure of circle detection

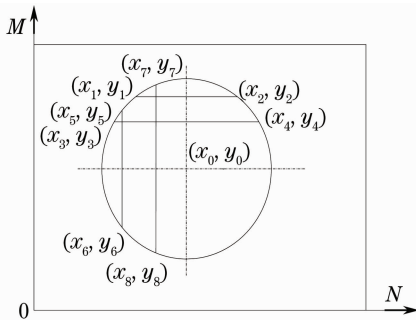


图 2 全局搜索圆心示意图

Fig. 2 Schematic diagram of global search the center of a circle

创建数组 a_{2M} (数组长度为 $2M$) 和 b_{2N} (数组长度为 $2N$)，数组中每个元素的位置对应所求的圆心的像素坐标值。在数组中存储的元素的大小即为相应的像素点成为圆心的证据积累值。搜索圆心坐标的步骤如下：首先，对第一行像素进行遍历，依次求取各边缘像素点和与其相隔最近的边缘像素点的横坐标的平均值。每求得一个平均值 p_x ，即将数组 a_{2M} 中的 $a[2 \times p_x]$ 的值加 1；然后依次对各列像素进行

如上一部的处理；同理，对各列像素进行如上二部的处理。每求得一个平均值 p_y ，即将数组 b_{2N} 中 $b[2 \times p_y]$ 的值加 1。如(2)式所示：

$$\begin{cases} a[i] = a[i] + 1 & \text{if } i_1 + i_2 = i \\ b[j] = b[j] + 1 & \text{if } j_1 + j_2 = j \end{cases}, \quad (2)$$

式中 i_1, i_2 为两相邻边缘像素点的横坐标, j_1, j_2 为两相邻边缘像素点的纵坐标, i, j 为相应的数组元素位置。

完成全局搜索后，设定阈值 T ，分别将两数组中的值与阈值 T 进行比较，数组 a_{2M} 中大于 T 的值在数组中所处的位置为圆心的横坐标值的 2 倍，而 b_{2N} 中大于 T 的值在数组中所处的位置为圆心的纵坐标值 2 倍。

由于圆的对称性，得到数组中的证据积累值反映了以各个坐标值为圆心坐标值的概率大小。而且由于是求相邻的边缘像素点的平均值所得到数的积累值，所以区分度高，可以有效地去除其它种类的边缘干扰。

2.2 伪圆心的特征分析

对于多圆检测，证据积累的过程完成后会产生多种的伪圆心。由于数字图像以单个像素为单位，所以一个圆中往往有两个相邻的坐标点经过计算所得到的证据积累的值都大于所设定的门限，并且相差不多，即构成了伪圆心。如图 3 所示。

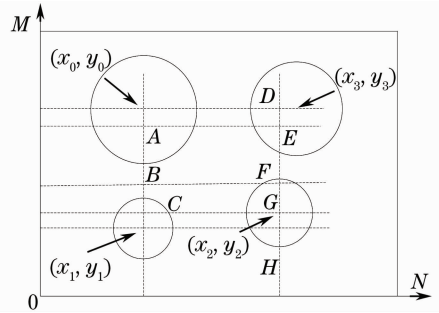


图 3 伪圆心示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pseudo-centre

可将伪圆心分为三类：

1) I 型伪圆心。由于证据积累所得到的横、纵坐标值有很多种不同的组合，所以一个横坐标对应多个可能的纵坐标，以及相邻的坐标点产生伪圆心，由此产生的多个伪圆心如图 3 中的 A, C, E, F, G, H 六点所示。

2) II 型伪圆心。如果两个圆的圆心横坐标相等，则两圆之间会存在一个证据积累值较大的纵坐标，此点是由于上圆的下边缘与下圆的上边缘进行证据积累所得到的。同理，如果两圆圆心的纵坐标

相等,则在两圆之间会有一个证据积累值较大横坐标。此类型伪圆心如图 3 中 B 点所示。

3) III 型伪圆心。如图 3 中 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) 对应的圆所示,如果两圆的范围在横坐标上重叠的部分较多,则在 y 轴方向对 x_2 和 x_3 附近的边缘点进行证据积累时, (x_2, y_2) 和 (x_2, y_3) 两点的证据积累值都很大, x_3 也有这种情况。同样,两圆在纵坐标上重叠的部分较多时也会出现类似的情况。此种伪圆心如图 3 中的 D 点所示。

针对 I 型伪圆心,可只在各个可能的横坐标值附近的纵坐标方向上对边缘点进行证据积累,则可找到每个横坐标所对应的纵坐标值。

而由于 II 型伪圆心并不在圆内,所以在纵坐标方向上扫描各个可能的横坐标值附近的边缘点时,对 II 型伪圆心的纵坐标进行证据积累的边缘点的纵坐标必然是离横坐标值越远的地方两者相差越大。可根据此特点剔除 II 型伪圆心。

进行如上所述的扫描时,对 III 型伪圆心(如图 3 中的 D 点)的纵坐标进行证据积累的边缘点中大于 x_2 的部分的两边缘点之间的纵坐标差值必然远大于或小于 x_2 的部分的两边缘点之间的纵坐标的差值。即在 x_2 的两边对 D 点的纵坐标进行证据积累的边缘点差值相差很大。所以,可以针对这种情况剔除 III 型伪圆心。

2.3 伪圆心的逐类剔除

根据 2.2 节的分析,针对图 3 中的各类伪圆心,分别进行剔除如下:

1) 剔除相邻的圆心和 I 型伪圆心

遍历横、纵坐标值,找出相邻的坐标点,在其中选择证据积累值的较大点。如果两者的值相差很小,则取两者的平均值作为圆心坐标;设定阈值 t_1 和 t_2 ,选取从 $(x_0 - t_1)$ 列到 $(x_0 + t_1)$ 列的 $2t_1 + 1$ 列像素,依据 2.1 节中的方法对每列像素进行处理:

$$b[j] = b[j] + 1 \quad (3)$$

if $j_1 + j_2 = j$ and $(x_0 - t_1) \leq i_0 \leq (x_0 + t_1)$

式中 j_1 和 j_2 为第 i_0 列上相距最近的边缘点的纵坐标, $b[j]$ 为纵坐标为 j 处的证据积累值。证据积累值大于阈值 t_2 的纵坐标即为 x_0 可能对应的纵坐标 y'_0 , y'_1, \dots , 并记录下得到各可能纵坐标值的边缘点纵坐标值。对 x_0, x_1, x_2 依次进行处理,便可剔除掉 A, C, E, F, G, H 六个伪圆心。

2) 剔除 II 型伪圆心

对纵坐标 y'_0 进行了证据积累的边缘点聚合在点集 $C_{y'_0}$ 中。在点集中选取在 $(x_0 + t_1)$ 列或 $(x_0 - t_1)$

列中纵坐标最大的点,如果此点的纵坐标大于 x_0 列中纵坐标最大的点的纵坐标,则此点为伪圆心。依次对 x_0, x_1, x_2 进行处理,则可剔除伪圆心 B 。

3) 剔除 III 型伪圆心

在点集 $C_{y'_0}$ 中,将 $(x_0 + 1)$ 列到 $(x_0 + t_1)$ 列中的大于 y'_0 的纵坐标值减去小于 y'_0 的纵坐标值,并对其求和;相应的,将 $(x_0 - t_1)$ 列到 $(x_0 - 1)$ 列中的大于 y'_0 的纵坐标值减去小于 y'_0 的纵坐标值,并对各列相减的结果求和。最后,将两个求得和相减

$$\delta_0 = \sum_{x_0+1}^{x_0+t_1} (y_i - y_j) - \sum_{x_0-t_1}^{x_0-1} (y_k - y_l), \quad (4)$$

$(y_i, y_j, y_k, y_l \in C_{y'_0})$

式中 y_i 为在点集 $C_{y'_0}$ 中, $(x_0 + 1)$ 列到 $(x_0 + t_1)$ 列中纵坐标值大于 y'_0 的点的纵坐标,而 y_j 为其中纵坐标值小于 y'_0 的点的纵坐标; y_k 为在点集 $C_{y'_0}$ 中, $(x_0 - t_1)$ 列到 $(x_0 - 1)$ 列中纵坐标值大于 y'_0 的点的纵坐标,而 y_l 为其中纵坐标值小于 y'_0 的点的纵坐标。依次对各个可能的纵坐标值进行如(4)式的计算,得到对应的差值为 $\delta_0, \delta_1, \dots$ 。设定阈值 ϵ , 将差值 δ 大于阈值 ϵ 的点剔除。对 x_0, x_1 和 x_2 分别进行处理,即可剔除伪圆心 D 点。

至此,对应于横坐标 x_0, x_1 和 x_2 的伪圆心被全部剔除。同理,也可对横坐标 x_3 和纵坐标值 y_1, y_2, \dots 进行上述类似处理,即可找出与相对应圆心坐标。最后,将真圆心与其 8 个相邻点的证据积累值作为权值,对坐标值进行加权平均,得出圆心坐标。

2.4 求取半径

由于在实际的工业检测中图像常存在各种噪声,为避免噪声干扰,采用聚类分析和加权平均相结合的方法来尽量减小误差。

求取各边缘像素点到各检测出的圆心的距离 L , 将相接近距离 L 的被聚为一类。然后选定阈值 ξ , 选取在 2ξ 的范围内聚合了最多点的点集 C_{\max} 。计算半径的加权平均过程为

$$\sum_{L_n \in C_{\max}} \frac{P_n}{P_{\text{sum}}} L_n = L, \quad (5)$$

式中 L_n 为包含在类别 C_{\max} 中边缘点与圆心的距离, P_{sum} 为点集 C_{\max} 中的点的总个数, P_n 为在 C_{\max} 中距离为 L_n 的边缘点的个数。(5)式中所求得值 L 即为要求的半径值。

此种聚类方式可以充分发挥证据积累方法的效果,可以有效地避免因噪声的干扰而使结果偏离正确值的现象。而采用加权平均方法求半径,减小了

数字图像固有的像素误差,提高了检测算法的精度和可靠性。

3 实 验

如图 4 所示,4 个实验图像的大小都为 720 pixel×576 pixel,分别包含有 1 个、3 个、4 个、5 个圆。本文的 4 个实验是在 256 MB 内存的 Celeron CPU 1.70 GHz 计算机上用 VC++6.0 编程实现的。首先创建和初始化数组 $a[1440]$ 和 $b[1152]$,选定参数值 $T=10, \epsilon=5, \xi=1, t_1=10,$

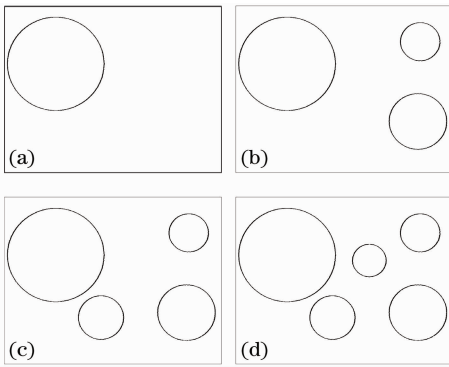


图 4 实验图像。(a)1 个圆,(b)3 个圆,(c)4 个圆,(d)5 个圆

Fig. 4 Experimental images. (a) one circle, (b) three circles, (c) four circles, (d) five circles

表 1 图 4(d)检测值与实际值对比

Table 1 Comparison of detected value and real value of figure 4(d)

Circle number	Detected value of this proposed algorithm		Detected value of RCD		Real value	
	Circle center /pixel	Radius /pixel	Circle center /pixel	Radius /pixel	Circle center /pixel	Radius /pixel
1	(604.31,176.62)	95.50	(605.53,178.07)	96.03	(604,177)	95
2	(167.56,376.38)	160.00	(169.77,377.53)	161.47	(168,376)	160
3	(615.26,453.12)	65.50	(613.54,454.93)	65.16	(615,453)	66
4	(445.84,358.06)	57.00	(444.52,358.99)	55.33	(446,358)	57
5	(319.77,164.25)	73.50	(321.36,162.31)	75.68	(320,164)	74

4 结 论

通过分析和实验可以看出,新算法相比于传统的圆检测算法具有更优的性能。首先,新算法对图像实行全局搜索,避免了 RHT 和 RCD 算法无效随机采样概率大的缺点;其次,用简单的求平均运算代替了传统算法中的平方和开方运算,提高了算法效率;再次,该算法采用证据积累和加权平均结合的方法计算圆的各项参数,提高了计算结果的稳定性和精度。对多幅图像进行的检测实验表明,该算法检测速度快、精度高,具有实用价值。

考虑到具有中心对称性的几何图形亦可用文中

$t_2=15,$ 用本文的算法对 4 个图像分别进行圆检测,然后用 RCD 算法对这 4 幅图像分别进行圆检测。上述两种检测是在相同的硬件实验环境下进行的,算法的运行时间对比如图 5 所示,图 5 为用本文算法对图 4(d)的检测结果,表 1 为图 4(d)的检测结果与实际值的对比。由图 5 可以看出,检测单个圆时,本文的算法与 RCD 检测算法所用的执行时间几乎相等,当圆的个数增加时,RCD 检测算法的执行时间线性地增加,而本文所提出的算法的执行时间几乎没有变化。由表 1 可以看出,通过本文算法检测的结果与实际值的误差都在一个像素内,明显优于 RCD 算法的检测精度。

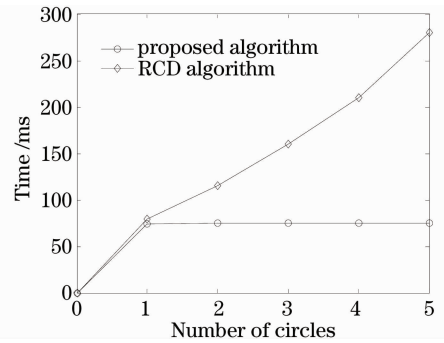


图 5 本文算法与 RCD 算法执行时间比较
Fig. 5 Comparison of execute time between this proposed algorithm and RCD algorithm

的算法思想来检测,对其它的中心对称图形(如椭圆、长槽、方孔、沉孔等)的检测将是今后研究的方向。

参 考 文 献

- 1 M. Blanco, M. G. Penedo, N. Barreira *et al.*. Localization and extraction of the optic disc using the fuzzy circular Hough transform[C]. *Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2006, **4029**: 712~721
- 2 T. D'orazio, C. Guaragnellab, M. Leo *et al.*. A new algorithm for ball recognition using circle Hough transform and neural classifier[J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(3): 393~408
- 3 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator[J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258
敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 253~258
- 4 Ming Ying, Jiang Jingjue. Background modeling and moving-objects detection based on cauchy distribution for video sequence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 587~592
明英, 蒋晶珏. 基于柯西分布的视频图像序列背景建模和运动目标检测[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 587~592
- 5 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Anti-noise and precise circle target center location method of CCD laser autocollimator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1609~1614
敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 激光 CCD 自准直仪圆目标中心抗噪声精确定位方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(12): 1609~1614
- 6 Wu Haibin, Yu Xiaoyang, Guan Congrong. Structured light encoding stripe edge detection based on grey curve intersecting point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1085~1090
吴海滨, 于晓洋, 关丛荣. 基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1085~1090
- 7 Huda Loannou D, Laine W *et al.*. Circle recognition through a 2D Hough transform and radius histogram[J]. *Image and Vision Computing*, 1999, **17**(1): 15~26
- 8 Yu Qiao, Ong S. H. Connectivity-based multiple circle fitting [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4): 755~765
- 9 Shang Fei, Wang Fenggui, Tian Di *et al.*. A method for circle detection based on right triangles inscribed in a circle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 739~743
商飞, 王丰贵, 田地等. 一种基于圆内接直角三角形的圆检测方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 739~743
- 10 Yu Xinrui, Wang Shigang, Guan Baiqing *et al.*. A fast interference-resistant deformable template method for detecting the circle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1115~1119
于新瑞, 王石刚, 关柏青等. 一种快速检测圆的抗干扰变形模板方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1115~1119
- 11 Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities [J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, **57**(2): 131~154
- 12 Lei Xu, Erkki OJA, Pekka Kultanen. A new curve detection method: randomized Hough transform RHT [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, **11**(5): 331~338
- 13 Chen Tehchuan, Chung Kuoliang. An efficient randomized algorithm for detecting circles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, **83**(2): 172~191