

文章编号 1004-924X(2014)04-1105-07

基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法

叶 峰*, 陈灿杰, 赖乙宗, 陈剑东

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:针对随机 Hough 变换(RHT)及其改进算法在同一圆边缘点随机抽样时命中率低且投票处理过程复杂,提出了基于有序搜索的广义 Hough 变换快速圆检测算法(SQHT)。该算法利用圆的几何性质和梯度方向信息来有序搜索圆边缘点集,将 Hough 变换的基于投票判定基元参数转变为有效确定基元三点的讨论。执行算法时,首先顺序搜寻第一边缘点并根据邻域边缘点集或图像灰度值计算其梯度值;接着在这一点所在行匹配与其梯度信息相符的第二点,根据前两点信息在这一点所在列匹配第三点;最后按照 RHT 算法流程确定有效基元参数,从而避免了随机抽样带来的时间不确定性。该算法具有计算速度快,检测时间可控,适用范围广泛,抗干扰性强等特点。相比于 RHT 算法,提出的算法在单目标圆检测情况下检测效率提高了 2 倍,在多目标圆(5 个及以上)且有非目标边缘点情况下检测效率提高了 5 倍,在多圆检测方面能有效弥补了 Hough 变换算法的不足。

关键词:Hough 变换;圆检测;有序搜索;梯度方向

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.1105

Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform

YE Feng*, CHEN Can-jie, LAI Yi-zong, CHEN Jian-dong

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of
Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding author, E-mail: mefengye@scut.edu.cn

Abstract: To solve the problem of low hit ratio of random sampling in the same circle and complexity of voting process when Randomized Hough Transform (RHT) or its improved algorithm were used to detect circles, an algorithm for fast circle detection using Sequenced Hough Transform (SQHT) was proposed. It used the geometric features and gradient direction information of a circle to sequentially search the circle edge points sets and turned the acquisition of circle parameters based on vote of RHT to a discussion of locating three points of circle effectively. By using the method, the first edge point was searched sequentially and its gradient was calculated based on the adjacent edge point set or its gray value. The second point was mapped according to gradient of the first point in the row. The third point was mapped according to the information of two points above. The true circle parameters were finally calculated by RHT method, which avoids timing uncertainty caused by randomness of sampling. This method has features of high speed, controllable detection time, wide range of application and strong anti-interference performance. Comparing with the RHTs, experimental results indicate

收稿日期:2013-08-15;修订日期:2013-09-22.

基金项目:广东省教育部产学研结合项目(No. 2012A090300013, No. 2012B091100139);广东省科技计划资助项目(No. 2012B011300055);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2012ZM0046)

that the proposed algorithm can improve 2 times or more in the image of single circle, and 5 times or more in the image of multi-circles (5 or more). It can efficiently remedy the shortage of RHT in multi-circle detection.

Key words: Hough transform; circle detection; ordered search; gradient direction

1 引言

圆检测是视觉处理的基础应用问题,目前主流的检测算法是基于 Hough 变换的方法,其基本思想是将图像的空间域变换到参数空间,用大多数边界点满足的某种参数形式来描述图像中的边缘曲线。通过累加投票求得峰值对应点即为有效图元信息。该方法具有可靠性高,对噪声、变形、部分区域残缺、边缘不连续适应性强等特点。但传统 Hough 变换有如下缺陷:(1)一到多的参数映射引起的计算量大;(2)内存占用空间大;(3)参数量化间隔标准确定难。

针对以上不足, Xu^[1-2] 等人提出了随机 Hough 变换 (Randomized Hough Transform, RHT), 其为多对一的映射。该方法通过运用图像空间中的随机抽样、参数空间中的动态连接列表以及连接图像空间和参数空间收敛映射等操作机制,使 Hough 变换在多维参数下的应用成为可能。但无目标的随机采样仍会产生大量的无效积累,对此从两方面考虑改进:一是降低随机采样点数,二是利用采样点的特征进行提前判断。如:陈燕新^[3]等人加入了利用随机采样点梯度信息的方法(RHT+),束志林^[4]等人利用减少随机采样点加梯度信息的方法,Chen^[5]等人加入第 4 点检验的方法(RCD)。上述改进算法都是基于加入预筛选机制减少积累链表长度的思想。另外,从图像预处理到最终投票过程的各个环节中相关学者也提出了改进算法。如 Ioannou^[6]等人提出了利用梯度方向转化为二参数积累的算法;岳健^[7]等人提出了基于图像四方向搜索采用点的算法,王强^[8]等人提出了边缘点链表化等间距搜索的算法,贾平^[9]等人提出了基于局部特征和降维思想的算法,陈传虎^[10]等人提出了应用统计距离搜寻边缘点的算法,王平^[11]等人提出了改进分水岭的预处理算法进行辅助计算。

本文从随机 Hough 变换方法出发,将随机采样抽取边缘点转变为有序搜索的方式,提出了改

进的快速圆检测算法。具体方法是利用圆的几何特征加边缘点梯度信息,将定位缩小到较小范围的有效搜索区域内,从而能快速搜寻到目标圆上的三点位置,最后通过验证判断进行确认。搜索过程绕开了随机采样和投票过程,提高了目标识别率和检测时间稳定性。

2 经典 Hough 变换的圆检测

2.1 基本变换

基本的 Hough 变换所采用的圆的一般方程为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (1)$$

式中:(a, b)为圆心, r 为半径。把 X-Y 平面上的圆转换到 a - b - r 参数空间,则图像空间中过任意一点的圆对应于参数空间中的一个三维锥面(一到多映射)。图像空间中同一圆上的点对应于参数空间中所有三维锥面相交的一点。通过积累投票可相应求得这一点的圆参数,参数映射示意图如图 1 所示。

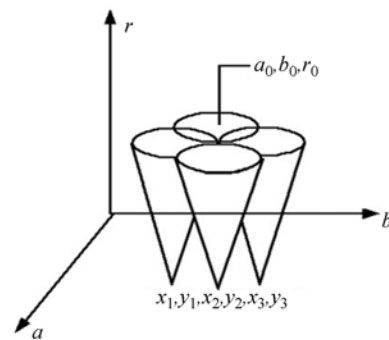


图 1 Hough 变换示意图

Fig. 1 Diagram of Hough transform

2.2 随机 Hough 变换

随机 Hough 变换^[1-2]的主要过程为:

- (1)初始化基元参数的累加器链表;
- (2)从所有特征点中随机抽取一个最小点集,根据此点集计算出基元参数;
- (3)对基元参数的累加器链表进行累加;

(4)当累加器链表的最大值达到设定阈值时,对此基元参数进行验证,判断该基元是否含有足够的图像特征点。若含有足够多的图像特征点,则输出此基元,并清除所有属于此基元的特征点,重新初始化累加器链表。

(5)重复步骤(2)-(4),直至满足某个终止条件(通常指循环次数达到设定阈值后仍无法找到任何新基元)为止。

3 基于有序 Hough 变换的圆检测

3.1 SQHT 算法思想

根据前文对经典 Hough 变换及其改进算法的分析,其局限性主要表现在 3 个方面:(1)噪声或非目标边缘点虽然对检测敏感度低,但对检测效率的影响仍不可忽视,甚至会影响实时性要求。随机 Hough 变换及其改进算法虽然对有效积累点增加了判定规则,但非目标点的增多仍会对随机采样的命中率产生较大的影响。(2)在待检测图像存在多目标圆检测的情况下(一般讨论圆数量大于 10),随机 Hough 变换的效率也会受到挑战,原因与局限性(1)相仿。(3)在待检测图像存在小圆的情况下(一般讨论圆边缘点数占总边缘点数比小于 10%),随机 Hough 变换的漏检率也会上升,原因同样在于小圆随机采样的命中率较低。

综上所述,在目标圆的边缘点数较少或非目标圆的边缘点数较多的情况下,随机 Hough 变换的漏检率和效率都会受到挑战。基于此局限,本文以保留抗干扰性强的 Hough 变换和克服命中率低的随机采样为出发点进行讨论,设计了基于有序 Hough 变换的圆检测算法(Sequenced Hough Transform, SQHT)。

SQHT 算法只关注基于边缘点的圆检测,即待检测图像二值化后只剩下圆目标边缘点、非目标边缘点和噪声等点集图像。对于边缘点集图像的获取方法(滤波、二值化、边缘提取等)不在本文讨论范围。

算法主要思想为将随机采样边缘点转变为遍历搜索,本文以从左到右,从上到下为例进行遍历,遍历完图像即代表检测终止。相比于随机 Hough 变换,减少了对检测终止条件的讨论,特别适用于未知圆个数的图像检测。算法主要任务

也从基于投票判定基元参数转变为有效快速确定基元三点的讨论。

3.2 SQHT 算法步骤

根据圆上三点的查找顺序,将其定义为 P_1 、 P_2 、 P_3 。搜索方法如图 2 所示。

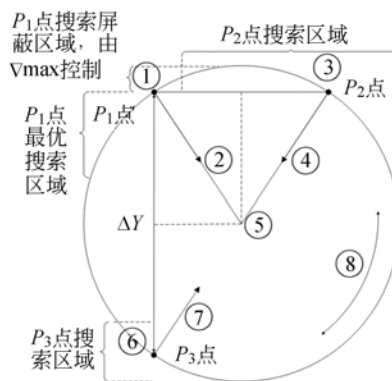


图 2 SQHT 三定位点搜索过程

Fig. 2 Search process of three locating points for SQHT

步骤 1:根据遍历顺序,将搜索到的第一个边缘点指定为 P_1 。

步骤 2:计算 P_1 点的梯度方向,梯度计算方法有两种:一是利用边缘检测算子在原始图像计算获得;二是根据边缘点集图像的二维信息,利用基于插值的数值微分公式获取:^[12]

$$\dot{f}_2 \approx \frac{1}{12}(f_0 - 8f_1 + 8f_3 - f_4). \quad (2)$$

推荐以 P_1 点五邻域内的边缘点信息根据五点公式获取。 P_1 点的梯度值记为 ∇_1 ,并判定是否有: $\nabla_1 < \nabla_{\max}$,若满足条件则继续执行,否则返回步骤 1,重新搜索 P_1 点。

步骤 3:在 P_1 点所在行向右搜索边缘点,若存在,将其指定为 P_2 ,否则返回步骤 1。

步骤 4:计算 P_2 点的梯度方向,记为 ∇_2 ,并判定是否有: $|\nabla_1 + \nabla_2| < \nabla_{\min}$,若满足条件则继续执行,否则返回步骤 3。判定是根据圆的对称性, ∇_1 与 ∇_2 互为相反数的性质,确认 P_2 点的真实性。

步骤 5:根据 P_1 、 P_2 点及其梯度值初步确定圆心坐标,需要说明的是此圆心为初步估计值,用于确定搜索 P_3 点的搜索范围,如图 2 所示, P_3 点的搜索中心 $P_C(X_{P1}, Y_{P1} + \Delta Y)$ 。

步骤 6:在 P_1 点所在列,以 P_C 的纵坐标为中心、以一定的范围 ΔP_3 ,由上到下搜索边缘点,若存在,指定为 P_3 ,否则返回步骤 3。

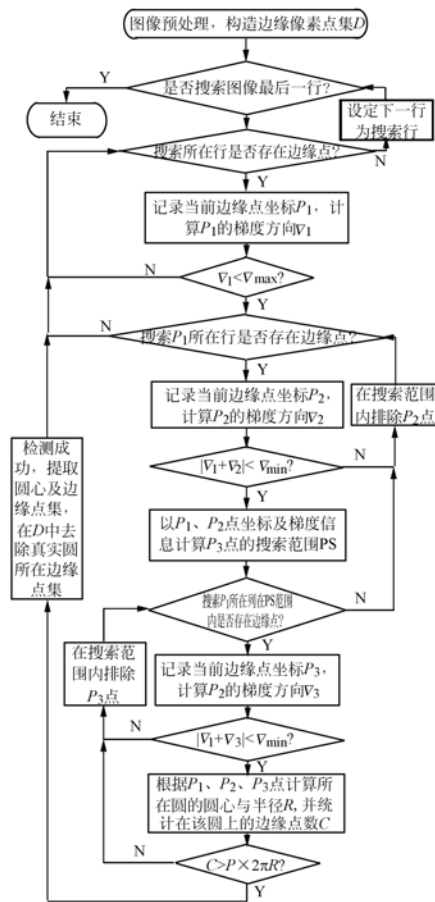


图 3 SQHT 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart of SQHT

步骤 7: 计算 P_3 点的梯度方向, 记为 ∇_3 , 并判定是噪点: $|\nabla_1 + \nabla_3| < \nabla_{\min}$ 。若满足条件则继续执行, 否则返回步骤 6。此目的与步骤 4 相同, 确认 P_3 点的真实性。

步骤 8: 根据 P_1 、 P_2 、 P_3 点坐标计算圆心与半径 R , 并搜索落在此圆上的边缘点, 将它们的数目记为 C , 判定是否有: $C > \rho \times 2\pi R$ 。若满足, 则圆检测成功, 并去除圆上边缘点返回步骤 1, 否则返回步骤 6。

至此, 通过整幅图像对 P_1 点的遍历, 便能获取所有待检测圆, 具体的算法流程图如图 3 所示。需要说明的是, 步骤 2 对 ∇_1 的判断是通过 ∇_{\max} 控制 P_1 点在最开始圆的顶部, 目的是使 P_1 点和 P_2 点的间距较为合理, 从而使 P_3 的搜索范围更加可靠。一般情况下, P_1 点的最优搜索区域如图 2 所示。另外, 步骤 4 与步骤 7 中梯度的计算与判断也是必要的, 但是对于梯度的求取精度没有过高要求。这是因为一方面, 根据圆对称性进行

的梯度预判定可使算法较快剔除误检圆, 同时使获取的三点有较高的可靠性, 一般地, 步骤 8 的判定在有了梯度的保证后基本可以通过。另一方面, 梯度只起一个辅助判定的作用, 过于复杂的梯度求取没有必要, 甚至反而对检测效率产生影响。

3.3 SQHT 算法性能分析

SQHT 算法类似于 Hough 变换, 具有对非目标点敏感度低的特性。其借鉴了随机 Hough 变换多到一映射的降维思想, 将关注点从基于投票确定基元的方法转变为结合圆的几何性质运用有序遍历搜索方法。这与经典 Hough 变换有异曲同工之处。

本算法特点有:

(1) 检测快速。搜索过程中辅助判定条件简单且多, 能快速剔除多余的误检测过程, 减少时间的开销, 提高了实时性。同时搜索出的三点存在简单的垂直关系, 使得圆参数的求取更为快捷。

(2) 时间可控。基于有序的搜索方式杜绝了随机获取的时间上的不确定性, 特别是在非目标圆边缘或噪点过多的情况下, 性能表现更为良好。

(3) 适用广泛。相比于随机 Hough 变换, 在存在尺寸差别悬殊圆目标的图像中, 有序搜索杜绝了小目标圆漏检情况的发生, 而前者基于概率获取的方法往往很难实现。同时, 本算法对圆数目的先验性无特殊要求, 而前者在未给出先验目标圆数目的情况下, 终止条件的选取也是个需要讨论的问题。

(4) 鲁棒性强。本算法同时具备对非目标点敏感度低的特点, 对真实目标的漏检率和虚假目标的误检率都有保证。

4 试验结果

试验的硬件平台为 Intel Core I5 M480 2.67 GHz CPU, 4GB RAM, Windows 7 SP1 64 位, 开发环境选用 Visual Studio 2008 MFC 框架。试验选用的比较算法为 Xu 的随机 Hough 变换^[1-2](RHT)、陈燕新的改进随机 Hough 变换^[3](RHT+) 和 Chen 的四点随机 Hough 变换^[5](RCD)。试验图像采用分辨率为 $1\ 956 \times 1\ 467$ 的圆校正片在不同倍率下的灰度图像组, 如图 4 所示, 图像中圆的个数与半径均不同, 便于比较测试。

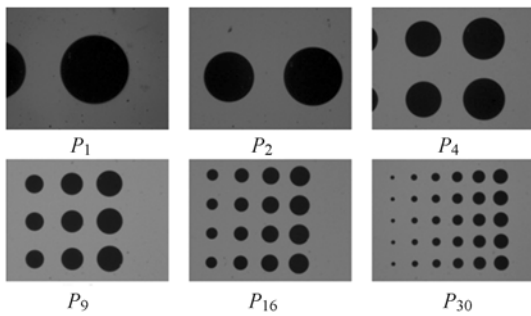


图 4 原始图像
Fig. 4 Original images

算法主要集中于边缘点集图像的讨论,原始的测试图像需经过图像预处理。采用 OTSU 方法^[13]二值化后再进行边缘提取获得所需图像,处理后的边缘点集图像组如图 5 所示。另外, SQHT 算法中梯度的求取方法采用基于插值的数值微分公式(2)。

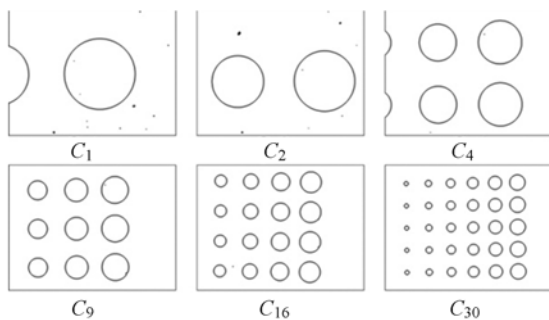


图 5 边缘提取图像
Fig. 5 Edge extraction images

试验共分为 4 组。在试验中,每种算法对各待检图像测试 10 次,取时间均值。将作为参照的 3 种随机 Hough 变换算法终止条件设为待检目标圆数,排除参照算法过度搜索的可能,即达到最优时间,以增加可比性。

第 1 组为正常情况下的边缘检测,目的是对比各算法的检测效率,各算法的检测时间结果如表 1 和图 6 所示。

从结果可以看出, SQHT 的执行时间是最短的,随着目标圆数目的增加, SQHT 的检测时间基本保持不变,这也验证了 SQHT 算法检测时间稳定这一特性,而参照的各随机 Hough 变换算法时间都明显呈增长趋势。特别在多目标圆情况下 SQHT 的检测效率优势明显,而基于随机搜索的

算法不可避免在多目标圆情况下出现三点标的同一圆概率降低的情况。另外,两种改进的 Hough 变换检测时间比经典随机 Hough 变换还长,说明随机 Hough 改进算法的关键参数对算法效率有较大影响,这又会衍生出参数自适应方法的讨论。

表 1 各算法检测时间对比

Tab. 1 Comparison of circle detection time (ms)

	SQHT	RHT	RHT+	RCD
C ₁	15	31	38	40
C ₂	15	42	38	78
C ₄	15	62	72	176
C ₉	15	140	146	2012
C ₁₆	16	280	265	>2 500
C ₃₀	16	806	820	>2 500

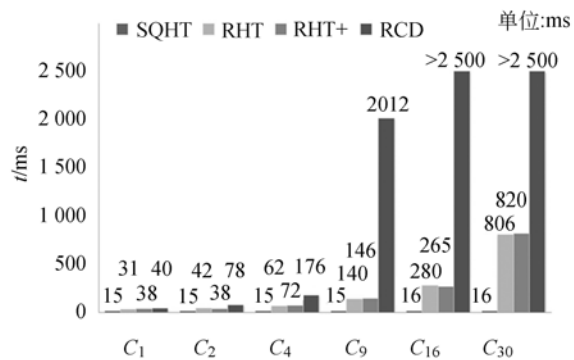


图 6 各算法圆检测时间对比

Fig. 6 Comparison of circle detection time for several algorithms

第 2 组为在图像组添加了密度为 0.01 的椒盐噪声后的边缘检测,目的是测试噪声对检测效率的影响,各算法检测时间结果如图 7 所示。

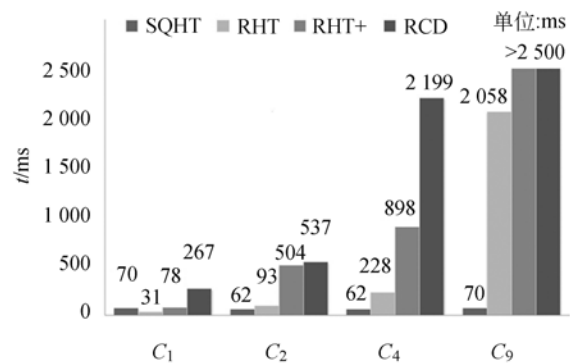


图 7 加入 0.01 噪声各算法圆检测时间对比

Fig. 7 Comparison of detection time for several algorithms with 0.01 pepper-salt noise

从结果可以看出,加入噪声后各算法的检测效率均有所降低,但 SQHT 检测效率不随目标圆个数的增加而改变,而其他随机 Hough 变换算法则改变很多。相比于第 1 组试验结果,参照算法在有噪声的多目标圆下的检测效率已明显下降。以图像 C_9 为例, SQHT 仅从 15 ms 提高到 10 ms,而 RHT 从 806 ms 增加到 2 058 ms, RHT+ 和 RCD 更有数十倍效率的增加。这也说明 SQHT 算法的适用范围更广。

由第 1、2 组试验可以初步判断,在同一噪声水平下,不同目标圆个数对 RHT 算法检测效率的影响较小。为进一步验证算法性能,第 3 组为辅助试验,在图像组添加了密度为 0.03 和 0.05 的椒盐噪声后检测 SQHT 时间。结合第 1、2 组试验,各噪声水平下检测结果如表 2 和图 8 所示。

表 2 不同噪声等级 SQHT 检测时间对比

Tab. 2 Comparison of circle detection time for SQHT at different noise levels (ms)

	无噪声	0.01 噪声	0.03 噪声	0.05 噪声
C_1	15	70	141	218
C_2	15	62	141	234
C_4	15	62	156	249
C_9	15	70	156	255
C_{16}	16	70	171	260
C_{30}	16	71	171	265

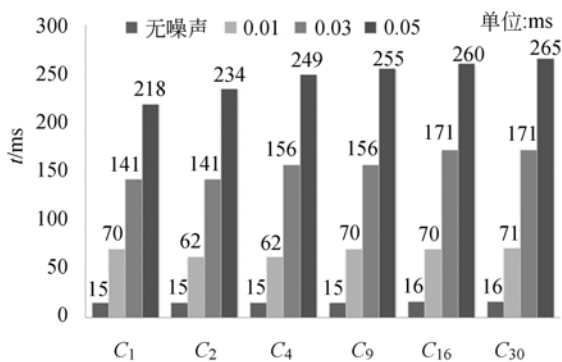


图 8 不同噪声等级 SQHT 检测时间对比

Fig. 8 Comparison of detection time for SQHT at different noise levels

从结果可以看出,随着噪声密度的增加,检测时间也呈增加趋势,但在同一噪声密度条件下,检测时间基本不会随目标圆个数的增加而增加,这也说明了目标圆个数对 SQHT 算法检测效率的

影响小。

第 4 组为测试 SQHT 算法在大量目标圆且多非目标点情况下的性能,目的是测试算法的鲁棒性。在多达 40 个目标圆的图像中加入密度为 0.02 的椒盐噪声及其他边缘点。其中:目标圆的半径相差极大,同时存在部分边缘交叉重叠的情况,如图 9(a)所示。加入非目标噪声后如图 9(b)所示。检测完毕去除圆目标后的结果如图 9(c)所示。

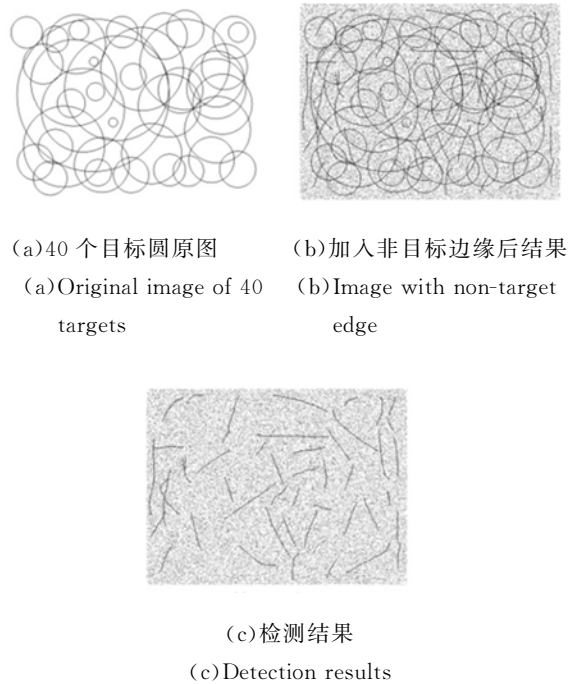


图 9 SQHT 抗干扰性测试

Fig. 9 Performance test of SQHT anti-interference

从结果可以看出,本文算法成功检测出了 40 个目标圆,同时保留了其他非圆边缘,证明 SQHT 算法具有良好的鲁棒性和抗干扰性。

5 结 论

受随机 Hough 变换及其改进圆检测算法启发,本文提出了基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法。该算法充分利用了圆的几何特性和梯度信息,基于简单遍历的思想,能快速定位目标圆,从而获取基元参数。通过对校正片图片的检测试验可知,相比于随机 Hough 变换算法,在单目标圆检测情况下,其检测效率至少提高 2 倍以上;在多目标圆(5 个及以上)且有非目标边缘点情况

下,检测效率提高5倍以上。SQHT算法具有检测快速、时间可控、适用广泛、抗干扰性强等特点。

参考文献:

- [1] XU L, OJA E. A new curve detection method: Randomized Hough Transform(RHT)[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5):331-338.
- [2] XU L, OJA E, KULTANEN P. Randomized Hough Transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities[J]. *Computer Vision Graphics Image Process: Image Understanding*, 1993, 57(2):131.
- [3] 陈燕新, 戚飞虎. 基于随机 Hough 变换的快速圆检测方法[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(10):17-20.
CHEN Y X, QI F H. Fast circle detection using randomized Hough transform [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1998, 32(10):17-20. (in Chinese)
- [4] 束志林, 戚飞虎. 一种新的随机 Hough 快速圆检测算法[J]. 计算机工程, 2003, 29(6): 87-89.
SHU ZH L, QI F H. A novel algorithm for circle detection using randomized Hough transform [J]. *Computer Engineering*, 2003, 29(6): 87-89. (in Chinese)
- [5] CHEN T C, CHUNG K L. An efficient randomized algorithm for detecting circles [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 83(2):172-191.
- [6] IOANNOU D, HUDA W, LAINE A F. Circle recognition through a 2D Hough transform and radius histogramming[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 1994, 20:256-260.
- [7] 岳健, 项学智. 一种改进的 Hough 圆检测算法[J]. 应用科技, 2006, 33(6):74-76.
YUE J, XIANG X ZH. An improved algorithm of Hough circle detection[J]. *Applied Science and Technology*, 2006, 33(6):74-76. (in Chinese)
- [8] 王强, 胡建平, 胡凯. 一种用于圆检测的快速 Hough 算法[J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(9):970-973.
WANG Q, HU J P, HU K. A high speed Hough transform algorithm for circle detection[J]. *Mini-Micro System*, 2000, 21(9): 970-973. (in Chinese)
- [9] 贾平, 徐宁, 张叶. 基于局部特征提取的目标自动识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7):1898-1905.
JIA P, XU N, ZHANG Y. Automatic target recognition based on local feature extraction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1898-1905. (in Chinese)
- [10] 陈传虎, 邹德旋, 刘海宽. 应用统计距离实现虹膜定位[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11):2516-2522.
CHEN CH H, ZOU D X, LIU H K. Iris location algorithm by counting distances[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2516-2522. (in Chinese)
- [11] 王平, 张力, 周长其. 基于种子点的粘连巨噬细胞图像的分割方法[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 808-813.
WANG P, ZHANG L, ZHOU CH Q. Segmentation method to adhesion macrophage image based on seeding point [J]. *Chinese Journal of Crystals and Displays*, 2012, 27(6):808-813. (in Chinese)
- [12] 郑咸义, 姚仰新, 雷秀仁, 等. 应用数值分析[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2008:146-148.
ZHENG X Y, YAO Y X, LEI X R, et al.. *Numerical Analysis*[M]. Guangzhou: SCUT Press, 2008:146-148. (in Chinese)
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.*, 1979, SMC-9:62-66.

作者简介:



叶峰(1972—),男,广东高州人,博士,副研究员,2003年于华南理工大学获得博士学位,主要研究方向为机器视觉及智能控制, E-mail: mefengye@scut.edu.cn



陈灿杰(1988—),男,广东汕头人,硕士研究生,2011年于华南理工大学获得学士学位,主要研究方向为机器视觉与嵌入式控制系统, E-mail: can-jchen@163.com

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)

本文仅从基于单轮廓的图像进行分析,与图像预处理算法的相互结合方面有待进一步讨论。