

结合多阶段优化的圆检测算法

蒋联源^{1,2} 王智文² 李春贵² 孔凡福³ 邓向姣²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 广西科技大学计算机科学与通信工程学院, 柳州, 545006; 3. 柳州市广播电视台, 柳州, 545006)

摘要: 在常规圆检测算法中, Hough 变换、随机 Hough 变换以及随机圆检测算法的检测效率低, 导致难以适用于复杂场景或者对检测速度有较高要求的情况。为了提高圆检测的效率, 本文从采样点的选取、候选圆的确定以及真圆的确认 3 个阶段进行分析, 结合这 3 个阶段的优化方法, 提出一种结合多阶段优化的圆检测算法。人工图像和实际图像的实验结果表明: 该算法较其他算法有效地提高了圆检测的速度, 并且具有较好的检测鲁棒性和检测精度。

关键词: 圆检测; 多阶段优化; 采样点; 候选圆

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Multi-stage Optimized Algorithm for Circle Detection

Jiang Lianyuan^{1,2}, Wang Zhiwen², Li Chungui², Kong Fanfu³, Deng Xiangjiao²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. College of Computer Science and Communication Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, 545006, China; 3. Liuzhou Radio and Television Station, Liuzhou, 545006, China)

Abstract: As a basic and fundamental issue in computer vision area, many algorithms have been proposed to address the issue of circle detection, such as Hough transform, randomized Hough transform, randomized circle detection and so on. However, the low efficiency of these methods makes them hard to be used in complicated situations or conditions that require much higher circle detection speed. To improve the efficiency of circle detection, this paper analyzes three stages, including the selection of sampling points, the determination of candidate circle and the confirmation of true circle. Combined with the optimization of these three stages, a circle detection algorithm with multi-stage optimization is proposed. Experimental results of synthetic images and real images indicate that the proposed algorithm has faster detection speed compared with other methods, and has a high detection accuracy and strong robustness.

Key words: circle detection; multi-stage optimization; sampling point; candidate circle

引言

圆的检测是计算机视觉、模式识别中的一个重要研究内容^[1-3]。由于圆检测能应用于许多工业应用中的圆形目标定位,因此最近几十年从数字图像中检测出圆已得到研究人员的广泛关注。众所周知,Hough变换是圆检测的常用方法,主要优点表现为:能较好地适用于具有噪声的图像中,以及容易实现并行计算。由于Hough变换用于圆检测时所需的计算时间和存储空间过大,许多改进的Hough变换被提出^[4]。其中Xu等^[5,6]提出的随机Hough变换(Randomized Hough transform, RHT)是对Hough变换的重大改进。该方法首先从边缘点集中随机选取3点,通过这3点确定一个圆参数;判断这个圆参数是否与链表中某个参数单元的值近似相等,如果均不近似相等则新建该圆参数单元并插入到链表中的适当位置,否则将该参数单元的计数加1;若计数不小于事先规定的阈值 n ,则找到了一个候选圆,然后通过证据积累进一步判断该候选圆是否为真圆。与Hough变换相比,RHT具有存储空间需求小、快速、无限的参数空间和任意高的检测精度的优点。尽管对于简单图像的检测,RHT有着非常高的检测效率,但是对于较为复杂的图像,RHT的效率也会受到很大影响,因为在图像中的随机采样导致了采样有效率的明显偏低。因此研究人员相继提出一些RHT的改进与扩展算法^[7-11]。如黎自强等^[7]在寻找用于计算候选圆的圆参数的3个点时,先随机采样2点,然后在这2点的中垂线上寻找第3点,以提高采样有效率;此外,在选择这3个采样点时,通过淘汰掉两种噪声点,进一步提高了有效采样率。蒋联源^[10]在选择3个采样点时,利用概率采样来提高采样有效率;在寻找候选圆时,通过定义相关特征点,快速排除大量假圆,从而有效提高检测速度。

为了避免RHT中因参数累积所花费的大量内存空间与计算时间,Chen等^[12]提出了随机圆检测算法(Randomized circle detection, RCD)。对于从图像空间中随机采样的4个点,其中相互距离均大于阈值 ϵ 的任意3点均能确定一个圆参数,若另外1点也在该圆上则进行证据积累以判断是否为真圆。

RHT和RCD两种算法都大致可以分为获取采样点、确定候选圆、判断候选圆3个阶段。为了能得到更优的圆检测算法,本文对这3个阶段的优化进行有效融合,提出一种结合多阶段优化的圆检测算法。该算法的检测速度快于其他算法,相应的实验结果验证了算法的有效性。

1 算法基本思想

本文算法的基本框架与RHT和RCD算法相似,都是存在3个基本阶段,具体描述如下:

(1) 选取采样点。从边缘图像中选取3个采样点的目的是为了计算得到1个圆参数。这样的圆参数所对应的圆恰好为真圆的概率非常低。

(2) 寻找候选圆。由于3点所计算得到的圆参数所对应的圆是真圆的概率非常低。因此,为了减少后续工作的计算量,可以通过某种方法,筛选出较大概率上能成为真圆的圆参数。这样的圆参数所对应的圆被称为候选圆。

(3) 得到真圆。对于每一个候选圆,都需要对其进行确认,以判断其是否为真圆。

本文对以上3个基本阶段进行分析,融合已优化的各阶段,提出一种结合多阶段优化的圆检测算法。

1.1 采样点的选取方法

参照文献^[9],3个采样点的选取方法如下:通过1个随机采样点 $P_1(x_1, y_1)$ 按水平向右方向搜索到的图像点作为第2点 $P_2(x_2, y_2)$,从这两点间的某点处以竖直方向搜索到的图像点作为第3点 $P_3(x_3, y_3)$ 。为了确定搜索第3点时 P_3 的横坐标,令 $x_3 = \text{int}(x_1 + (x_2 - x_1)/n)$ 。这里的 n 是一个位

于 $(1, 2) \cup (2, x_2 - x_1]$ 中的实数。

为了更加具体地阐述采样点的选取方法, 此处用 1 个实例进行介绍。假定图 1 中不存在噪声, 对于存在噪声的情况, 将噪声视为图像点, 搜索方法与下述方法相同。如图 1 所示, 图中存在 3 个圆, 假设由随机采样得到的点 $A(P_1(x_1, y_1))$ 为圆 O 上的点, 则从点 A 处以水平向右的方向搜索到的图像点 B 作为 $P_2(x_2, y_2)$; 令 $x_3 = \text{int}((x_1 + (x_2 - x_1)/n))$, 以横坐标为 x_3 在竖直方向搜索到的图像点 C 作为 $P_3(x_3, y_3)$; 待判定由 $A(P_1), B(P_2), C(P_3)$ 这 3 点不能得到真圆后, 继续以横坐标为 x_3 在竖直方向搜索下一图像点 D 作为点 P_3 ; 待判定由 $A(P_1), B(P_2), D(P_3)$ 不能得到真圆后, 同样将图像点 E 作为点 P_3 ; 待判定由 $A(P_1), B(P_2), E(P_3)$ 不能得到真圆后, 将图像点 F 作为点 P_3 ; 待判定由 $A(P_1), B(P_2), F(P_3)$ 也不能得到真圆后, 此时已搜索完横坐标为 x_3 的竖直方向上的所有图像点。于是从点 B 处以水平向右的方向搜索到的图像点 G 作为 $P_2(x_2, y_2)$, 令 $x_3 = \text{int}((x_1 + (x_2 - x_1)/n))$, 以横坐标为 x_3 在竖直方向搜索到的图像点 H 作为 P_3 , 此时可判定由 $A(P_1), G(P_2), H(P_3)$ 这 3 点能计算得到一个真圆。若找到的真圆个数达到预设要求, 则检测结束; 否则重新随机采样一图像点, 开始下一个圆的检测。

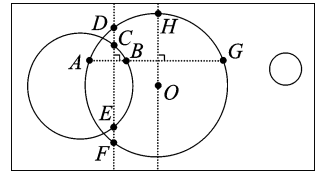


图 1 其余两点的搜索图例
Fig. 1 Figure example for searching the other two points

考虑到 3 个采样点间的相互距离均应大于阈值 ϵ , 因此在首次搜索第 2 点 $P_2(x_2, y_2)$ 时, 令 $x_2 = x_1 + \epsilon$ 。同样的, 在首次向上搜索第 3 点 $P_3(x_3, y_3)$ 时, 令 $y_3 = y_1 + \epsilon$; 在首次向下搜索第 3 点 $P_3(x_3, y_3)$ 时, 令 $y_3 = y_1 - \epsilon$ 。

1.2 候选圆的确定方法

参照文献[10], 特征点包括极值点和对称点, 下面将分别给出极值点和对称点的定义。

(1) 对于理想圆上, 横坐标最小的点、横坐标最大的点、纵坐标最小的点和纵坐标最大的点, 这 4 个点统称为该圆的极值点。分别如图 2 中的点 A, B, C, D 所示。

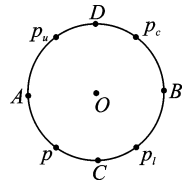


图 2 极值点与对称点
Fig. 2 Extreme points and symmetric points

(2) 如图 2 所示, 对于理想圆 $O(a, b, r)$ 上的任意一点 $p(p_x, p_y)$, 点 $p_l(2a - p_x, p_y)$, $p_u(p_x, 2b - p_y)$ 和 $p_c(2a - p_x, 2b - p_y)$ 分别称为圆 O 上关于点 $p(p_x, p_y)$ 的水平、垂直和中心对称点。

为了阐述寻找对称点和极值点的方法, 这里以寻找图 2 中纵坐标最大的极值点为例进行介绍, 其他极值点以及对称点的寻找方法与此相同。在理想情况下, 图 2 中纵坐标最大的极值点 D 的横纵坐标为 $(a, b+r)$ 。但是, 由于现实中的图像被数字化后, 图像中像素点的坐标均为整型, 因此需要对极值点 D 的坐标进行处理。处理方法如下: (1) 确定包围坐标 $(a, b+r)$ 的能构成最小正方形的 4 个像素点, 即坐标分别为 $(\text{int}x, \text{int}y)$ 、 $(\text{int}x + 1, \text{int}y)$ 、 $(\text{int}x, \text{int}y + 1)$ 和 $(\text{int}x + 1, \text{int}y + 1)$ 的 4 个像素点, 这里的 $\text{int}x = \text{int}(a)$, $\text{int}y = \text{int}(b+r)$ 。(2) 在这 4 个像素点中, 若存在位于圆 O 上的图像点, 则这样的图像点都被认为是纵坐标最大的极值点; 否则, 认为不存在纵坐标最大的极值点。

候选圆的确定方法如下: (1) 对于给定的一个圆参数所对应的圆, 统计该圆上极值点个数和关于第 1 个采样点以及第 3 个采样点的对称点个数(相同坐标的点只统计一次, 与此处的 2 个采样点中的某点坐标相同的点不进行统计), 即得到特征点的总个数。(2) 若特征点的总个数大于给定的阈值 t , 则认为该圆为候选圆; 否则认为该圆为假圆。

1.3 判断候选圆是否为真圆的方法

在 RHT, RCD 算法中, 判断一个候选圆是否为真圆的方法如下: 对于边缘点集中的任意一个点

$p(p_x, p_y)$,若式(1)成立,则认为点 p 位于候选圆 $O(a, b, r)$ 上;否则,认为点 p 不在该候选圆上。其中,式(1)中的 δ 是由于图像离散化等原因而定义的一个距离阈值。如果边缘点集中所有位于候选圆 O 上的点数比 M_{\min} 大,则该候选圆被认为是一个真圆;否则,该候选圆被认为是一个假圆。这里的阈值 $M_{\min} = \lambda \times 2\pi r$,其中 λ 为一个比例系数。

$$\left| \sqrt{(p_x - a)^2 + (p_y - b)^2} - r \right| < \delta \quad (1)$$

参照文献[13],关于判断候选圆是否为真圆的方法可从以下3方面进行优化。

(1)在证据积累过程中,对于任意的一个点,若该点不是位于边长分别为 $2(r+\delta)$ 与 $\sqrt{2}(r-\delta)$ 、中心均为候选圆圆心的两个正方形的差中,则认为该点不是候选圆上的点。即只需通过简单的比较操作,就可以排除大部分非候选圆上的点,从而提高运算速度。

(2)对于式(1),可通过平方等运算来对该公式进行化简,以避免开方运算和求绝对值运算,从而提高计算速度。

(3)证据积累时,若边缘点集中仍未进行计算的点数与已被确定落在候选圆上的点数之和小于阈值 M_{\min} ,则可直接判定该候选圆是一个假圆,从而减少了证据积累的计算量。

2 算法描述

设 P 为图像空间的边缘点集, k 为当前连续采样失败的次数, K_{\max} 为可容忍的最大连续采样失败次数。则本文算法步骤如下:

(1)将所有边缘点依次存储到 P 中,令 $k=0$ 。

(2)按第1.1节所述方法从 P 中获取3个采样点,由这3点计算得到一个圆参数。

(3)按第1.2节所述方法,统计该圆参数所对应圆上的特征点个数。若特征点个数大于阈值 t ,则认为该圆为候选圆,转向步骤(4);否则认为该圆为假圆,转向步骤(5)。

(4)利用第1.3节所述方法,判断候选圆是否为真实圆。如果是,转向步骤(6),否则转向步骤(5)。

(5)令 $k=k+1$ 。如果 $k > K_{\max}$ 成立,则认为图像中已不存在圆,结束;否则,转向步骤(2)。

(6)检查当前已被检测出的圆个数是否等于预设的个数。若是,则检测完成;否则,从 P 中删除位于该真圆上的点,重置 $k=0$,转向步骤(2)。

3 实验结果

为了验证本文算法的快速和高精度性能,大量的人工图像和实际图像被用于实验。由于篇幅限制,仅给出3个实验,并与RHT、RCD、文献[9]和文献[10]方法进行实验对比。为了实验的公平比较,各算法只要检测到规定的圆个数,检测即结束。所有算法都采用C++语言编程实现,文中所有实验均在Core 2双核处理器(2.93 GHz)、2 GB内存的计算机上进行。在实验1中,RHT的 λ, δ, n_t 分别取0.7, 0.5, 2, RCD的 $\lambda, \delta, \epsilon$ 分别取0.7, 0.5, 6,文献[9]的 $\lambda, \delta, \epsilon, n$ 分别取0.7, 0.5, 4, 2,文献[10]的 $\lambda, \delta, \epsilon, m, t$ 分别取0.7, 0.5, 10, 3, 9,本文算法的 $\lambda, \delta, \epsilon, n, t$ 分别取0.7, 0.5, 4, 1.4, 9。在实验2,3中,除了参数 λ 的取值为0.6,其他参数都不变。

3.1 实验1

参考文献[12]中的人工图像生成方法。图3(a)是一幅大小为 256×256 (单位:像素,下同)的图像,该图像中共有6个圆、1 037个图像点。为了比较RHT、RCD、文献[9]、文献[10]以及本文算法的性能,向图3(a)中增加比例范围为30%~180%的噪声。增加1 867个噪声点后的图像如图3(b)所示。表1是这5个算法执行50次的平均时间。用本文算法对图3(b)的检测结果如图3(c)和表2所示。

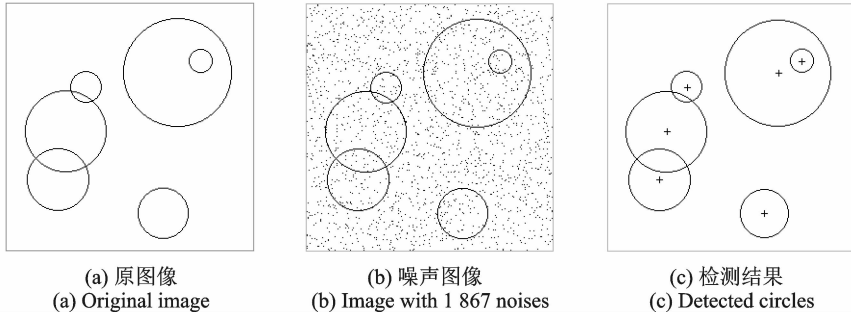


图 3 人工图像(I)
Fig. 3 Synthetic images (I)

表 1 人工图像(I)的执行时间比较

Tab. 1 Time performance comparison for synthetic images(I)

噪声比/ %	RHT/ s	RCD/ s	文献[9]/ s	文献[10]/ s	本文算 法/s
30	0.008 7	0.011 2	0.001 9	0.001 3	0.000 9
60	0.053 0	0.077 7	0.005 0	0.002 2	0.001 2
90	0.200 6	0.258 6	0.011 9	0.002 8	0.001 6
120	0.577 2	0.579 7	0.026 5	0.004 7	0.001 9
150	1.600 9	1.538 2	0.059 9	0.005 6	0.003 1
180	2.960 9	3.325 3	0.093 9	0.007 2	0.004 1

表 2 应用本文算法检测图 3(b)的结果

Tab. 2 Detection results of Fig. 3(b) using the proposed method

序号	圆心横坐标 a		圆心纵坐标 b		圆半径 r	
	检测值	真实值	检测值	真实值	检测值	真实值
1	177.30	177	70.97	71	56.01	56
2	161.88	162	216.85	217	26.06	26
3	60.95	61	131.98	132	41.82	42
4	53.24	53	182.08	182	32.03	32
5	82.21	82	85.97	86	15.91	16
6	201.06	201	58.77	59	12.12	12

3.2 实验 2

图 4(a)为有 3 个圆(其中 2 个圆有部分缺损)、1 个矩形和 1 个椭圆的 256×256 图像,共 946 个图像点。依次向图 4(a)中增加比例范围为 $40\% \sim 200\%$ 的噪声,其中增加 1 892 个噪声点后的图像如图 4(b)所示。表 3 是这 5 个算法执行 50 次的平均时间。用本文算法对图 4(b)的检测结果如图 4(c)和表 4 所示。

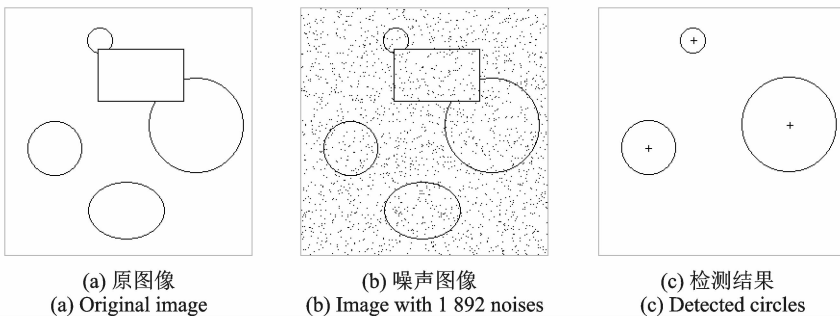


图 4 人工图像(II)
Fig. 4 Synthetic images (II)

表 3 人工图像(II)的执行时间比较

Tab.3 Time performance comparison for synthetic images (II)

噪声比/ %	RHT/ s	RCD/ s	文献[9]/ s	文献[10]/ s	本文算 法/s
40	0.261 5	0.222 8	0.037 8	0.005 6	0.007 2
80	0.995 0	0.727 0	0.048 4	0.007 5	0.009 1
120	3.858 5	1.859 2	0.106 1	0.011 9	0.010 3
160	7.860 2	3.840 1	0.183 5	0.021 5	0.014 0
200	15.735	18.651 2	0.321 7	0.029 9	0.017 5

表 4 应用本文算法检测图 4(b)的结果

Tab.4 Detection results of Fig. 4(b) using the proposed method

序号	圆心横坐标 a		圆心纵坐标 b		圆半径 r	
	检测值	真实值	检测值	真实值	检测值	真实值
1	51.05	51	145.36	145	28.06	28
2	197.92	198	121.04	121	49.13	49
3	97.81	98	32.82	33	12.99	13

3.3 实验 3

对 140×140 的实际图像(图 5(a))进行边缘检测后,得到共有 1 688 个图像点的边缘图像(图 5(b))。用 RHT、RCD、文献[9]、文献[10]与本文算法分别对图 5(b)检测 50 次,所花费的平均时间分别为 5.340 7, 2.119 7, 0.314 8, 0.031 2 和 0.012 2 s。这 5 种算法都能正确地检测出 4 个圆,用本文算法对图 5(b)的检测结果如图 5(c)所示。

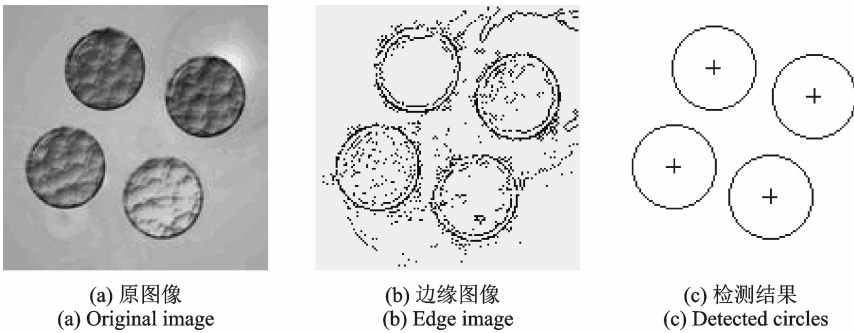


图 5 实际图像
Fig.5 Real image

4 结束语

为了更好地提高圆检测的效率,本文提出了一种结合多阶段优化的圆检测算法。该算法从获取采样点的方法、寻找候选圆的方法及确认真圆的方法 3 方面进行分析,结合目前已被优化的这些阶段,实现了更快的圆检测速度。本文算法的优势为:在具备较好的检测鲁棒性和精度的前提下,本文算法的检测速度快于其他圆检测算法。此外,本文算法有如下几点需要说明:

- (1) 在第 1.1 节中,对于随机采样的第 1 个点 P_1 ,通过 P_1 无论是否能找到真圆,在后续的随机采样第 1 个点时,都不会再采样该点。因为若采样之前已经被随机采样过的第 1 个点不会检测到真圆。
- (2) 本文算法的第 3 个采样点 P_3 的横坐标值,不能为 P_1 和 P_2 横坐标的平均值。因为若这样计算 P_3 的横坐标值,则 P_3 必为极值。这是与文献[9]的不同之处。
- (3) 从第 1.1 节中获取采样点的方法可知,第 2 个采样点其实就是第 1 个采样点的水平对称点。因此,为了避免重复计算,在统计对称点个数时,本文算法只统计第 1 个采样点和第 3 个采样点的对称点个数。而文献[10]是统计所有 3 个采样点的对称点个数。这是与文献[10]的不同之处。

(4) 在文献[9,10]的证据积累阶段中,均采用了第 1.3 节的 3 点优化。

参考文献:

- [1] Cuevas E, González M. Multi-circle detection on images inspired by collective animal behavior [J]. *Applied Intelligence*, 2013, 39(1): 101-120.
- [2] Ok A O. A new approach for the extraction of aboveground circular structures from Near-Nadir VHR satellite imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3125-3140.
- [3] 常胜江, 孟春宁, 韩建民, 等. 人眼检测技术研究进展[J]. *数据采集与处理*, 2015, 30(6): 1131-1146.
Chang Shengjiang, Meng Chunning, Han Jianmin, et al. Survey of eye detection [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 30(6): 1131-1146.
- [4] Mukhopadhyay P, Chaudhuri B B. A survey of Hough transform [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(3): 993-1010.
- [5] Xu L, Oja E, Kultanen P. A new curve detection method; Randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338.
- [6] Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): Basic mechanisms, algorithms, and computational complexities [J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, 57(2): 131-154.
- [7] 黎自强, 滕弘飞. 广义 Hough 变换: 多个圆的快速随机检测 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18(1): 27-33.
Li Ziqiang, Teng Hongfei. Generalized Hough transform: Fast randomized multi-circle detection [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(1): 27-33.
- [8] Xu L. A unified perspective and new results on RHT computing, mixture based learning, and multi-learner based problem solving [J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(8): 2129-2153.
- [9] Jiang L Y. Fast detection of multi-circle with randomized Hough transform [J]. *Optoelectronics Letters*, 2009, 5(5): 397-400.
- [10] Jiang L Y. Efficient randomized Hough transform for circle detection using novel probability sampling and feature points [J]. *Optik*, 2012, 123(20): 1834-1840.
- [11] Jiang L Y, Ye Y Q, Xu G L. An efficient curve detection algorithm [J]. *Optik*, 2016, 127(1): 232-238.
- [12] Chen T C, Chung K L. An efficient randomized algorithm for detecting circles [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 83(2): 172-191.
- [13] 蒋联源, 苏勤, 祝英俊. 快速随机 Hough 变换多圆检测算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(17): 163-166.
Jiang Lianyuan, Su Qin, Zhu Yingjun. Fast multi-circle detection algorithm with randomized Hough transform [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(17): 163-166.

作者简介:



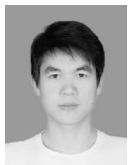
蒋联源 (1981-), 男, 副教授, CCF 会员, 研究方向: 模式识别、图形图像处理, E-mail: jly _ jly _ jly @ 163. com。



王智文 (1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 模式识别、图像处理、人类行为识别。



李春贵 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 机器学习、计算机视觉、图像处理, 本文通讯作者, E-mail: liza4323@163. com。



孔凡福 (1985-), 男, 本科, 研究方向: 模式识别、图像处理。



邓向姣 (1986-), 女, 本科, 研究方向: 模式识别、图像处理。

(编辑:张黄群)

