

改进的 Hough 变换检测圆方法^①

陈小艳¹, 王 强^{1,2}, 李柏林²

¹(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

²(成都工业学院 机械系, 成都 610031)

摘要: 计算机视觉目前已经得到广泛的应用, 通过图像检测圆在工程应用中具有重要的意义. 为了在实时系统中自动检测图像中的圆并且精确得到圆心和半径, 提出了一种改进的 Hough 变换检测圆的方法. 先对图像边界进行过滤, 得到连续边界, 然后对每条连续边界进行排序并等分, 选择三点进行圆心和半径计算, 将传统 Hough 变换检测圆的三维参数降到一维参数来统计, 在降低了计算时间和内存资源占用的同时, 提高了检测圆的准确性. 实验表明, 该方法能够满足实际检测的需要. 同时, 在检测时间上, 可以满足实时性的要求.

关键词: Hough 变换; 圆检测; 实时; 计算机视觉; 图像处理

Improved Hough Algorithm for Circle Detection

CHEN Xiao-Yan¹, WANG Qiang^{1,2}, LI Bo-Lin²

¹(School of Mechanical Engineering, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

²(Department of Mechanics, Chengdu Technological University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Computer vision has already been widely used in engineering. The circle detection using image processing means significantly in engineering. In order to auto-detect the circle and accurately extract the centre and radius, an improved Hough transform algorithm for circle detection is proposed. The image border is filtered to get the continuous borders. And then the continuous borders are sequenced and equal divided. Only three points are chose for computation and three dimension parameters will be reduced to one dimension, which saves the computational time, memory sources and improves the accuracy. Experiments show the proposed method can realize real time detection and meet the reality needs.

Key words: hough transform; circle detection; real time; computer vision; image process

现实生活或工程应用中, 很多物体的形状以曲线的方式进行表现, 如直线、圆、椭圆等. 因此, 如何通过计算机视觉准确快速对物体进行识别或检查是目前研究的一个热点. 对于圆的检测, 常用的技术有形状分析法、环路积分微分法^[1], 基于 Hough 变换的圆检测方法^[2-4], 基于存在概率的圆检测方法^[5], 以及遗传算法^[6]等. 其中 Hough 变换是检测圆的最常见的方式. Hough 变换^[7]是由 Paul Hough 提出的. Hough 变换从数学上实现了从图像空间到参数空间的变换, 并建立了准确的数学变换公式, 最初应用于直线检测, 但是在使用上存在一定的缺陷. 后来 Duda 提出了标准 Hough 变换 SHT^[8], 用极坐标代替直角坐标进行 Hough 变换,

解决了直线的一般形式会遇到的奇异情况, 比如直线斜率无穷大, 参数空间不闭合等. Ballard 一般化了 Hough 变换, 利用图形梯度量加快算法速度, 形成了广义 Hough 变换^[9]. 不管是哪种 Hough 变换, 其本质都是给出一个图形的描述模式, 比如图形点集的方程、函数、表格等, 然后利用这个模式加上遍历参数空间, 把属于该模式的图形点集投射到参数空间的一个点, 最后通过峰值判断来确定要检测的图形. Hough 变换对图像的噪声点不敏感, 可有效地滤除噪声的影响, 以提高结果的准确度, 但 Hough 变换有几个明显的缺陷. 首先, 计算量大; 对于每个边缘点都要映射到参数空间, 对于复杂图形如圆有三个参数, 椭圆有五个

① 基金项目:四川省科技支撑计划(2013GZ0032)

收稿时间:2014-12-18;收到修改稿时间:2015-03-02

参数, 在三维或者五维参数空间搜索峰值需要消耗大量的时间. 其次, 占用内存大; Hough 变换需要存储每个边缘点对应在参数空间的累加值, 导致存储资源消耗较大, 系统开销不足. 最后, 受参数空间的量化间隔限制. 由于图像是离散数据, 参数的离散程度对检测的准确度有很大的影响. 如直线变换成极坐标形式后, 角度在 $\pm 180^\circ$ 范围内的离散程度对计算结果的影响较大, 如果离散太小, 则增加了计算时间和存储空间, 如果离散太多, 则最终检测的准确度受到影响. 为了克服上述缺陷, 尚璐等人^[10]提出了改进的 Hough 变换圆检测算法, 利用圆为中心对称图形的几何特征计算圆心, 然后通过一维 Hough 变换进行半径累积, 得到圆半径. 黄永林等人^[11]通过尺度变化以及二次变换进行圆检测, 陈星^[12]提出结合圆梯度信息进行圆检测的方法, Xu 等人^[13,14]提出了随机 Hough 变换 (Randomized Hough Transform, RHT), 随机 Hough 变换通过在图像空间随机选取三个点来映射成参数空间的一个点, 避免了传统 Hough 变换的庞大计算量. 同时, 采用动态链表结构, 只对得到的参数分配单元进行累积, 降低了内存需求. 但在处理复杂图像时, 由于随机采样仍引入大量的无效单元, 从而造成了大量无效累积.

1 Hough变换原理

Hough 变换将图形空间的二维点变换到参数空间的一个点上, 通过建立累加数组来记录每个图像空间点在参数空间中对应的每个参数值对的数量, 最后通过搜索累加数组中的峰值来判断几何图形. 比如对于直线的检测, 将直线方程 $y = kx + b$ 表示在笛卡尔坐标下的极坐标式 $\rho = x \cos \alpha + y \sin \alpha$. 注意这不是直线的极坐标方程. 表示成极坐标形式是为了避免直线一般形式可能出现的奇异情况, 比如斜率无穷大, 直线截距为 0 等, 给量化搜索带来困难. 图像空间的每个像素坐标 $p(x, y)$ 已知, ρ 和 α 是需要寻找的变量, 对于每个像素坐标, 通过循环角度 α 得到一系列 (ρ, α) 值, 如果像素点在同一条直线上, 则在参数空间对应的 (ρ, α) 值集中在一点上, 最后通过搜索峰值找到累加数组中最大的值确定要找的直线.

圆的方程可以表示为如下形式: $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$, 其中 (a, b) 为圆心坐标, r 为圆的半径, (x, y) 在图像中为像素坐标. 在参数

空间, 圆的方程表示为以 (a, b, r) 为参数的方程 $(a - x)^2 + (b - y)^2 = r^2$, 该方程表示的是一个圆锥面. 如图 1、2 所示. 图像中每个像素点在参数空间表现为一个圆锥面. 所有像素点则为一圆锥面簇, 对于圆形边界, 边界上的点在参数空间将会相交于同一个点 (a_0, b_0, r_0) . 通过搜索累加数组中的峰值, 如果多个像素点在参数空间相交于一个点, 则说明这些点在图像空间构成圆形边界. 在参数空间的同一个点的坐标则反映了圆的圆心和半径. Hough 变换检测圆的步骤如下:

- (1) 对图像进行边界检测, 确定要进行 Hough 变换的边界点;
- (2) 建立参数空间的累加数组;
- (3) 确定参数 (a, b, r) 的取值范围, 并确定参数 a, b 的离散增量;
- (4) 循环像素坐标, 在参数 a, b 的取值范围内, 依次计算对应的半径 r ;
- (5) 将每次计算的结果保存在累加数组中;
- (6) 找出累加数组中计数的最大值, 这个值就对应应在图像中圆的圆心和半径.

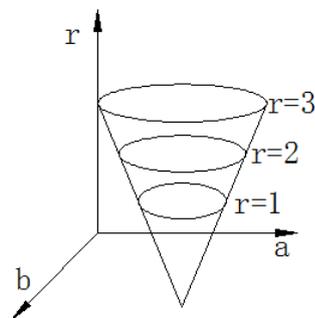


图 1 圆周上点在参数空间的表示

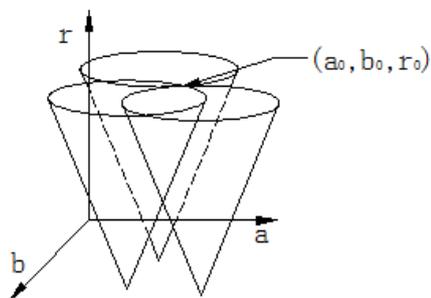


图 2 圆在参数空间的表示

如果图像中有多个圆形, 则从累加计数器中的最大值开始, 依次向下搜索的每个值就对应图形中每个

圆的圆心和半径。

Hough 变换在进行搜索遍历的时候, 至少需要遍历 (a, b, r) 三个参数中的两个, 对于半径已知的图形, 则可以降低一维进行遍历, 这时的遍历速度较快。但是, 很多情况下并不能准确的知道圆的半径, 因此, 遍历搜索需要在三维参数空间进行, 这是比较费时的; 由于要对每个点进行累加计数并存储, 消耗了大量的存储资源; 同时, 对于参数的离散程度, 最终影响到寻找图形的精度。所以 Hough 变换在满足实时性方面有很大的缺陷。这使得传统的圆检测 Hough 变换在实际应用中几乎不可能实现。因此, 涌现出了很多对 Hough 变换进行改进的算法, 这些算法通常都集中在减少存储空间和运算时间上。在实时精确定位系统中, 除了计算复杂度需要考虑外, 圆心和半径的精度也是一个必须考虑的关键指标。

2 改进的Hough变换算法

传统的 Hough 变换对图像的所有边界点进行遍历, 消耗了大量的时间以及存储空间。而且, 受到离散参数的影响, 其圆心的定位精度也有比较大的偏差。在一幅图像中, 被认为是圆形边界点往往只占图像边界的一小部分, 因此, 在进行变换前, 先对图像边界进行预处理, 预先排除明显不是圆形边界的点。然后分离出每条边界, 结合圆形曲线的形状特点, 对每条边界进行三等分, 在对边界点进行 Hough 变换时, 利用三点确定一个圆的性质, 依次取出每段圆弧的一个点进行计算, 将三维参数降到一维。最后用三点坐标解算出圆的坐标和半径, 判断计算出来的圆心和半径的差值, 排除明显偏离真实值的圆心和半径。如果在给定的阈值内, 就可确定这些边界点构成一个圆。由于测量值总是在真实值附近波动并且平均值是最接近真实值的。最后对圆心和半径进行取平均值计算, 即为要寻找的圆的圆心和半径。

2.1 图像预处理

在现实环境中, 由于各种因素的影响, 图像所表现出来的物体是非常复杂的。比如光照条件、物体表面受到污染等, 要检测的物体往往不能够很清晰的表现出来。所以, 在检测之前一般都要先做预处理, 将检测对象的边界轮廓先检测出来, 常用的边界检测方法如 Canny 算子、sobel 算子、Log 算子等。在本文中, 首先采用 Canny 算子对图像进行边界检测, Canny 算子

的目标是找到一个最优的边界, 包括算法能够尽可能多地标识出图像中的实际边缘; 标识出的边缘要尽可能与图像中的实际边缘尽可能接近; 图像中的边缘只能标识一次, 并且可能存在的图像噪声不应标识为边缘。Canny 算子可以理解为以下步骤实现: 首先对图像进行去噪声, 然后寻找图像中的亮度梯度, 最后在图像中跟踪边缘。Canny 算子的检测结果如图 3 所示, 图中只有一个圆形边界, 但是检测出来的边界包含很多非圆形边界, 而且, 存在很多小边界, 这些小边界在实际中对圆形边界的识别影响较小, 但是如果参与运行则需要消耗大量的时间, 所以, 在预处理阶段, 先将这些不连续的小边界排除掉。在这里, 对边界检测后的二值图像采用八邻域算法进行边界跟踪, 如图 4 所示。

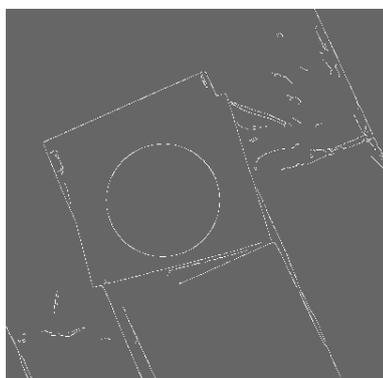


图 3 Canny 算子边界检测结果

3	2	1
4	P	0
5	6	7

图 4 八邻域示意图

平面上每个像素点有八个像素点与它相邻, 将跟踪出来的每条边界分别存储在数组中, 然后, 通过数组中数据量统计将小边界排除。同时, 很好的将各个大边界分别存储起来了, 以方便后面的处理。

2.2 寻找圆心和半径

不同于传统的 Hough 变换方法, 本文充分利用圆的几何特征, 将寻找圆的计算进行简化, 在降低计算复杂度的同时, 准确的找出圆心和半径。

如图 5 所示, 在实际的图像边界检测中, 由于受到多种条件限制, 很多时候并不能检测出一个完整的圆, 本文的方法对于圆弧同样适用。对于每条边界,

首先进行边界点排序,从第一个边界点开始,依次搜索与其相连的边界点,直到一条边界搜索完成;如果是一条完整的圆形边界,则以任意一个点为起始点,搜索每一个相连的点,将排序后的边界点存储在数组中;然后将边界像素等分成三段,依次从每段的第一个点开始,每段选择一个点 $A(x_a, y_a)$ 、 $B(x_b, y_b)$ 、 $C(x_c, y_c)$ 得到三个点,通过三点解算出一个圆心和半径.

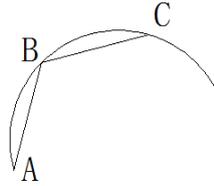


图 5 寻找圆心和半径示意图

设圆的方程为 $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$, 将三点的坐标带入圆的方程, 则求出圆心坐标和半径大小

$$a = ((y_c - y_a) * (y_b^2 - y_a^2 + x_b^2 - x_a^2) + (y_b - y_a) * (y_a^2 - y_c^2 + x_a^2 - x_c^2)) / (2 * (x_b - x_a) * (y_c - y_a) - 2 * (x_c - x_a) * (y_b - y_a)); \tag{1}$$

$$b = ((x_c - x_a) * (x_b^2 - x_a^2 + y_b^2 - y_a^2) + (x_b - x_a) * (x_a^2 - x_c^2 + y_a^2 - y_c^2)) / (2 * (x_c - x_a) * (y_b - y_a) - 2 * (x_b - x_a) * (y_c - y_a)); \tag{2}$$

$$r = \text{sqrt}((x_a - a)^2 + (y_a - b)^2); \tag{3}$$

遍历每一条边界,得到一系列圆心和半径值,将圆心和半径进行存储.判断所有圆心以及半径的差值,根据设定的阈值,将明显偏离真实半径和圆心值对应的边界点去掉,最后判断在圆周上的点数量与整条边界点数量的比例,如果比例较大,则说明大部分点在同一个圆周上,反之,则说明边界不能构成圆.在实际应用中,为了提高圆心和半径的准确度,像素坐标一般取像素的中点.同时,为了保证不同边界可能在同一个圆周上,先将每个可能的圆找出,然后根据一定的阈值合并相同的边界,这样在边界检测的时候,如果存在一个圆周被检测成了几段圆弧的情况同样适用;最后,将圆心和半径取平均值,得出圆心和半径.具体算法实现步骤如下:

- 1) 采用 Canny 算子进行边界检测;
- 2) 遍历边界检测后的图像,找出每一条连续边界并对每条边界从起始点开始排序存储;
- 3) 为圆心和半径声明存储空间;
- 4) 取出第一条连续边界像素,等分为三段取整,

从三段像素边界点中从第一个点开始分别取出一个点,计算圆心和半径,存储圆心和半径;

5) 判断计算的圆心和半径之间的差值,排除明显偏离圆心和半径的边界点;比较剩下的圆心半径对应的边界点数量与整条边界点数量的比例,如果在设定的阈值内,则可判断边界为圆,反之则不是圆;

6) 重复第四步,直到所有的边界都遍历完成;

7) 合并具有相同圆心和半径的边界,对圆心和半径取平均值,得到要寻找的圆心和半径.

3 实验结果

图 6 是一幅需要定位绳索上小型吊车上的螺母的图像,要求定位螺母的位置并用电动扳手自动拧螺母.采集图像的相机为德国 Baumer 的 TXG 标准千兆 GigE 系列黑白工业相机,图像分辨率 1296x966,采用贴标志圆的方式进行定位,图 7(a)采用 Hough 变换寻找圆心, Hough 变换算法采用开源图像库 opencv 中的函数 HoughCircles 实现.图 7(b)采用本文的方法寻找圆心.从图中可以看出,采用 Hough 变换得到的圆心位置有比较大的偏差,本文的方法能够准确的找出圆心的位置.在运行时间上,两种方法也有比较大的区别,具体如表 1 所示.

表 1 检测结果比较

检测方法	Hough	本文方法
检测结果		
真实半径	118	
半 径	122.403	118.117
圆心坐标	(707.5,367.5)	(702.969,364.151)
偏 差	4.403	0.117
检测时间(毫秒)	129	47

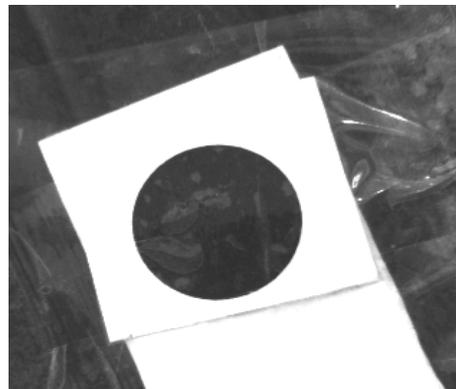


图 6 螺母图像



(a) Hough 变换检测圆结果



(b) 本文方法检测圆结果

图 7 (a)Hough 变换检测圆结果 (b)本文方法检测圆结果

4 结论

Hough 变换将几何图形从图像空间相参数空间进行变换,从数学上解决了从图像中寻找几何图形的方法,具有重要的意义。但是在实际应用中,由于受到运行时间以及存储空间的限制,如果直接应用 Hough 变换进行图像检测和识别,不能够满足实时性的要求。本文通过改进 Hough 变换,根据图形的几何性质来寻找圆心和半径。实验表明,这种方法在准确性以及时间效率上都表现的很好,能够很好的满足要求。

参考文献

1 Daugman JG. High confidence visual recognition of persons

- by a test of statistical independence. IEEE Tran. Pattern Machine Intell, 1993, 15(11): 1148–1161.
- 2 虞旦,韦巍.改进的随机圆检测算法,中国图象图形学报,2009,14(8):1590–1593.
- 3 Torria I. The randomized Hough transform based method for great circle detection on sphere. Patter Recognition Letters, 2007, 28(10): 1186–1192.
- 4 Cauchie J, Fiolet V, Villers D. Optimization of Hough transform algorithm for the search of a centre. Patter Recognition, 2008, 41(2): 567–574.
- 5 张运楚,王宏明,梁自泽,谭民等.基于存在概率图的圆检测方法.计算机工程与应用,2006,42(29):49–51.
- 6 Ramirez VA, Gch C, Pa G. Circle detection on images using genetic algorithms. Patter Recognition Letters, 2006, 27(6): 652–657.
- 7 Hough V, Paul C. Method and Means for Recognizing Complex Patterns. US: Patent 3069654, 1962.
- 8 Duda R, Hart PE. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11–15.
- 9 Ballar DH. Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes. Pattern Recognition, 1981, 13(2): 111–122.
- 10 尚璐,李锐,宋信玉,等.改进的 Hough 变换圆检测算法.电子设计工程,2011,19(14):168–171.
- 11 黄永林,叶玉堂,陈镇龙,乔闹生,等.一种新的快速 Hough 变换圆检测方法.电子测量与仪器学报,2010,24 (9):837–841.
- 12 陈星.一种基于梯度 Hough 变换的同圆心检测新方法.自动化博览,2011,29(7):86–89.
- 13 Xu L, Oja E., Kultanan P. A new curve detection method: randomized hough transform (RHT). Pattern Recognition Letters, 1990, 11 (5): 331–338.
- 14 Xu L, Oja E, Kultanen P. Randomized hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities. Computer Vision Graphics Image Process: Image Understanding, 1993, 57(2): 131–154.