

一种基于 Hough 变换的圆和矩形的快速检测方法

秦开怀 王海颖 郑辑涛

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要 Hough 变换是数字图像处理和机器视觉领域的经典算法, 主要用于直线或线段的检测。虽然某些广义 Hough 变换能够用于检测复杂的 2 维图形, 但其通常都具有存储空间大、计算时间长、可靠性差等不足, 而且对于需要使用导数或梯度信息的算法而言, 往往对图像中的噪声比较敏感、鲁棒性差。为了对平面规则图形进行快速准确检测, 在传统的直线 Hough 变换的基础上, 结合平面规则图形的几何特征, 提出了一种检测平面矩形和圆的快速通用方法。该算法首先对图像进行滤波处理, 并用 Canny 算子做边缘检测, 先得到闭合的轮廓曲线, 再利用形状角 D_a 对轮廓曲线进行粗分类; 然后分门别类进行细致、准确的图形识别。该检测方法, 由于只需要进行简单的 1 维和 2 维 (直线) 投票, 而且完全不需要任何导数信息, 从而大大提高了圆检测的速度和鲁棒性。实验表明, 该检测方法适用于各种常见平面规则图形的检测和识别, 并且检测速度快、精度高。

关键词 图像识别 Hough 变换 平面规则图形 几何特征

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)01-0109-07

A Unified Approach Based on Hough Transform for Quick Detection of Circles and Rectangles

QIN Kaihuai WANG Haiying ZHENG Jitao

(Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Hough transform (HT) is a typical algorithm used for the detection of lines or line segments. The generalized HT can be used for detection of complex 2D polygons, but it needs voting in 3 or more dimensions. This results in the need of large memory space and long computing time. And some of its variations, in which the derivative/gradient information of the image is needed, are sensitive to noise in images, so that the robustness of the methods decreases. This paper presents a unified approach based on Hough Transform for quick detection of planar rectangles and circles. The presented approach introduces a geometrical invariant — the Shape Angle D_a , and makes good use of geometric properties of polygons for roughly classifying shapes of closed edges that are detected by Canny detector. It does not need any derivative/gradient information of images but simple computation and only 1D or 2D votes to improve the robustness and speed up the computation of the algorithm presented. Finally, it is shown by the experiments that this approach can be used for detecting various planar regular polygons, and it is not only quick but also accurate.

Keywords image recognition, Hough transform, planar regular figure, geometric feature

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA01Z326); 国家自然科学基金项目 (60773144); 北京市自然科学基金项目 (4072015)

收稿日期: 2008-04-25 改回日期: 2009-01-20

第一作者简介: 秦开怀 (1958—), 男。清华大学计算机系教授, 博士生导师。研究领域包括: 计算机图形学及动画、超大屏幕投影显示墙及自由立体显示、图像处理与可视化、计算机辅助几何造型、小波分析、虚拟现实等。E-mail: qkh-dcs@tsinghua.edu.cn

0 引言

一些常见的平面规则图形,如三角形、正方形、长方形、圆、正六边形、正八边形等在工业产品检测、生物信息提取、集成电路板在线质量检测、交通标识牌识别等领域都有着广泛的应用。通常的图形检测方法只能用于某一具体案例,例如:基于 BP 网络分类器^[1]的方法只对检测三角形交通标识牌有效;加窗 Hough 变换 (windowed Hough transform)^[2]只适用于矩形的检测。但在某些应用领域,实际情况往往比较复杂,比如交通标识牌通常有三角形、圆形、矩形等,电路板上的元器件有圆形和矩形(包括正方形和长方形)之分等等。

圆形检测是图像处理 and 计算机视觉领域的经典问题之一,其在产品检测、生物信息识别(人脸/虹膜识别)、集成电路板在线质量检测等许多领域都有着广泛的应用。进行圆检测的常用方法包括 Hough 变换^[3-4]及相应的改进算法、环路积分微分法^[5]、最小二乘拟合算法、模拟退火和遗传算法^[6]等。

经典的 Hough 变换算法是先将参数空间离散化为许多小格,然后依次带入离散参数值,使计算出的参数结果值落在某个小格内,并使该小格的累加器加 1,即“投票”,票数最多者即为 Hough 变换所得到的结果。这种投票的方法体现了 Hough 变换抗噪声干扰的鲁棒性^[7],但当参数空间超过 2 维时,由于 Hough 变换的时间消耗和所需存储空间的急剧增大通常是无法忍受的,因此,很多 Hough 圆检测的改进算法都要先降低参数空间的维数,例如,目前常用的计算机视觉程序库——OpenCV 中的圆检测函数,采用的就是两步检测法——2IHT (2-1 Hough transform),该检测法的第 1 步,由于圆心必位于轮廓线上每个点的梯度方向上,因此可以利用梯度信息,通过一个 Hough 变换的 2 维投票及其局部峰值来确定圆心;第 2 步,再通过 1 维 Hough 变换确定圆的半径^[8]。

但在实际应用中,由于受噪声干扰、背景复杂等因素影响,特别是梯度信息对噪声十分敏感,致使经常会造成大量的漏检或误检。广义 Hough 变换^[3-4]及其相应的改进算法,由于通常需要在 3 维空间进行投票而造成时空复杂度高、速度慢等问题。

针对上述存在的问题,本文结合平面规则图

形的几何特征,提出了一种基于传统直线 Hough 变换的图形检测方法,它首先对原始图像进行滤波,并通过 Canny 边缘检测方法检测出轮廓线;然后利用几何不变量——形状角 D_α 对轮廓图形进行粗分类;接着再对简单分类后的轮廓图形,利用直线 Hough 变换提取其几何特征;最后,根据其几何特征最终识别出物体的形状。特别是通过改进的 Hough 变换来识别圆的参数,即可以快速得到准确的检测结果。

1 几何不变量——形状角

对于给定的原始图像,为了降低噪声的影响,需要对图像进行预处理,虽可采用中值滤波来对图像进行平滑处理,但在去除噪声的同时也会造成物体边缘的模糊,因此需先用图像增强的方法对模糊物体的轮廓进行锐化;然后采用 Canny 算子通过对预处理的图像进行边缘检测来提取各种形状的物体轮廓;最后对轮廓线进行细化处理。为了避免不必要的盲目投票,对于一个检测后的闭合轮廓,可以利用一个几何不变量——形状角 (shape angle) D_α 来对该轮廓进行初步分类。形状角 D_α 的定义^[9]如下:

$$D_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \arccos(\mathbf{g}_i \cdot \mathbf{m}_i) \quad (1)$$

其中, α_i , \mathbf{g}_i 和 \mathbf{m}_i 的定义如下:对于轮廓上的每一点,定义其与轮廓质心的连线为 \mathbf{m}_i ,该点的对应法向量为 \mathbf{g}_i ,二者夹角为 α_i 。轮廓上每一点对应 α_i 的平均值就是该闭合曲线的形状角 D_α (如图 1 所示)。

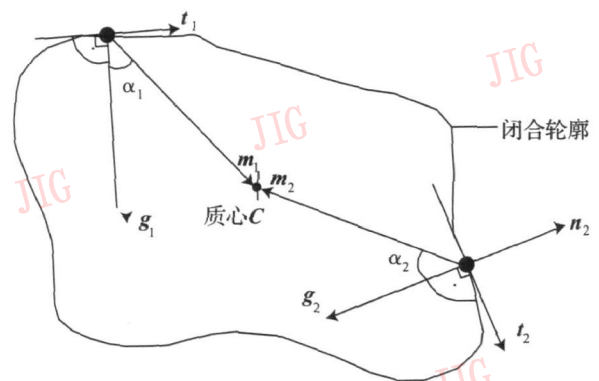


图 1 D_α 的计算示意图

Fig 1 Computing the shape angle D_α

由于形状角 D_α 的大小仅与轮廓的几何形状有

关, 而与其所在的位置和方向无关 (如图 2 所示), 因此 D_a 可以用来对轮廓的形状进行初步的分类。例如, 理想圆的 D_a 是 0。可见, 对于 $D_a \leq \varepsilon$ 的图形可以初步认为是圆, 而对于 $22.5 - \varepsilon \leq D_a \leq 22.5 + \varepsilon$ (通常可取 $\varepsilon = \pi/6$) 的图形就可以分到正方形一

类。同理也可以粗分出其他如三角形、星形、六边形和八边形等几何形状。由此就可以在检测过程中, 对边缘检测后的物体轮廓进行过滤, 这就避免了对背景等干扰物体进行盲目投票, 从而提高了检测速度。

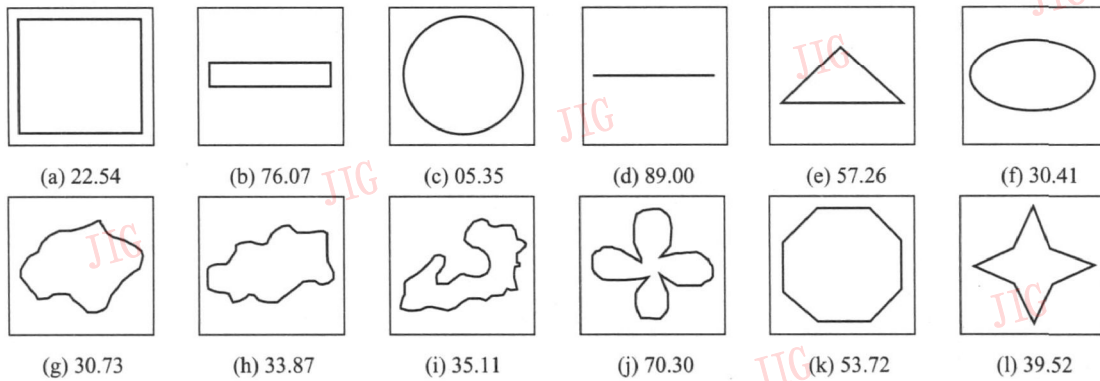


图 2 不同形状闭合轮廓的 D_a 计算结果 (以 $^\circ$ 为单位)

Fig 2 Different closed contours with corresponding D_a (in degree)

2 几何特征的提取定位

本文以圆和矩形的检测为例来进行说明, 其他形状的检测原理类似。圆的几何特征是圆心和直径 (O, d) ; 同理, 除方位角外, 对于椭圆来说, 其几何特征是椭圆中心和长短轴 (O, a, b) ; 正方形的几何特征是中心和边长 (O, l) , 而矩形的几何特征是中心、长和宽 (O, l, w) 。不论是半径, 长短轴或边长, 它们都具有共同的几何特征——线段, 它们可以用直线的 Hough 变换进行提取。

2.1 直线 Hough 变换

直线 Hough 变换^[10]采用“投票”的思想来检测数字图像中的直线或线段, 它是一个图像处理和直线检测的经典算法。平面中的任意一条直线都可以用 ρ 和 θ 两个参数来确定。其中 ρ 确定了直线到原点的距离, θ 确定了直线的方位 (如图 3 所示)。其函数关系为

$$\rho = x \cos\theta + y \sin\theta \quad x \in [0, \pi] \quad (2)$$

由此可见, 图像空间中的每一点 (x, y_i) 映射到 Hough 空间中的一组累加器 $C(\rho, \theta)$, 即所谓的投票过程, $C(\rho, \theta)$ 表示图像空间中符合式 (2) 的像素数。投票结束后, $C(\rho, \theta)$ 的每一个局部最大值就对应一直线段, 即对应的 ρ 和 θ 可以唯一地确定这条直线。

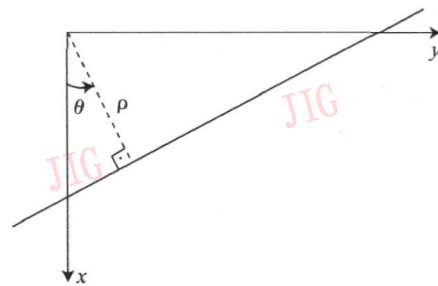


图 3 直线 Hough 变换

Fig 3 Hough transform of a line

2.2 圆

利用形状角 D_a 对边缘检测结果进行初步分类后, 为了快速识别一条闭合轮廓线是否为圆, 可以对轮廓曲线分别沿水平和垂直两个方向进行扫描。沿水平方向扫描时, 可以获得每条扫描线与轮廓线的两个交点的中点, 再对所有中点进行线性 Hough 变换即可得垂直直线 L_v 。具体方法如图 4(a) 所示, 利用由上到下的第 i 条水平扫描线 H_i^s 来扫描轮廓线, 即可得到左交点 X_i^l 和右交点 X_i^r 连线的中点 X_i^m , 这样通过多条扫描线 $0 \leq i < N$, 即可以得到多个中点, 再利用线性 Hough 变换对所有中点 X_i^m 进行 1 维投票, 便可得到垂直直线 L_v 。沿垂直方向扫描图像, 即可以获得每条垂直扫描线 V_i^s 与轮廓线两交点连线的中点, 同理, 对所有的中点进行直线 Hough 变换, 便得到水平直线 L_h (如图 4(b) 所示)。

由两条直径即可以定位圆心, L_v 和 L_h 的交点即

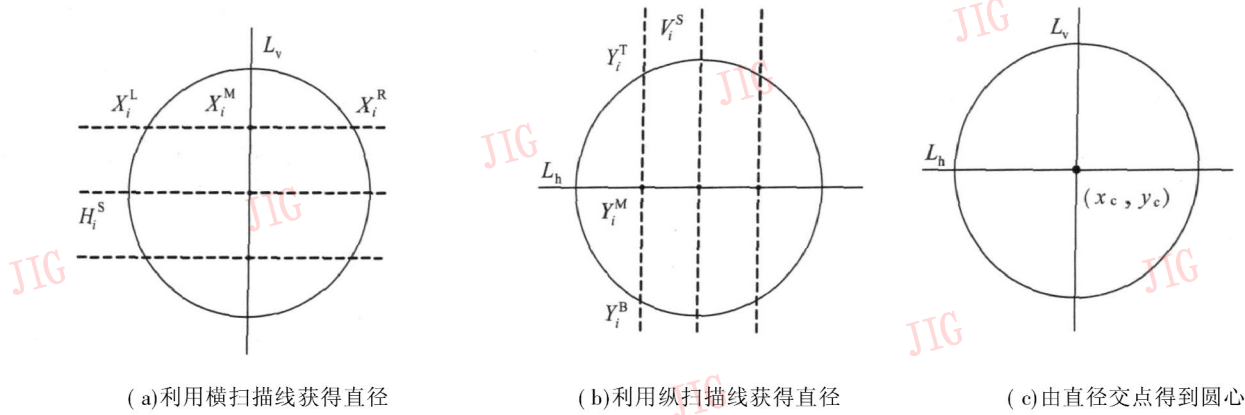


图 4 圆心定位

Fig 4 Locating the center of a circle by cross-line scanning

为圆心 (x_c, y_c) (如图 4(c)所示)。

利用轮廓线的像素坐标就可以估计圆的半径

$$r = \max((x_{\max} - x_{\min}) / 2, (y_{\max} - y_{\min}) / 2) \quad (3)$$

其中, x_{\max} 和 x_{\min} 是轮廓线的最大和最小 x 坐标, y_{\max} 和 y_{\min} 是轮廓线的最大和最小 y 坐标。

利用前面所得圆心 (x_c, y_c) 和由式 (3) 估计的半径, 可以决定圆半径 R 的投票区间: $\Omega = [0, x_c + r]$, 其半径 r 的投票公式如下:

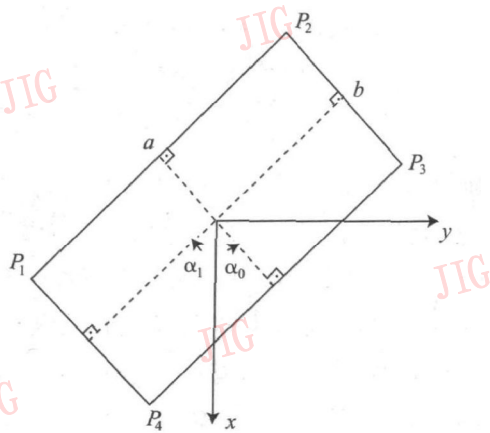
$$r = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$$

其中, (x_i, y_i) 是轮廓线上第 i 个像素 P_i 的坐标。

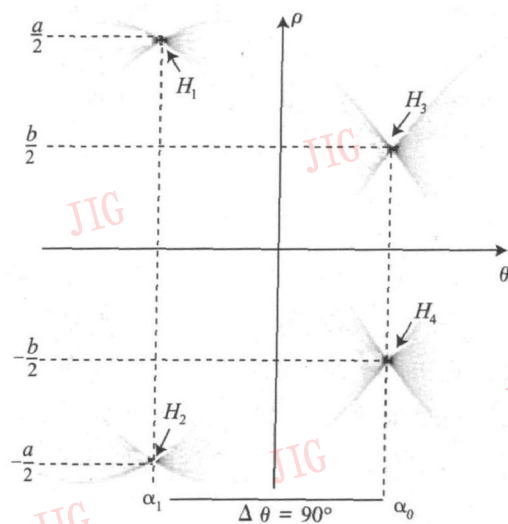
在 Ω 内确定票数最多的点的半径 \hat{r} 及其票数 n , 如果 $n \geq n_r$ (n_r 为给定的阈值), 则此轮廓为一个圆, 其半径为 $R = \hat{r}$; 否则, 该轮廓不是圆。

2.3 矩形

对于矩形轮廓曲线^[2], 其几何特征是边长 (长和宽)。通过直线 Hough 变换投票后, 应该出现 4 个峰值 (如图 5 所示), 投票空间的 4 个峰值是 $H_1 = (\rho_1, \theta_1)$, $H_2 = (\rho_2, \theta_2)$, $H_3 = (\rho_3, \theta_3)$, $H_4 = (\rho_4, \theta_4)$ 分别对应矩形的 4 个特征, 即 P_2P_3 , P_1P_4 , P_3P_4 , P_1P_2 4 条边。



(a) 矩形中心在坐标系原点



(b) 矩形在原点的 Hough 变换结果

图 5 矩形几何特征及投票结果

Fig 5 The geometric feature and voting result

由矩形的几何特征可知, 在投票空间应该满足如下关系:

$$\Delta\theta = |\theta_i - \theta_j| < T_\theta \quad \Delta\rho = |\rho_i - \rho_j| < T_\rho$$

$|C(\rho_i, \theta_i) - C(\rho_j, \theta_j)| < T_L (C(\rho_i, \theta_i) + C(\rho_j, \theta_j)) / 2$ 其中, T_0 为角度 θ 的阈值, 用于判断每对峰值 (H_i 和 H_j) 是否为一对平行边, 如果 $\theta_i \approx \theta_j$ 即可确定其为

矩形的一对平行边; T_p 为距离阈值, 用于判断对应于峰值点对 $(H_i$ 和 $H_j)$ 平行线是否关于 θ 轴对称, 如果 $\rho_i \approx -\rho_j$ 则关于 θ 轴对称; T_l 为规范阈值, 用于判断对应于点 H_i 和 H_j 的对边是否具有近似相同的长度, $C(\rho, \theta)$ 是在点 H_j 处的投票数, 如果 $C(\rho, \theta_i) \approx C(\rho, \theta_j)$, 则认为对应于点 H_i 和 H_j 的两条边的长度相等。

检测后的峰值, 对应矩形的一组对边, 可以表示如下:

$$E_k = \begin{cases} (\xi, \alpha_k) \\ (-\xi, \alpha_k) \end{cases}$$

其中,

$$\alpha_k = (\theta_i + \theta_j) / 2$$

$$\xi = (\rho_i - \rho_j) / 2$$

如图 5 所示, 当 $k = 1$ 时, $i = 1, j = 2$ 表示一组对边 E_1 和 E_2 ; 当 $k = 2$ 时, $i = 3, j = 4$ 表示另一组对边 E_3, E_4

最后利用下面公式通过比较两组对边的夹角来判断是否为矩形:

$$\Delta\alpha = \|\alpha_1 - \alpha_2| - 90^\circ| < T_a$$

其中, 阈值 T_a 用于判断两组对边 E_1 和 E_2 是否垂直。

同理, 对于根据形状角粗分后的其他轮廓曲线, 也可经过直线投票提取几何特征后, 再根据各自几何特征进一步判断识别其具体形状, 这里不一一赘述。在粗分基础上, 即可充分利用几何特征和采用直线投票来提高算法的执行速度和准确性。

3 算法流程

本文完整的算法描述如图 6 所示: 先对图像进

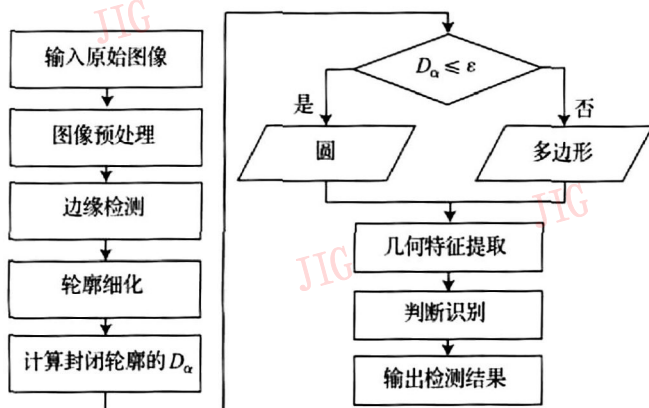


图 6 算法流程图

Fig 6 Flow diagram of the algorithm

行预处理, 以消除噪声的影响, 再通过 Canny 边缘检测来提取轮廓; 然后通过计算形状角 D_a 进行形状过滤来达到对闭合轮廓分类的目的; 接着对于不同的形状, 分别通过线性 Hough 变换提取几何特征; 最后通过对不同形状的几何特征做进一步判断, 并定位。

4 实验结果

为验证本文算法的检测结果, 采用工程应用中的实际图片对本文算法与 2IHT 算法进行了检测对比实验, 重点对圆检测的准确度和速度进行考察。实验时, 用 VC++ 6.0 实现了本文算法, 测试的环境是 AMD 2GHz、512M 内存的普通 PC, 使用的测试平台是 Windows XP 操作系统。

从图 7 可以看出, 本文算法可以检测出电路板上的圆形和矩形元件。

测试图片共有 2 组, 本文的测试程序是把检测到的圆分别用绿色和红色画出, 其中红色表示用 2IHT 算法检测到的圆, 绿色表示用本文算法检测到的圆。对于第 1 组图片, 虽然两种方法都能正确检测到圆 (如图 8 所示), 但在速度上本文算法更具优势 (详见表 1 和表 2), 其中 (x_c, y_c) 表示检测到的圆心坐标, R 为圆的半径, 检测所用的 CPU 时间以 ms 为单位。

图 9 中圆的相对位置比较复杂, 出现多圆嵌套和部分重叠的情况, 2IHT 方法由于是采用梯度信息求取圆心, 致使出现了漏检和误检, 而采用本文算法仍能正确检测到大部分的圆, 因此在漏检和误检率上都有很大提高。当存在更复杂的图形相互叠加时, 例如: 若多个圆叠加时, 则可能存在 $n (\geq 1)$ 个交点, 这时需要根据实际情况 (例如采用最小曲率原则等) 先对叠加的轮廓线进行分割, 然后再对各条闭合曲线分别进行检测。

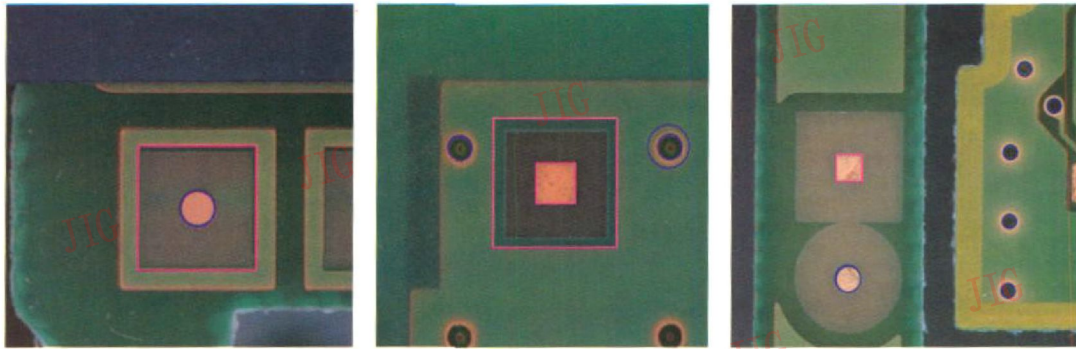
OpenCV 是 Intel 公司开发的、目前最为流行的著名计算机视觉开源软件。2IHT 是目前 OpenCV 中采用 Hough 变换识别圆的唯一方法, 它随着 OpenCV 的流行而得到广泛应用, 有一定的代表性。通过实验可以看出, 无论 2IHT 算法还是本文新方法, 要识别任一轮廓线是否为圆, 其确定圆心的 2 维 Hough 投票都是计算瓶颈。下面从计算复杂性和鲁棒性角度对两者进行简要的分析和对比:

若圆的半径为 r , 则投影区域的大小为 $(r+1) \times (r+1)$, 本文方法仅仅需要进行 2 次 (水平直线和垂直直线) 2 维投票, 而 2IHT 算法需要进行 (梯度方向直线) 2 维投票的次数则为 $2\pi r$, 是本

文算法投票次数的 (πr)倍; 于是, 当 $r \geq 32$ 时 (这很普遍), 本文方法比 21HT 算法快 2 个数量级以上。此外, 由于 21HT 算法需要导数 梯度信息, 这会导致对噪声敏感、鲁棒性下降, 进而影响计算结果的精度和准确性 (见图 9 (b)); 而本文方法则完全不需要任何导数 梯度信息, 因此不仅算法更鲁棒, 而且计

算结果更准确。

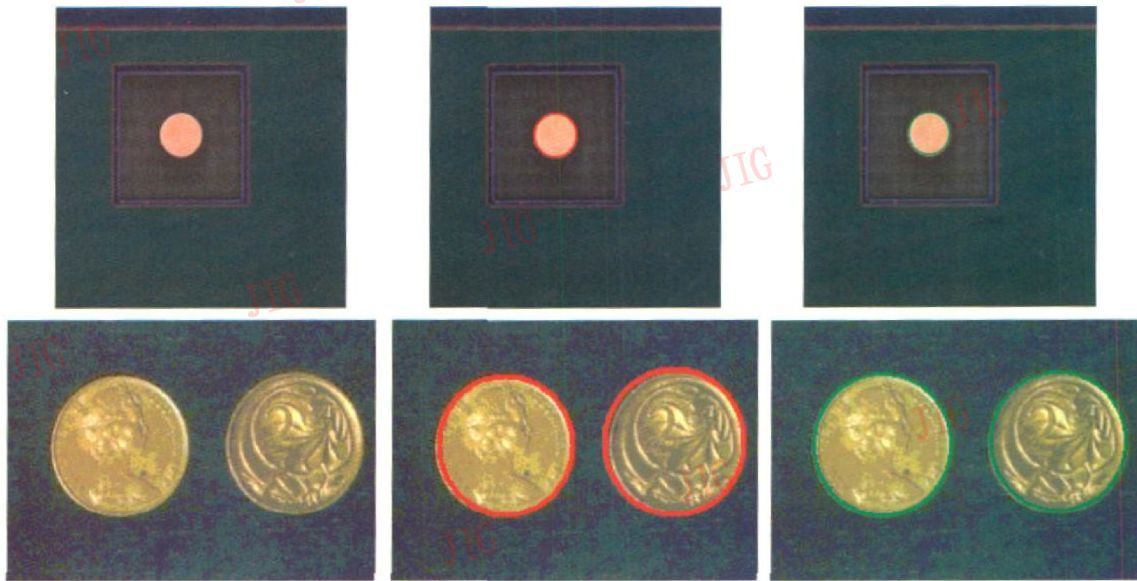
经过大量的实验, 通过与一些目前常用的圆检测方法检测结果的对比可以看出, 本文算法在检测速度和结果的准确性上有显著提高。经过大量实际工程图片的测试, 证明该方法是一种非常鲁棒的进行快速圆检测的实用算法。



(a) 电路板 1 检测结果 (b) 电路板 2 检测结果 (c) 电路板 3 检测结果

图 7 本文算法检测出的工业电路板上的圆和矩形元件

Fig. 7 Circle and rectangle components in three circuit boards detected by our algorithm



(a) 原图像 (b) 21HT 算法的检测结果 (c) 本文算法的检测结果

图 8 简单图形的检测

Fig. 8 Detection of simple figures



(a) 原图像 (b) 21HT 算法的检测结果 (c) 本文算法的检测结果

图 9 复杂图形的检测

Fig. 9 Detection of challenging figures

表 1 两种方法对图 8 上图处理的结果对比

Tab 1 Comparison of different detection results of top images in Fig 8 by two methods

方法	X	Y	R	CPU 时间 /ms
2IHT	198	196	33	42 65
本文算法	197	195	33	14 81

表 2 两种方法对图 8 下图处理的结果对比

Tab 2 Comparison of different detection results of bottom images in Fig 8 by two methods

方法	X	Y	R	CPU 时间 /ms
2IHT	78	82	46	13 04
	194	80	48	
本文算法	76	82	47	4 82
	196	80	47	

5 结 论

根据对广义 Hough 变换的分析可见, 一般意义的广义 Hough 变换通常时间和空间复杂度高、通用性差、检测精度不高。用广义 Hough 变换检测圆时, 由于要对圆心 $O(x, y)$ 和半径 r 在 3 维空间进行投票, 因此其具有存储空间大、计算时间长等缺点; 而一些基于 Hough 变换的改进方法往往也由于需要导数信息, 使得对实际图像中的噪声很敏感, 因而导致算法的鲁棒性降低。用广义 Hough 变换检测矩形时, 由于其具有 5 个自由度 (矩形中心 $O(x, y)$, 宽度 w , 高度 h 和方向角 α), 因此要检测一个矩形需要设计一个 5 维空间的投票过程, 其复杂度是不能接受的。

本文提出了一种统一对圆和矩形等规则图形快速提取和识别的实用算法, 该算法首先利用形状角 D_a 对闭合的轮廓曲线进行粗分类; 然后分门别类地进行细致、准确的识别; 其中圆检测方法, 只需要进行 1 维和 2 维投票, 即可使圆检测的结果能够达到子像素级的精度; 并且不需要任何导数信息, 从而大大提高了圆检测的速度和鲁棒性。

经过对一些目前常用的检测方法进行的大量对比实验可以看出, 首先, 由于本文算法避免了在高维空间的投票, 其次, 用形状角 D_a 达到了分类过滤的目的, 从而避免了盲目投票, 最后把直线 Hough 变换和平面规则图形的几何特征和特点进一步用于几何形状的检测, 提高了多边形的检测速度, 从而使本文方法很容易被推广用于三角形、正六边形等常见的其他平面规则几何图形的检测。经过大量实际工程图片的测试, 验证了本文方法是一种非常快速通用的平面规则几何图形的检测算法。

参考文献 (References)

- [1] Zhu Shuang-dong, Zhang Yi, Lu Xiao-feng. Intelligent approach for triangle traffic sign detection [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(8): 1127-1131. [朱双东, 张懿, 陆晓峰. 三角形交通标志的智能检测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(8): 1127-1131.]
- [2] Jung C R, Schramm R. Rectangle detection based on a windowed Hough transform [C] // Proceedings of Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Curitiba, Brazil, 2004, XV II: 113-120.
- [3] Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1988, 44(1): 87-116.
- [4] Xu Lei, Oja E, Kulttanen P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. Pattern Recognition Letters, 1990, 11(5): 331-338.
- [5] Daugman J G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1148-1161.
- [6] Victor Ayala-Ramirez, Carlos H Garcia-Capulin, Arturo Perez-Garcia, et al. Circle detection on images using genetic algorithms [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(6): 652-657.
- [7] Zheng Nan-ning. Computer Vision and Pattern Recognition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 155-156. [郑南宁. 计算机视觉与模式识别 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 155-156.]
- [8] Yuen H K, Princen J, Illingworth J, et al. Comparative study of Hough transform methods for circle finding [J]. Image and Vision Computing, 1990, 8(1): 71-77.
- [9] Teutsch C, Bemdt D, Trostmann E, et al. Real-time detection of elliptic shapes for automated object recognition and object tracking [C] // Proceedings of the SPIE Conference on Machine Vision Applications in Industrial Inspection. Magdeburg, Germany, 2006, XIV: 171-179.
- [10] Duda Richard O, Hart Peter E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11-15.