

# 基于 Hough 变换的焊缝位置检测技术

屈稳太 张瑶瑶 颜钢锋

(浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘要：对 Hough 变换的应用技术进行了细致的分析，归纳出了图像域参数与变换域参数的三种对应关系，减少了 Hough 变换运行时一些盲目的搜索和计算，提高了算法的运行效率。在累加器设计上，应用了三元组数据结构，压缩了累计器的数量。应用 Prewitt 边缘检测方法和中值滤波技术将图像转换为二值图像，使边缘部分得以增强，噪声得到抑制。在此基础上，提出了一种新的焊缝位置检测方法，该方法不仅能检测出焊缝的偏离距离，而且能检测出焊缝偏离的方向。仿真与实际运行结果表明该方法检测精度高，抗干扰能力强。

关键词：Hough 变换 边缘检测 直线方程 焊缝

中图分类号：TP391.4

## 0 前言

在埋弧焊管生产线上，焊缝位置检测一直是个关键问题。参考文献[1]、[2]提出了利用小波变换技术进行焊缝检测的方法，其主要思想是从摄像机取回的图像中截取一小段，认为焊缝在这一小段中是一条与焊管前进方向一致的直线，在此基础上对这一小段图像进行平滑滤波，小波变换，找出奇异点。虽然这种方法取得了较好的效果，但由于图像被截成小段，在一小段中如果存在一种与焊缝相似的痕迹，就很容易造成算法的误判。另外，该算法不能给出焊缝方向的偏差，而焊缝的方向对钢管的成形和焊缝的跟踪也是很重要的参数。Hough 变换是一种非常有效的从图像中提取特定几何图形(如直线、圆和椭圆等)的方法<sup>[3]</sup>，它是从整体上来考察一幅图像中的直线，通过数据的积累来提取特征。其主要特点是对局部信息的缺损不敏感和对随机噪声的鲁棒性。然而，传统的 Hough 变换要求有较大的存储空间和较长的计算时间，使得它在实际中的应用受到了限制。为此，L. Xu<sup>[4]</sup>，H. Kalviainen 等<sup>[5]</sup>提出了随机 Hough 变换及其改进，在不同程度上解决了这个问题。

针对 Hough 变换图像域参数和变换域参数的映射关系，进行了详细的分析和论证，得出了它们之间的对应关系。利用这个关系，可有效的减少 Hough 变换的存储空间和计算时间，提高算法的运行效率。在此基础上，提出了一种新的焊缝位置检测方法 (Amend Hough transform, AHT)。

## 1 Hough 变换原理

图像中的曲线通常是由二进制图像中的一些数据点组成。Hough 变换是一种线描述方法，它可以将图像域中的点变换为变换域中的线，进而将图像域中的线变换为变换域中的点。对直线来说，如图 1 所示，图像域的直线用法线式方程表示为

$$r = x \cos q + y \sin q \quad (1)$$

式中  $r$ ——直线到原点的距离

$q$ ——法线与  $x$  轴的夹角，它们是变换域的参数(坐标)

$(x, y)$ ——图像域的参数(坐标)

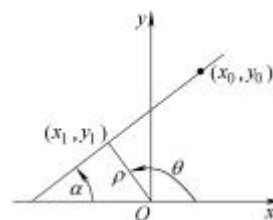


图 1 直线 Hough 变换

式(1)构成了直线 Hough 变换，它将图像域的参数映射到变换域的参数。对于直线 Hough 变换，存在下面的定理。

定理：如果直线通过第一象限，则直线的法线式方程式(1)对应三种情况： $r > 0, \pi/2 \leq q < \pi$

$$r > 0, 3\pi/2 < q < 2\pi \quad r > 0, 0 \leq q < \pi/2。$$

证明：如果图像域中的直线通过第一象限，则直线方程  $y = kx + c$  必属于下面四种情况之一：

$$k > 0, c > 0. \quad k > 0, c < 0. \quad k < 0, c > 0.$$

$$k = \pm 8, c = m8。$$

那么，由图 1 可知：在  $k > 0, c > 0$  情况下，直

线的法线方程为  $y = -\frac{1}{k}x, q = \pi/2 + a$ ,  $a$  为直线的倾角, 由于  $0 < a < \pi/2$ , 所以  $\pi/2 \leq q < \pi$ 。法线与直线的交点为  $x_1 = \frac{-kc}{k^2+1}, y_1 = \frac{c}{k^2+1}$ , 所以  $r = x_1 \cos q + y_1 \sin q / 0$ , 若  $k=0$ , 则  $a=0, q = \pi/2, r = c$ , 对应第 种情况。

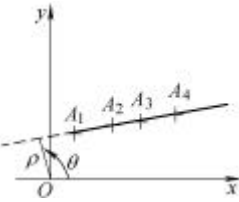
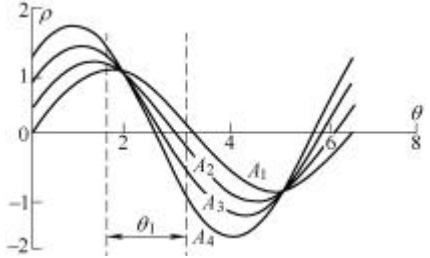
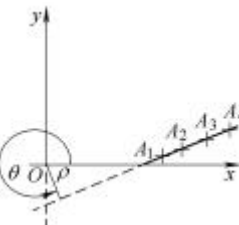
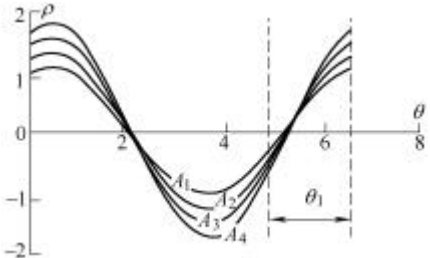
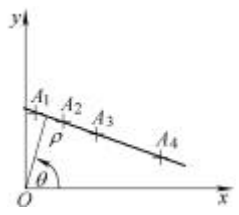
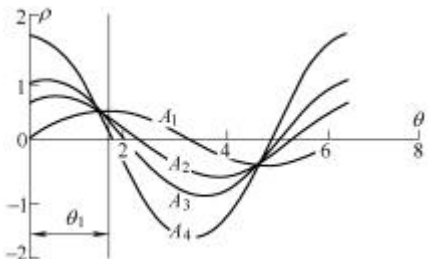
在  $k > 0, c < 0$  情况下,  $q = 3\pi/2 + a, 0 < a < \pi/2$ , 所以  $3\pi/2 < q < 2\pi$ , 法线与直线的交点处  $x_1 > 0, y_1 < 0$ ,

所以  $r = x_1 \cos q + y_1 \sin q > 0$ , 对应第 种情况。

在  $k < 0, c > 0$  情况下,  $\pi/2 < a < \pi, q = a - \pi/2$ , 所以  $0 < q < \pi/2$ , 法线与直线的交点处  $x_1 > 0, y_1 > 0$ , 所以  $r = x_1 \cos q + y_1 \sin q > 0$ , 在  $k = \pm 8$ , 时, 直线平行于  $y$  轴,  $x = \text{常数} > 0, a = \pi/2, q = 0, r > x$ , 对应第 种情况。证明完。

根据定理可得三种情况下的直线 Hough 变换, 见表 1。

表 1 直线对应的三种 Hough 变换

参数范围	图像域	变换域
$r < 0$ $\pi/2 \leq q < \pi$		
$r > 0$ $3\pi/2 < q < 2\pi$		
$r > 0$ $0 \leq q < \pi/2$		

参考文献[6]对 Hough 变换检测曲线的效率和精度进行分析和比较, 其中参数的采样是影响效率和精度的关键因素。传统的方法是将变换域坐标  $q$  和  $r$  平均分成许多小段, 每一  $q$  小段和  $r$  小段构成一个小单元 ( $\Delta q, \Delta r$ )。  $q$  的有效取值范围为  $q_1 = q_{\max} - q_{\min}, q_{\max}$  和  $q_{\min}$  究竟取什么值, 应根据具体应用场合来决定。将  $q_1$  分成  $N$  等分,  $\Delta q = q_1/N$ 。而对于  $r$  的分段, 因为  $r$  的取值与  $(x_i, y_i)$  有关。

$$r = x_i \cos q + y_i \sin q = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin(q + f) \quad (2)$$

那么,  $r$  的有效取值范围为  $[0, r_{\max}]$ ,  $r_{\max} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 。根据摄像机的分辨率和图像的取景范围可以得到  $(x_i, y_i)$  的最大可能值, 从而求得  $r_{\max}$  的值。将此范围分成  $M$  等分,  $\Delta r = r_{\max}/M$ 。这样把有效的

变换域分成了  $N \times M$  个小单元, 每个单元的大小为  $\Delta q \times \Delta r$ 。为每一个小单元设置一个累加器。

$q$  和  $r$  离散化, 离散值分别取为小单元的中心点, 即  $q_k = q_{\min} + (2k - 1)\Delta q/2, k = 1, 2, \dots, N; r_l = (2l - 1)\Delta r/2, l = 1, 2, \dots, M$ 。

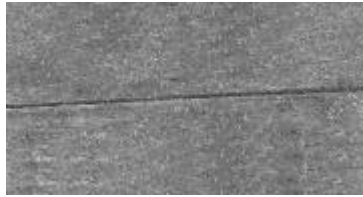
图像域里每一点  $(x_i, y_i)$  对应变换域里的一条曲线  $r = x_i \cos q + y_i \sin q$ 。使  $q$  取其离散值, 即  $q_k = q_{\min} + (2k - 1)\Delta q/2, k = 1, 2, \dots, N$ , 求出相应的  $r$ , 用就近单元的离散值代替  $r$ , 并使该单元的累加器加 1。全部图像域中的有效数据点变换完后, 检测各累加器的计数值, 计数值最多的单元, 说明此单元有最多的曲线通过, 亦即在这位置有最多的曲线相交。那么在图像域上就有最多的点处在同一条直线上。变换域中曲线相交点的位置就是这条直线的参

数( $q, r$ )。

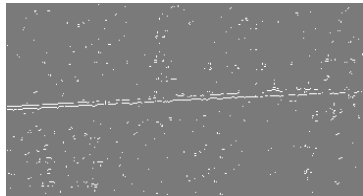
## 2 Hough 变换在焊缝检测中的应用

### 2.1 预处理

图 2a 为一幅 256 灰度级的焊缝原图像。焊缝是一条连续的直线，它的位置由于受钢板的振动，成形机的摆动等诸多不确定因素的影响，总是在变化中。另外由于受钢板生锈、发黑及灰尘的影响，在图像中叠加有强的不规则的噪声。



(a) 焊缝原图像



(b) 边缘检测结果



(c) 中值滤波结果

图 2 焊缝图

为了应用 Hough 变换，必须对图像进行预处理。预处理包括边缘检测，滤除噪声。边缘检测采用常用的梯度算法：Prewitt 算法<sup>[7]</sup>，该算法使用两个有向算子(水平方向和垂直方向)，每一个逼近一个偏导数

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad P_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分别用水平算子  $P_x$  和垂直算子  $P_y$  对图像进行卷积，在不考虑边界的情形下，得到两个和原图像同样大小的矩阵，它们分别表示原图像中相同位置处的两个偏导数。把对应位置的两个数平方相加得到一个新的矩阵，新矩阵的元素表示原图像对应位置像素灰度的梯度值(一个逼近)。然后就可以通过阈值处理得到边缘图像。阈值应根据实际情况进行选择，若偏大会造成边缘信息的丢失，若偏小会造成

噪声突出。这里阈值取为 0.13，处理结果见图 2b。边缘检测后，图像转换为二值图像，在二值图像中仍然存在一些椒盐噪声<sup>[7]</sup>，这可通过中值滤波进一步滤除噪声。中值滤波采用水平线性模板： $M_x=[1 \ 1 \ 1]$ ，滤波结果见图 2c。

### 2.2 基于 Hough 变换的焊缝检测技术实现

如果将图像空间的坐标原点取在图像的左上角，垂直向下为  $y$  轴正方向，水平向右为  $x$  轴正方向，那么，焊缝直线在第一象限，Hough 变换可按以下步骤进行。

(1) 确立图像的大小，假设为  $L_y \times L_x$ ， $L_y$  为  $y$  轴方向的采样点数， $L_x$  为  $x$  轴方向的采样点数，那么 Hough 变换中参数  $r$  的最大值  $r_{\max} = \sqrt{L_y^2 + L_x^2}$ 。

(2) 对参数  $q, r$  进行离散。将  $q$  有效区间分成  $M$  等份， $r$  有效区间分成  $N$  等份。 $q_1 = \pi/2$ ， $\Delta q = \pi/(2M)$ ； $\Delta r = r_{\max}/N$ 。由于  $q$  对应三个区间，故有效变换域被分成了  $3 \times M \times N$  个小单元，大小为  $\Delta q \times \Delta r$ 。传统的做法是为每个小单元设置一个累加器，则需要  $3 \times M \times N$  个累加器，当  $M, N$  较大时，将占用较多的存储器。然而在  $3 \times M \times N$  个小单元中，只有那些变换曲线通过的小单元对应的累加器才有非零值，其他单元对应的累加器全为零值，因此，这样的累加器结构是一个稀疏矩阵，通过三元组数据结构来存储这个稀疏矩阵，从而可大大减少了累加器的数量，进而减少存储器的空间，如图 3 所示。

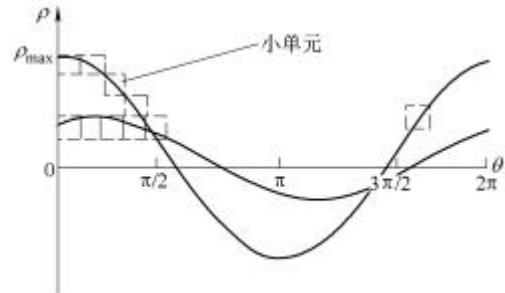


图 3 变换域的分段

(3) 扫描预处理后的二值图像(图 2c 所示)，对像素值为 1 的点进行 Hough 变换，其对应的参数曲线为正弦曲线，曲线所通过的小单元累加器加 1；对像素值为 0 的点跳过，不做 Hough 变换。

(4) 扫描所有的像素点后，计算累加器的最大值，它所对应的参数( $q_{\text{opt}}, r_{\text{opt}}$ )就是焊缝直线所对应的参数。

(5) 根据所得到的参数  $q_{\text{opt}}, r_{\text{opt}}$  可计算焊缝在图像中的相对位置。在正常位置时， $q_{\text{nom}} = \pi/2$ ， $r_{\text{nom}} = L_y/2$ 。那么焊缝偏离正常位置时，其偏差为： $d_q = q_{\text{nom}} - q_{\text{opt}}$ ， $d_r = r_{\text{nom}} - r_{\text{opt}}$ 。当  $q_{\text{opt}} > 3\pi/2$  时， $d_q = 3\pi/2 - q_{\text{opt}}$ ， $d_r = r_{\text{nom}} + r_{\text{opt}}$ 。 $d_q$  表示焊缝偏离正常位置的方

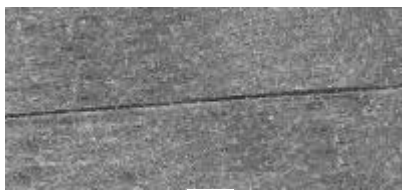
向,若 $d_q > 0$ ,表明焊缝逆时针偏离正常方向, $d_q < 0$ ,则相反。 $d_q$ 将作为钢管成形机的反馈量,控制钢管的成形角,进而控制焊缝方向; $d_r$ 表示焊缝偏离正常位置的距离,若 $d_r > 0$ ,表明焊缝偏离 $y$ 负方向, $d_r < 0$ ,则相反。 $d_r$ 将作为焊缝自动跟踪装置的反馈量,以调节焊枪的位置,使其实时对准焊缝。

### 3 仿真运行结果

采样四幅焊缝图像进行仿真试验,图4为焊缝原图像, $L_y=184$ 点, $L_x=366$ 点。图5为经过边缘检测与滤波后的图像,表2为经过 Hough 变换检测的结果。

表2 仿真试验结果(分段数  $M = N = 200$ )

图像	检测结果( $q_{nom}=90^\circ, r_{nom}=92$ 点)			
	$r_{opt}/$ 点	$q_{opt}/(^\circ)$	$d_r/$ 点	$d_q/(^\circ)$
图 4a	110.6	85.5	-18.6	4.5
图 4b	192.5	81.9	-100.5	8.1
图 4c	69.6	96.3	22.4	-6.3
图 4d	20.5	283.5	112.5	-13.5



(a)



(b)



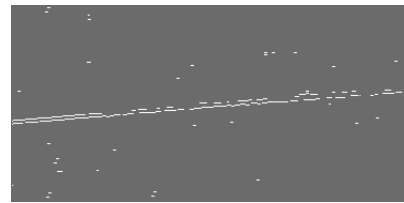
(c)



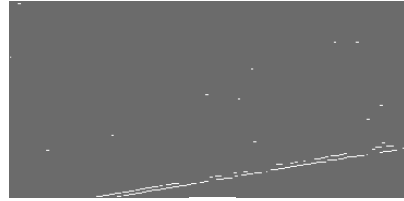
(d)

图4 四幅焊缝原图像

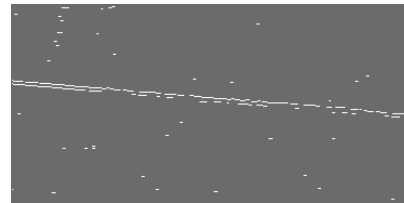
将该方法用于焊管生产线焊缝自动跟踪系统中,如图6所示,经一段时间的试运行,并与小波



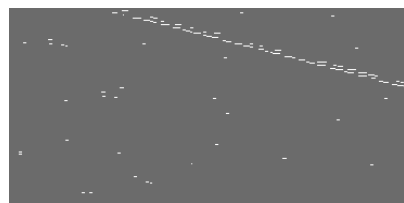
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 四幅焊缝图像边缘检测结果

变换检测方法(Wavelet transform, WH)<sup>[1]</sup>,光电感应检测方法(Photoelectric technology, PET)<sup>[8]</sup>相比较,得到以下的试验数据,见表3。

表3 运行效果比较

	距离误差 $e_d/mm$	角度误差 $e_a/(^\circ)$	误跟踪率 $I/$ 次
WT	1.5	32	3
PET	3.5	46	10
AHT	1.2	5	0

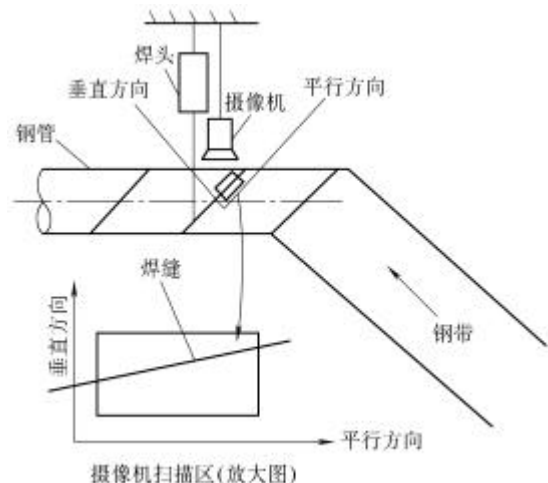


图6 焊管生产线

在表 3 中, 误跟踪率是根据运行一段时间(定为一星期), 自动跟踪系统跑偏的次数决定的。由表 3 看出, 在 AHT 方法投入运行后, 一个星期内没有发生一次跑偏, 因而可大大提高焊管的成品率。其主要原因是 AHT 方法不仅给出了焊缝偏离的距离, 而且给出了焊缝偏离的方向, 有利于跟踪系统做出及时调整。

#### 4 结 论

对 Hough 变换进行了分析, 归纳出了图像域参数与变换域参数的三种对应关系, 减少了 Hough 变换运行时一些盲目的搜索和计算, 提高了 Hough 变换的运行效率。在此基础上, 提出了一种新的焊缝位置检测方法, 该方法从整体上来考虑焊缝的检测, 不仅能检测出焊缝的偏离距离, 而且能检测出焊缝偏离的方向。应用 Prewitt 边缘检测方法和中值滤波技术, 突出了焊缝信号, 减少了噪声的影响。仿真结果与实际运行效果表明该方法检测精度高, 抗干扰能力强。

#### 参 考 文 献

- 1 屈稳太, 诸静. 基于小波变换的焊缝位置检测新方法. 中国图象图形学报, 2002, 7A(12): 1 314 ~ 1 318
- 2 屈稳太, 诸静. 基于 Gauss 小波的焊缝检测技术. 焊接学报, 2002, 23(4): 64 ~ 68
- 3 Hough P V C. Method and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Patent 3069654, 1962-12-18
- 4 Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms, and computational complexities. Computer Vision, Graphics, and Image Processing (CVGIP): Image Understanding, 1993, 57(2): 131 ~ 154
- 5 Kalviainen H, Hirvonen P, Xu L, et al. Probabilistic and non-probabilistic Hough transforms: overview and comparisons. Image and Vision Computing, 1995, 13(4): 239 ~ 252
- 6 Walsh D, Raftery A E. Accurate and efficient curve detection in images: the importance sampling Hough transform.

Pattern Recognition. 2002, 35(7): 1 421 ~ 1 431

- 7 Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing. Boston: Addison Wesley, 1992
- 8 黄石生, 王秀媛. 埋弧焊焊缝跟踪控制系统及发展状况. 焊接, 2000(1): 8 ~ 11

#### METHOD OF DETECTING WELDING SEAM BASED ON THE HOUGH TRANSFORM

Qu Wentai Zhang Yaoyao Yan Gangfeng  
(College of Electrical Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** A comprehensive analysis on the Hough transform for detection of straight line in an image is presented. Firstly, the corresponding three relations between the parameters of straight line in an image field and in the transform field were summed up. By those, the aimless computations and searches in Hough transform processing can be reduced greatly and its efficiency is improved. Secondly, in the design of accumulator, a triplet data structure is used and can reduce much amount of accumulator. Thirdly, a new detection method of welding seam is proposed based on these results, by the method, the offset of welding seam is not only detected, but its direction is also obtained. In the implementation of the method, the objective gray image is transformed black-and-white image with the edge detection of Prewitt and median filtering algorithm, therefore the welding seam is enhanced and that the noisy is depressed. Finally, simulating and practical application results show that the detection precision of the method is higher and the anti-interference ability is good.

**Key words:** Hough transform Edge detection

Line function Welding seam

作者简介: 屈稳太, 男, 1963 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事图像处理, 模式识别及自动控制方面的研究。

E-mail: wentaiqu@zju.edu.cn.