

# 基于点光源 X 射线焊缝缺陷深度尺寸的测量

梁德群<sup>1</sup>, 沈 杉<sup>2</sup>, 杨海军<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 信息工程学院, 大连 116026; 2. 西安交通大学 图像处理与识别研究所, 西安 710049)

摘 要: 介绍了一种焊缝 X 射线图像缺陷深度信息实时自动检测方法。由于要实时和自动, 则只能用经影像增强器转换的实时 X 光成像系统, 而不能用照片方式。又由于现场条件的限制, 不可能用多幅图的投影合成法。本文介绍了一种仅用三幅图来获取深度信息的方法。区别于照片成像, 光源已经不能看成平行光, 文中分析了点光源成像的原理和方法。二维缺陷的准确检测是计算深度信息的基础, 而准确的边缘检测又是检测二维缺陷的基础。由 Marr 开创, 经 Canny、Witken 和 Mallat 等人发展起来的多尺度边缘检测被认为是理论上最完善的一种方法, 但他们没有解决尺度自适应问题。本文介绍了一种基于测度的尺度自适应边缘检测方法, 获得很好效果。

关键词: 计算机视觉; 无损检测; 小波边缘检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2000)03-05-04



梁德群

## 0 序 言

锅炉、压力容器和石油钢管的焊缝必须经 X 射线检测后才能使用, 目前焊缝 X 射线检测多用人工判片法, 即拍成 X 光的胶片, 再由评片员评定焊缝的级别。也有部分使用工业电视法, 即 X 射线穿过工件, 经增强器转换成可见光, 由摄像机传送到显示器上, 由人工观察判级。这两种方法均只检测二维尺寸。文献 [1] 介绍了用两张 X 光胶片加立体镜由人工测量深度的方法。本文介绍一种基于工业电视系统的在线深度尺寸自动测量的方法。

深度尺寸的测量对焊缝判级是很重要的。与二维测量相比有如下意义。

(1) 可以检测出沿深度方向走向的裂纹缺陷, 图 1 示出了这类缺陷在三维和二维测量中的不同结果。在实际测量中不可能保证射线方向完全与深度方向重合, 因此会形成(a)、(b)、(c)三种情况。如果对其任一种情况仅采用一个投射方向, 则可能把裂纹当成气孔或夹渣, 而用二到三个方向则可避免

此种情况。

(2) 增加对面积性缺陷检测的可靠性。在 X 射线无损检测中, 把气孔、夹渣类称为体积性缺陷, 而裂纹、未焊透称为面积性缺陷。面积性缺陷在 X 射线穿过的方向上厚度小于体积性缺陷, 所以成像的灰度较低, 容易丢失信息。如果射线与面积性缺陷的平面成一定角度, 则射线通过缺陷的厚度相对增加, 使成像变得清楚。图 2 给出了这一情况的示意图。显然,  $A'B' > AB$ , 则投影图上缺陷区灰度值增大, 易于与背影区别。



图 2 斜射线穿过面积性缺陷的长度增加  
Fig. 2 Length of oblique line crossing a area defect is increased

(3) 可以把表面凹坑与内部气孔区别开来。图 3

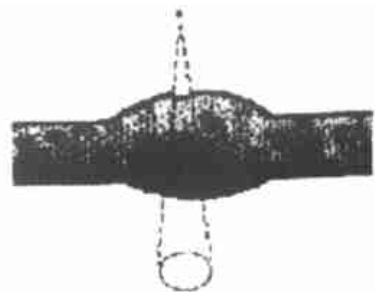


图 3 表面凹坑与气孔在投影图上相同  
Fig. 3 Hollow of surface is seen as air hole on a projection

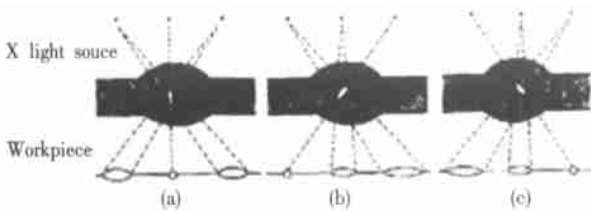


图 1 裂纹的二维投影示意图

Fig. 1 Schematic of 2-D projection of crack

示出了这种情况。X 射线通过气孔和凹坑时的吸收系数一样,这样得到二维图像上都表现为亮区。若有深度信息便可把表面凹坑与内部气孔区别开来。

(4) 为补焊提供了深度信息。补焊时首先要刨开焊缝,若有深度信息则可使焊工较准确地找到缺陷的位置,提高工效。

(5) 对焊接工艺分析提供帮助。

由二维投影图像获得三维信息,已发展了多种方法,如逆投影法、傅里叶变换法和滤波—逆投影法等。这些方法要求全投影角度的投影图,其典型代表是 CT(Computer Tomography)。为了减少投影图的数目,又发展了代数迭代法<sup>[2,3]</sup>。另外,可以根据视差原理获得目标外形的形状信息这是计算机视觉中常用的方法<sup>[4]</sup>。在焊缝缺陷深度信息的提取中,虽然使用了射线投影方法,但不可能有太多的投影,这是由 X 光源、增强器和工件间的空间位置受限所致。一般来说,最多可在 60° 范围内获得几幅图像,然而,作者主要关心缺陷的类别和位置,所以可以用计算机视觉的办法。下面介绍成像和深度尺寸获取的方法。

1 成像方法

文献[1]用两张胶片加立体镜,获得缺陷的三维视图,由于光源到工件和工件到胶片的距离比很大,光源可看成平行光源,但在这里,作者采用工业电视法的成像系统,光源不能再看成是平行光了,因为在工业电视法中,增强器必须离开工件,上述距离比变小,则光源可看成点光源。

为了获得深度尺寸,根据视差原理至少需两个角度以上的投影图。根据图 1 所描述的情况,取三个角度的投影图,由于 X 光源和增强器不易移动,所以采用工件移动的方法获取三幅投影图。这样,由于增强器的接受面为 228.6 mm,使两个斜投影方向的夹角一般不能超过 30° 左右,对于体积形(即圆形)缺陷取两幅斜投影图,对于面积形缺陷取出两个长形缺陷的投影图来计算深度。

2 深度尺寸的测量

如图 4 所示,增强器接收面与 X 射线管主光轴垂直,与摄影基线平行,即采用正直摄像法。图中: S 为 X 射线源; B 为工件平移的距离; F 为焦距,即 X 射线源至接收端的距离。

将系统置于坐标系中,如图 5 所示 X 射线在 Z

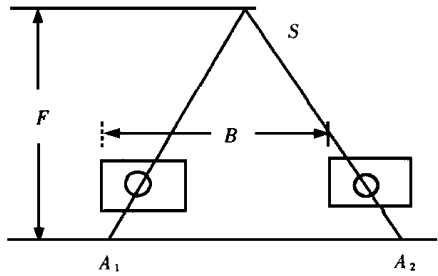


图 4 同一点在两个位置的投影的二维关系

Fig. 4 Relationship of 2-D projection through two locations of same point

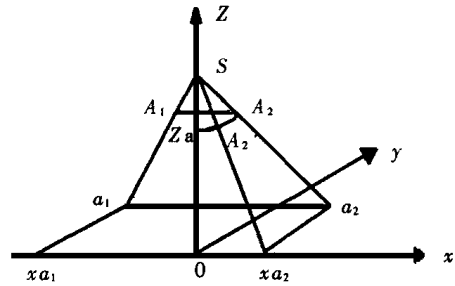


图 5 同一点在两个位置的投影的三维关系

Fig. 5 Relationship of 3-D projection through two locations of same point

轴上,透射光的接受面为 xoy 平面, A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 分别为工件内部同一点在两个不同成像位置时的空间位置, a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub> 为 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 在成像面上的投影。xa<sub>1</sub>、xa<sub>2</sub> 分别为 a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub> 在 x 轴上的投影, za 为 A<sub>1</sub>(或 A<sub>2</sub>) 在 z 轴的投影。因此 SO = F, A<sub>1</sub>A<sub>2</sub> = B。

由摄影方式可知, A<sub>1</sub>A<sub>2</sub> 平行于 xoy 平面,由投影关系容易得出深度

$$z_a = \frac{F(Pa - B)}{Pa} = F(1 - \frac{B}{Pa}), \tag{1}$$

式中: Pa = xa<sub>2</sub> - xa<sub>1</sub> 即两次成像的 x 视差。由上式可知,已知系统参数 F、B,由 x 方向上视差即可求出其深度值。

同理 A、C 两点的视差 Z<sub>ac</sub> = FB  $\frac{Pa - Pc}{PaPc}$ , 令 ΔPa = Pa - Pc, 则 A、C 两点间的空间距离

$$L_{ac} = \sqrt{Z_{ac}^2 + \Delta P_{ac}^2} \tag{2}$$

显然,上述方法不可能获得缺陷上每一点的深度,因此也不可能测得其全面的三维尺寸。然而,判级的标准是在二维信息上定义的,因此在深度方向上只要给出位置和长形缺陷的长度,再配以二维信息就可更好地判级了。即由式(1)可测得球形缺陷的球心深度,由二维投影图可测得其直径。由式(2)可测得长形缺陷的长度,三幅投影图可测得三个宽度尺寸。利用长宽比可区分体积形或面积形缺陷,根据球心深度可区分表面凹坑和球形缺陷,这就为判级提供了足够的信息。

3 边缘检测和对应点的测定

要准确测出球心深度,首先要保证二幅投影图中的圆心相互对应关系准确。这决定了两点:(1)边缘检测准确;(2)圆心求得准确。边缘检测一直是图像处理、计算机视觉中的重要课题,已提出了上百种边缘检查的方法,由 Marr(吸收了尺度空间思想)开创,经 Canny、Witkin 和 Mallate 以及其他学者发展的多尺度边缘检测方法被认为在理论上较完善,方法上是最优的算法。但这一方法中有一个关键问题过去未得到解决,即其尺度不能自适应地选取,因此使得在实际应用上受到限制。作者提出了基于测度的多尺度边缘检测的方法<sup>[5]</sup>。把这一方法用到焊缝缺陷检测获得了很好的效果。边缘可分成阶跃边缘(见图 6a)、斜坡边缘(见图 6b)、三角形屋脊边缘(见图 6c)、方波形屋脊边缘(见图 6d)和双阶跃边缘(见图 6e)。对不同的边缘。使用不同的测度和滤波尺度,可以分别准确地检测各类边缘。焊缝缺陷属于方波形屋脊边缘。用小波函数  $\Psi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx}$ ,  $\Psi_s(x) = \frac{1}{s}\Psi(\frac{x}{s})$  作为滤波函数。式中:  $\theta(x)$  为中心对称的平滑函数,其支集为  $[-w/2, w/2]$  (为描述简单这里只用一维函数来说明)。则小波变换局部极值点为边缘点。研究表明,方波形屋脊边缘存在的尺度范围为  $[d/w, +\infty]$ 。显然,为了抑制噪声应取大尺度,但尺度过大又会磨光边缘。如果能估计出边缘区和非边缘区,(后边将看到,用散度的大小可对此做判断)。根据边缘存在的可能性大小,自适应选取尺度则能很好地检测出缺陷。为此,定义两个度量来表达原图像中屋脊边缘的特征,即散度  $D$  和对比度  $G$ 。散度  $D$  表达屋脊边缘的灰度在空间分布上是否集中,对比度  $G$  表达屋脊边缘的灰度与背景灰度的差异。

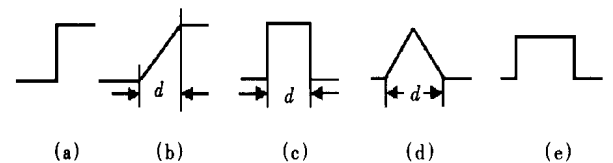


图6 各种边缘的二维截面图

Fig.6 2-D cross section graphics of various edges

假设当前像素点的坐标为  $(m, n)$ , 其领域  $R = \{(i, j) | |i-m| \leq L, |j-n| \leq L\}$ 。领域大小应使屋脊边缘完全表现出来,这里只分析上凸形屋脊边缘,即边缘灰度值较大,而背景灰度值较小的屋脊边缘,下凹形屋脊边缘的分析是类似的。

散度  $D$  的定义为

$$D = \min\{d_\theta | \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\},$$
$$d_\theta = \sum_{(i,j) \in R_1} |(i-m) - \text{tg}\theta^\circ(j-n)|,$$
$$\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ,$$

式中:  $(m, n)$  为邻域中心象素点坐标,由于过中心点、方向为  $\theta$  的直线方程为  $y - \text{tg}\theta^\circ x = 0$ , 因此  $d_\theta$  表示了灰度值较大的象素点(区域  $R_1$  内)距离过中心点、方向为  $\theta$  的直线的距离。对比度  $G$  表征领域  $R$  内灰度突变的情况,将领域  $R$  按空间位置重新划分区域  $R_1^\theta$  和  $R_2^\theta$ , 如图 7 所示。

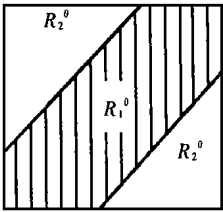


图7 屋脊边缘的邻域分区图

Fig.7 Area segments in neighborhood of ridge edge

$$R_1^\theta = \left\{ (i, j) \mid |(i-m) - \text{tg}\theta^\circ(j-n)| \leq \frac{L}{2} \right\},$$
$$R_2^\theta = \left\{ (i, j) \mid |(i-m) - \text{tg}\theta^\circ(j-n)| > \frac{L}{2} \right\},$$
$$\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ,$$

式中:  $R_1^\theta$  是在某个方向附近的区域;  $R_2^\theta$  是远离该方向的区域。如果邻域中存在边缘走向为  $\theta$  的上凸形屋脊边缘,则灰度较大的象素集中分布。在  $R_1^\theta$  中,而  $R_2^\theta$  中是背景灰度分布。对比度  $G$  定义为

$$G = \max\{|g_2^\theta - g_1^\theta| | \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\},$$
$$g_1^\theta = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in R_1^\theta} g_{ij}, g_2^\theta = \frac{1}{M} \sum_{(i,j) \in R_2^\theta} g_{ij},$$

式中:  $M$  为  $R_1^\theta$  和  $R_1^\theta$  中的象素点个数。如果领域中存在边缘走向为  $\theta$  的上凸形屋脊边缘,则灰度较大的象素集中分布在  $R_1^\theta$  中,散度  $D$  较小,对比度  $G$  较大;如果领域中不存在上凸形屋脊边缘,则灰度较大的象素杂乱分布在领域中,散度  $D$  较大,对比度  $G$  较小,将领域  $R$  内的两个度量散度  $D$  和对比度  $G$  同时考虑,可以判定该领域内存在屋脊边缘的可能性。

定义可能性  $P$  判定当前象素在领域内是否存在边缘,即

$$P = \begin{cases} 1 & D < T_1 \text{ 和 } G > T_2 \\ 0 & \text{其它状态,} \end{cases}$$

式中:  $T_1, T_2$  为判定阈值。当  $P = 1$  时,判定存在屋脊边缘,当  $P = 0$ ,不存在屋脊边缘。为可以检测出

屋脊边缘的最小尺度  $s_0$ ; 当判定当前领域中存在屋脊边缘时( $P=0$ ), 此时的滤波尺度参数应为可以抑制噪声的大尺度  $s_{\max}$ , 取  $s_{\max}=2^4$ 。由前面的分析知道, 检测宽度为  $d$  的屋脊边缘所需的最小尺度  $s_0=\lceil \frac{d}{w} \rceil$ 。这里  $\lceil \cdot \rceil$  是上取整函数。检测距离为  $d_0$  的双屋脊边缘, 可以准确定位屋脊边缘的滤波尺度  $s_1=\lfloor \frac{2d_0}{w} \rfloor$  这里  $\lfloor \cdot \rfloor$  是下取整函数。当滤波尺度在  $[s_0, s_1]$  范围内时, 都可以检测并准确定位屋脊边缘。阈值  $T_1$  和  $T_2$  的选取方法及上述方法的详细论述见文献[ 5]。

$$s=\begin{cases} s_0 & D<T_1 \text{ 和 } G>T_2, \\ s_{\max} & \text{其它。} \end{cases}$$

图 8 给出了三个投影的原图和检测结果(缺陷区内被涂黑), 其中, 左右两幅斜投影夹角为  $20^\circ$ 。X 光源到工件(指母材)的距离为 370 mm, 到增强器表面的距离为 400 mm, 工件下表面到增强器表面的距离为 20 mm。由图中可见, 球形缺陷所得到的并不是理想的圆, 这是由离散化和噪声所致。为此, 不能用简单的方法求中心。作者的方法是, 首先根据三点共圆的原理, 在轮廓线上任取三点求得圆心  $O_0$ , 接着沿圆周平移这三点得圆心  $O_i$ , 令  $i=0, i, \cdots, n$ ,  $n$  为轮廓的点数得  $n+1$  个圆心, 则点集  $\{O_i, i=0, \cdots, n\}$  的质点为圆心。

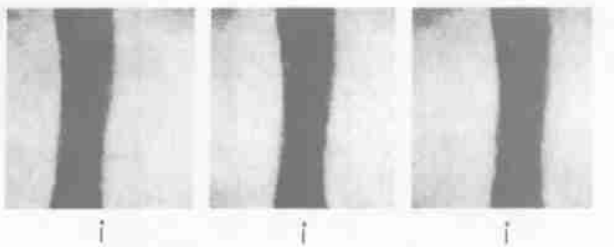


图 8 焊缝二维投影的原图和检测结果

Fig. 8 Original and resulted images of 2-D projection of weld

下一步是同一缺陷匹配的工作, 作者采取顺序扫描加形状判别的方法。

计算得到气孔球心距下表面 22.857 2 mm, 未焊透距下表面 26.587 6mm, 其长度为 4.363 7mm(这里小数点后面过长的位数是计算机给出的, 实际意义不大)。实测分别为 24.9mm, 27.1mm 和 3.9mm, 误差小于 10%。

4 结 论

本文介绍的方法, 只能给出缺陷中某特征点的深度尺寸, 不能像一般投影重构法那样给出三维的全部信息。但这已经能满足焊缝 X 射线判级的要求, 因为它能在较大程度上减少仅靠二维投影所带来的误判。造成误判的原因主要来自两方面, 一是二维图像中的分割(即上述的边缘检测), 由于开发了基于测度的多尺度边缘检测的方法, 使这一点得到了很好的解决。另外由于成像造成的误判, 通过本文介绍的测量深度位置的方法, 也得以解决。虽然由于条件所限, 作者只做了一个实物对比试验, 但已能证明该方法的可行性。

上述的方法是在点光源的假设下获得的。当增强器离工件的距离增大, 对于比光源焦点小的缺陷, 点光源就不适用了, 此时应作为面光源看待。

参考文献:

[ 1] Liu F H, Yang Z L. General analysis to errors in stereoscopic radiographic observing and measuring[ C] . Processing of FENDT' 92, Tokyo-  
o Japan, 1992. 338 ~ 343.  
[ 2] Lvan Bricault, Olivier Monga. From volume medical Images to quadratic  
surface patterns[ J] . Computer vision and Image Understanding, 1997,  
67(1); 24~ 33.  
[ 3] Kyoung Mu Lee, Riccardo Poli. Shape from shading with a generalized  
reflectance map model[ J] . Computer Vision and Image Understanding  
1997. 67(2); 143 ~ 243.  
[ 4] 李介谷. 计算机视觉的理论和实践[ M] . 上海: 上海交通大学出  
版社, 1991. 21 ~ 23.  
[ 5] 杨焯. 基于图像信息测度的多尺度边缘检测方法的研究[ D] .  
西安: 西安交通大学, 1998.

作者简介: 梁德群, 男, 1940 年 12 月出生, 教授, 博士生导师。1966 年毕业于西安交通大学工业电气化与自动化专业, 并从教于西安交通大学至 1998 年到大连海事大学工作, 1979 年开始从事图像处理和模式识别的教学和科研工作至今。主要的研究兴趣是计算机低级视觉和并行结构, 特别擅长工业图像检测。主持过国家“七五”攻关课题和 3 项国家自然科学基金课题。出版教材 1 部, 译著 1 部, 发表论文 60 多篇。