

分形理论在焊接图象处理中的应用

肖 勇 陈 强 孙振国 路井荣

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘 要 针对焊接过程中的图象处理问题,如检测焊缝边缘位置和确定焊接熔池的边缘大小和形状等问题,由于传统图象处理方法易受噪声和其他干扰信息的影响,因此很难准确及时地处理图象.为了克服此弱点,在比较了焊接过程中图象处理的微观算法和宏观算法的基础上,提出了运用分形理论的综合图象处理方法.该方法是根据焊接过程图象的特点,首先利用图象边缘的分形特征来进行区域分割,以便检测出图象边缘所在的模糊区域,然后用边缘检测方法的 Laplace 算子和最小二乘法拟合曲线来识别出图象的边缘.同时用该方法进行了实时焊接图象处理实验,实验结果证明,该方法不仅能准确识别出焊接焊缝或熔池图象的边缘,而且节省了图象处理的时间,为焊接过程的实时控制提供了可靠的信息.

关键词 分形 图象处理 边缘检测

中图分类号: TP391.41 TG441.7-39 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)01-0086-05

Application of Fractal Theory in Welding Image Processing

XIAO Yong, CHEN Qiang, SUN Zhen-guo, LU Jing-rong

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper the problems of image processing in welding process have been studied, for example, how to detect the edge position of welding seam and to ascertain the size and shape of welding pool and so on. The traditional method of image processing is sensitive to noise and other disturbances, so it is difficult to process images accurately and timely. In order to overcome this deficiency, microcosmic and macrocosmic algorithms of image processing in welding were compared in this paper, then a novel composite image processing method using fractal theory was put forward. Based on the characteristics of images of welding process, regions were divided up according to fractal characters of image edge, and fuzzy regions including image edges were detected, then image edges were recognized using Laplace operator and curved by LSM (least square method). Experiment results show that the image edge of welding seam or welding pool can be recognized correctly and quickly. The new developed image processing method could provide reliable information for the real-time control of welding process.

Keywords Fractal, Image processing, Edge detection

0 前 言

焊接过程中,通常需要获取焊缝和熔池的边缘信息,这样,在这个过程中,就需要对相关的图象进行处理,如检测焊缝边缘的位置、确定熔池的大小和形状等,而且在实际的焊接作业中,焊接图象通常含有诸如锈斑、污渍、弧光、飞溅、烟尘等干扰信息,从

而给图象处理带来了一定的困难.传统图象处理方法^[1]主要有差分算子、模板匹配、结构界限检测等.但由于这些传统算法往往拘泥于图象的微小细节,且常受到图象中每一点精度的影响,因而会造成图象处理时,对噪声和其他干扰比较敏感,这不仅容易将干扰信息误检为图象边缘,而且存在图象处理时间开销大、信息的利用率很低(视野较小)等不足.

这表明仅采用传统的图象处理方法尚难以处理

复杂的焊缝或熔池图象。

如能找到一种从宏观角度来进行图象处理的方法,即它将不受限于图象的局部信息,那么干扰信息的影响将会大大减小。由于分形方法的核心就是从宏观角度出发,利用图象较大视野里的相关信息来处理图象,因此这种方法类似于人的视觉处理过程。如今分形理论已经在生物学、天文学、地球物理学等领域中得到了广泛的应用^[2]。大家知道,分形维数是用来定量刻划混沌吸引子“奇异”程度的一个十分重要的参数,它广泛地被用于非线性系统行为的刻划中^[3],而分形特征之一的自相似性^[4],则表征了某系统或结构的局域性质或局域结构与整体的类似性。

试验结果表明,对于焊缝或熔池图象,虽然它们不是自发形成的时空有序结构,但是其边缘在图象中的灰度分布特征,不管从不同的空间尺度或是从时间尺度来看都是相似的。如果先利用分形的某些特性来分割焊缝或熔池的边缘区域,然后在该区域内提取图象的边缘,那么边缘检测的精度将大大提高。此外,在区域检测之后的边缘检测中,使用了最小二乘法^[5]来将边缘点拟合边缘曲线,它可用一条平滑的曲线,并以适当的方式来尽可能地靠近这些边缘点,以弥补由于误差造成的数据点跳动。

本文从宏观角度出发,首先利用图象的分形特征来找到图象的模糊边界区域,然后在这些初步界定的局部范围内进行精确的微观边缘检测。这种图象处理方法不仅可以减少处理的数据量和节省时间,而且可提高精度,其对于干扰噪声严重的焊接过程的图象处理效果尤为明显。

1 图象处理算法

1.1 微观图象处理算法

传统的图象处理是从微观的角度去处理图象,即计算图象中每一点的“边缘值”,以便检测图象的边缘。这里图象边缘可以定义为图象局部特性的不连续性,它有方向和幅度两个特性。一般认为沿边缘走向的灰度变化较为平缓,而垂直于边缘走向的灰度变化剧烈。在数字图象处理中,首先用差分近似微分来算出各象素的灰度梯度大小(及方向);然后对该梯度进行阈值运算,如果梯度值大于某个给定的门限,则存在边缘;最后再将被确定为边缘的象素连接起来,以形成包围边缘区域的曲线。传统图象处理算法中,边缘检测算子有梯度算子、罗伯特梯度和拉

普拉斯(Laplace)算子等。其中,Laplace 算子 ∇^2 用差分表示为

$$\nabla^2 f(m,n) = f(m+1,n) + f(m-1,n) + f(m,n+1) + f(m,n-1) - 4f(m,n) \quad (1)$$

在图象灰度阶跃的两侧,其值一边为正,一边为负;在斜坡型边缘处,其值为 0,且在此 0 值点两侧也有一正一负两个峰值。此峰值的大小及走向反映了边缘的强弱和走向。

数字 Laplace 算子是针对“点”的一种运算,运算时需要遍历图象的每个象素点,即需要在图象的行列两个方向上进行扫描。这种运算虽然对边缘有响应,但它对拐角、线条、线端点和孤立点则有更强的响应,这样图象处理的时间开销大,且处理精度容易受干扰的影响。

1.2 宏观图象处理算法

基于分形理论的图象处理算法是从宏观的角度出发,依据图象的分形特征,首先利用图象的宏观特征来检测边缘的模糊区域,然后再检测边缘点。现以焊缝图象为例来介绍该算法,其灰度强度函数 $F(x,y)$ 可视为图象平面上的二维随机变量,该变量在一定范围内的分布规律就体现了图象的相对宏观的平均特性。

选取一 $M \times M$ 区域的图象区域,其灰度强度函数定义为 $F(x,y)$ 。任一对象素点 $P_1(x_1,y_1)$ 和 $P_2(x_2,y_2)$,其中, x_1,y_1,x_2,y_2 分别为两象素点在图象中的坐标值。因为图象灰度场满足离散分形布朗增量随机场,所以该图象区域的分形维数 H 可表示为如下微分形式

$$H = \frac{\partial(\log(E(\Delta F(k))))}{\partial(\log(\Delta r(k)))} \quad (2)$$

其中

$$\Delta r(k) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$E(\Delta F(k)) = \frac{\sum_{x_1=0}^{M-1} \sum_{y_1=0}^{M-1} \sum_{x_2=0}^{M-1} \sum_{y_2=0}^{M-1} (|F(x_2,y_2) - F(x_1,y_1)|)}{P_n(k)}$$

Δr 为所有的象素点之间尺度变化范围; P_n 为象数对数目和 ΔF 多尺度灰度差; $P_n(k)$ 为在 $\Delta r(k)$ 距离下所有象素对数目, $E(\Delta F(k))$ 表示在此种距离下灰度差绝对值的均值。该算法如下:

首先分别计算 $\log(\Delta r(k))$ 及 $\log E(\Delta F(k))$, $k=1,2,\dots,n$,得到一组数据点对 $(\log(\Delta r(k)), \log E(\Delta F(k)))$,再用最小二乘法拟合可得到直线方程 $y=Hx+b$,其中, H 和 b 分别表示直线的斜率和

截距;然后计算直线拟合残差

$$\sigma = \sum_i (\log(E(\Delta F)) - H \times \log(\Delta r) - b)^2$$

最终得到3个分形特征参数 H, b, σ , 其物理意义分别是: H 值表征焊缝图象的分形维数, 维数大小为 $3 - H$; b 值表征图象灰度变化的剧烈程度; σ 值表征直线拟合数据点的线性程度。

在根据分形特征参数确定了图象边缘的模糊区域后, 再用边缘检测算子在模糊边界内检测边缘点, 其所用方法与传统图象处理算法一样。在实时连续焊接过程中, 对于焊缝或熔池图象, 可以根据焊枪所在的位置将图象分成几个区域, 分别进行检测, 如焊缝图象, 因为根据预处理或前面的处理结果就可以知道焊缝边缘的大致走向, 于是过焊枪在图象上的中心点画一条与焊缝平行的直线, 就可以将需要处理的图象分成两个区域, 然后在各个区域里进行边缘检测, 这样就排除了边缘之间的干扰; 对于熔池图象, 可以过焊枪在图象上的中心点画任意两条交叉的直线, 将图象分成4个区域, 并在各个区域里, 分别进行边缘拟合, 然后进行整条曲线的链接, 并将交接点作一定的平滑处理。因为边缘检测只在模糊区域里进行, 所以不仅检测的时间将大大减小, 而且对拐角、线条、线端点和孤立点的敏感度将降低。据研究, 人类有意识地识别图象过程就是如此, 即首先把握图象的整体特征, 然后在此基础上进行精确的定位。这种类似人类视觉系统的综合图象处理方法能够提高图象处理的速度和精度。

2 实验结果及讨论

在图象处理时, 先利用分形特征对图象进行区域检测, 以确定边缘所在的区域, 然后再在这些区域中, 使用边缘检测方法进行微观的边缘检测; 最后准确地检测出边缘线的位置。图象处理的流程如图1所示。

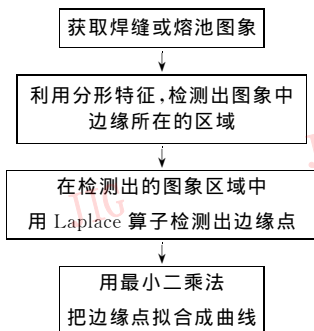


图1 图象处理流程图

边缘所在模糊区域的检测方法是: 在图象中先选取 144×144 pixels 大小的图象窗口, 再从该图象窗口的左上角开始, 以 6 pixels 长为步长, 选取 12×12 pixels 大小的小窗口; 然后水平垂直顺序移动小窗口, 计算各小窗口的分形特征参数 H, b 和 σ 。

图象处理的实验结果表明, 由位于焊缝边缘区域的小窗口计算得到的数据, 对拟合直线的斜率 H 均在 1.0 左右, 而一些不在焊缝边缘上的图象窗口中的图象, 也存在类似边缘的变化趋势, 其计算所得的 H 值虽然也在 $0.8 \sim 1.0$ 范围内, 但是与焊缝边缘图象模型的不同之处在于, 非边缘图象的灰度变化要平缓得多, 且与焊缝边缘区域对应的 b 值较大, 因此可以利用这一特征来区分边缘和非边缘区域。

在检测出边缘区域后, 先用 Laplace 算子进行边缘点检测, 然后用最小二乘法, 将检测出的边缘点拟合成直线或曲线, 即得到边缘线在图象中的二维直线方程或熔池边缘在图象中的多项式方程。因为熔池边缘是一个封闭曲线, 所以在实际的拟合中, 可以将边缘点分成几个区域, 再分别在各区域内进行曲线拟合。

选取焊接之前的焊缝图象, 因为焊接还没有开始, 拍摄图象的光线主要来自于自然光, 所以图象的质量变化较大不稳定。尤其是 V 型坡口底线, 在图象中呈现出类似坡口边缘的灰度变化趋势, 但这种趋势是两个斜坡的交界, 而焊缝坡口边缘是一个灰度渐变斜坡。用分形理论的图象处理方法处理图象的结果表明, 因为检测的模糊区域包括了足够的边缘信息, 所以排除了焊道内外所有的干扰。另外, 在边缘检测的时候, 需根据边缘情况设定边缘线的多项式方程, 对直焊缝, 可以设置边缘线为直线。实验结果如图2所示。图2(a)是没有焊接之前的图象; 图2(b)的黑色小方块是检测到的焊缝模糊边界, 虽然模糊边界一定程度上覆盖了边缘区域, 但这并不影响边缘检测的精度, 相反还可以节省检测的时间。图2(c)是识别出来的焊缝边缘。

对于焊接过程中的焊缝图象, 图象质量与焊前图象有所不同, 因为在焊接时, 焊缝的光照主要来自于焊接弧光, 而自然光的影响很小, 所以图象质量比较稳定。此外, 在焊接时, 图象中还有飞溅、烟尘等干扰, 尤其是飞溅, 会影响用传统图象处理方法的处理结果; 而由于焊接干扰信息的分形参数与焊缝边缘的分形参数有很大的区别, 据此可以将模糊边界区域与飞溅干扰等区分开来。焊接过程中的焊缝图象

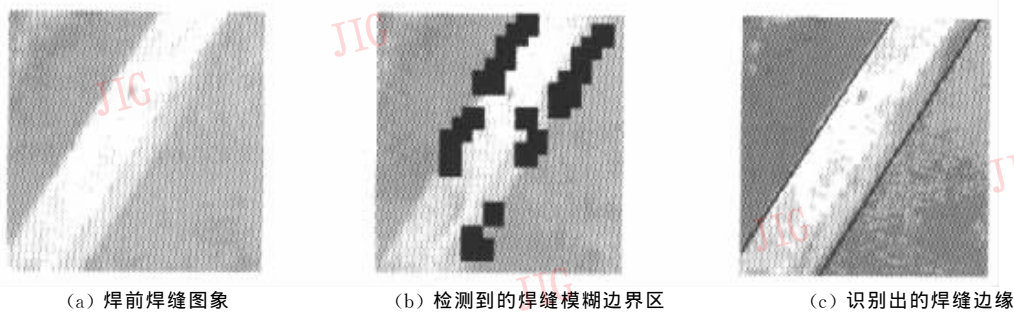


图 2 焊前焊缝图象处理效果

处理结果如图 3 所示,图 3(a)是焊缝图象原图;图 3(b)白色小方块是用分形方法检测到的模糊边界区域,其中包含了大部分坡口边缘信息;图 3(c)是检测到的焊缝边缘。这里假定焊缝边缘满足直线方程。

该方法对于曲线边缘同样适用,比如检测焊接熔池边缘。焊接熔池图象与焊缝图象虽然在边缘形状上不同,但其边缘特征是相同的。大家知道,在熔池中存在熔渣等干扰,因而在熔池前端的边缘比较明显,而熔池后端的边缘则相对模糊,这给传统图象处理带来了一定的困难,也往往会出现误检的情况。但由于熔渣的边缘和熔池的边缘变化趋势是不同的,分形特征参数也有区别,因此用基于分形理论的图象处理方法来处理熔池图象,可以得到很好的图象检测效果(如图 4 所示)。图 4(a)是焊接熔池原始

图象,中间灰色区域包括了熔渣影象,焊枪影象也在熔池中,在图象处理时,可以不考虑焊枪部分影象信息;图 4(b)黑色方块就是检测到的熔池模糊边缘区域,它基本上覆盖了整个熔池边缘;图 4(c)就是在模糊边缘区里检测到的熔池边缘,此时边缘点满足高次多项式方程。

由此可见,基于分形理论的图象处理方法在焊接图象处理中不仅具有很好的检测效果,而且缩短了图象处理时间,传统方法处理两幅图象需要 1.0s 左右,而用分形方法只需要 0.7s。经过大量的图象处理实验,得到以下的图象处理经验参数:

对焊前图象,焊缝边缘区域的分形特征参数为: $0.8 < H < 1.2, b > 2.0, \sigma < 0.05$ 。

对焊接时图象,焊缝或熔池边缘区域的分形特征参数为: $0.8 < H < 1.2, b > 1.5, \sigma < 0.03$ 。

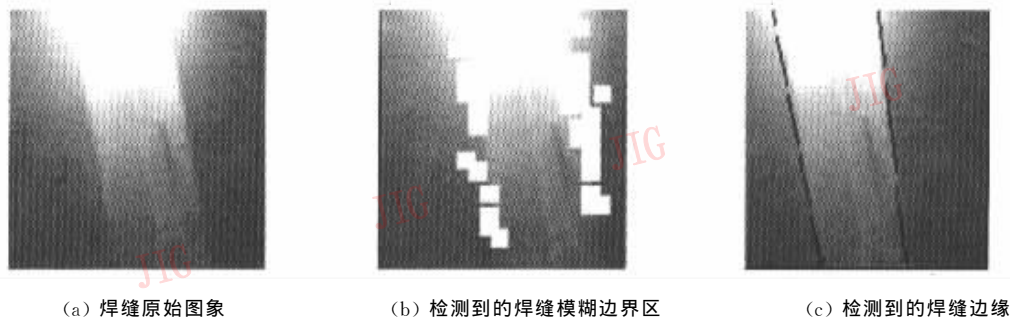


图 3 焊接时焊缝图象处理效果

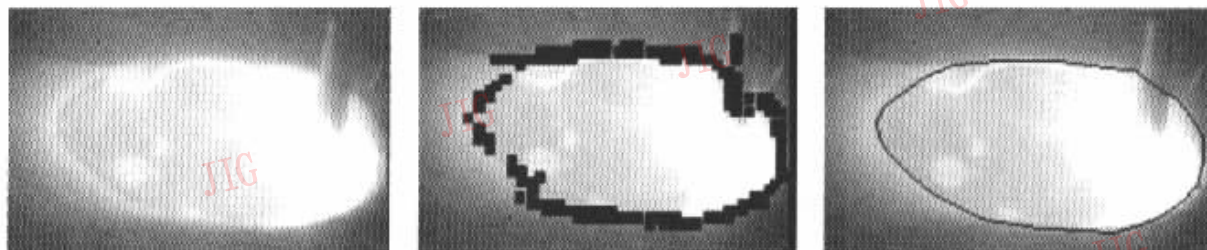


图 4 熔池图象处理效果

3 结 论

(1) 运用基于分形理论的宏观图象处理方法, 即先根据分形特征来确定图象中焊缝边缘所在的模糊区域, 然后利用差分算子对焊缝边缘进行局部检测. 这种基于分形理论检测边缘区域内部边缘点的综合图象处理方法, 能比较准确地进行焊缝图象的边缘识别.

(2) 该方法也可以用来提取焊接过程熔池的边缘, 以便获得熔池的形状、大小等参数.

(3) 与传统图象处理方法相比, 运用该方法可以节省图象处理时间和提高边缘检测精度.

(4) 能准确提取焊缝或熔池的边缘, 为焊接过程的实时控制提供了可靠的信息.

参 考 文 献

- 1 余松煜, 周源华, 吴时光. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989: 150~183.
- 2 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993: 68~115.
- 3 Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, PAMI-6(6): 661~674.
- 4 张济中. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- 5 陆润民. C语言绘图教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 155~187.

肖 勇 1974年生, 清华大学机械系材料加工工程及自动化博士研究生. 主要研究方向为材料加工工程及自动化、机器人技术及工程应用等. 发表论文3篇.

陈 强 1956年生, 教授, 博士生导师, 清华大学机械工程系主任, 中国焊接学会常务理事、副秘书长, 中国焊接学会熔焊工艺与设备专业委员会主任. 主要研究方向为材料加工工程及自动化、机器人技术及工程应用等. 发表论文40余篇.

孙振国 1971年生, 现在清华大学机械工程系任教, 并担任中国焊接学会熔焊工艺及设备委员会委员兼秘书. 主要研究方向为材料加工过程控制与自动化、机器人技术及其工业应用. 已发表论文15篇.

路井荣 1972年生, 1994年获清华大学机械工程及自动化专业学士学位, 1999年获清华大学材料加工工程专业博士学位. 研究方向为机器人技术及其应用. 已发表论文3篇.