

焊缝表面缺陷激光扫描三维重构测量

杨鹏程¹, 高向东¹, 林少铎¹, 马波¹, 潘春荣²

(1. 广东工业大学, 广东省焊接工程技术研究中心, 广州, 510006; 2. 江西理工大学, 赣州, 341000)

摘要: 为检测工件焊缝表面缺陷, 采用点激光位移传感测距法和数据拟合技术进行焊缝表面缺陷检测试验研究. 首先采集缺陷表面轮廓数据点, 利用高斯滤波对原始数据降噪处理. 再对处理后的数据点进行 Delaunay 三角剖分, 使散乱点连接并结合其空间坐标重构出缺陷的三维模型. 结果表明, 基于点激光位移传感测距技术及焊缝表面缺陷三维重构方法可以准确判断焊缝成形情况.

关键词: 激光测距; 焊缝缺陷; 三角剖分; 三维重构

中图分类号: TG 441.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20191101001

0 序言

在焊接过程中, 由于各种因素的影响, 焊缝往往会出现多种焊接缺陷^[1]. 而焊缝成形是衡量焊接质量的重要指标^[2], 因此, 对焊接表面缺陷的检测就显得十分重要. 焊接过程中产生的咬边、凹坑、焊瘤等表面缺陷对焊接质量极其不利^[3]. 传统的检测方法由技术工人手工完成, 检测成本低、过程简单、不需要特殊设备, 但其检测精度取决于技术工人的检测技能, 且检验尺长时间使用易造成磨损, 降低了检测精度. 近年来, 机器视觉技术被引入该领域, 以克服手工检测的缺点^[4]. 目前, 机器视觉多采用图像分析技术, 实现对焊缝缺陷表面图像的去噪、阈值分割等处理, 缺陷与背景分离^[5]. 图像处理的质量直接影响焊缝表面缺陷检测结果, 对图像处理要求较高, 通常难以满足检测要求.

激光位移传感器具有与工件表面不接触、精度高、抗干扰性好等优点^[6]. 用激光扫描测量的方法进行焊后检测, 利用对焊缝表面高度差的测量得到焊接缺陷的尺寸大小和形态, 以此评估焊接质量是否达到工业要求. 当前, 虽然线结构光对焊缝表面缺陷检测应用广泛, 成熟产品颇多, 但检测精度还有待提高^[7]. 为此在点激光位移传感器对焊缝表面缺陷检测试验的基础上, 阐述其原理和优点, 并与

结构光对比, 提出了一种高精度的焊缝表面缺陷检测方法.

1 试验装置

点激光扫描焊缝表面缺陷检测系统是由 3 个模块组成, 分别是视觉传感模块、运动控制模块和计算机, 其试验系统如图 1 所示. 视觉传感模块是该检测系统的核心组成部分, 试验采用超高速激光位移传感器, 传感器中 CCD(charge-coupled device) 发射的点激光具有单色性、相干性好、光束准直和精度高等优点, 点激光传感器绝对精度可达 0.001 mm.

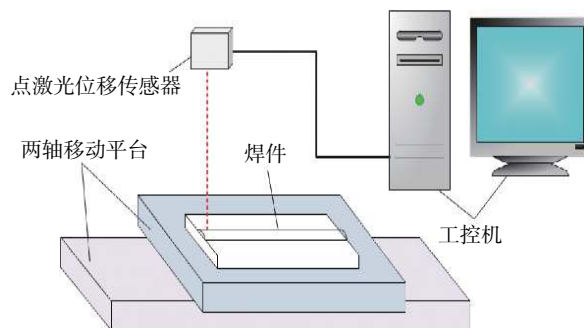


图 1 焊缝表面缺陷检测装置及量块示意图

Fig. 1 Weld surface defect detection device and block

运动控制模块由运动控制卡、驱动器、步进电机和试验工作台四部分构成, 运动控制卡同时可控制 2 个步进电机, 完成运动控制功能. 驱动器通过运动控制卡发出的脉冲信号转化为步进电机的角

位移, 步进电机通过滚珠丝杠带动试验工作台运动. 运动控制系统的脉冲当量和步进电机的步距角、丝杆的螺距及驱动器的细分选择有关, 其计算如式 (1) 所示.

$$d = L / \left(\frac{360}{\theta} \cdot N \right) \quad (1)$$

式中: L 为丝杆的螺距; N 为驱动器细分选择倍数; θ 为步进电机的步距角; d 为对应轴的脉冲当量. 步进电机步距角 θ 为 0.72° , 驱动器细分可调, 设置 N 为 8, 丝杠螺距 L 为 10 mm, 运动控制系统脉冲当量值为 0.002 5 mm.

2 激光位移传感器精度测量

激光位移传感器测量物体表面高度的原理是激光位移传感器沿着 x 轴与 y 轴移动, 测量出空间坐标系中 z 轴的坐标. x 轴和 y 轴坐标可由平台运动路径规划给出, 激光位移传感器测得 z 轴坐标, 利用扫描所得焊缝表面缺陷空间三维坐标, 拟合重构出缺陷三维形态.

在对传感器精度测量的试验中采用 10 mm 量块, 相应的装置如图 1 所示. 图 2 是 10 mm 量块经扫描得到的轮廓点集, 由图中可以看出在平台及量块表面数据点有跳动, 测量必然会有误差.

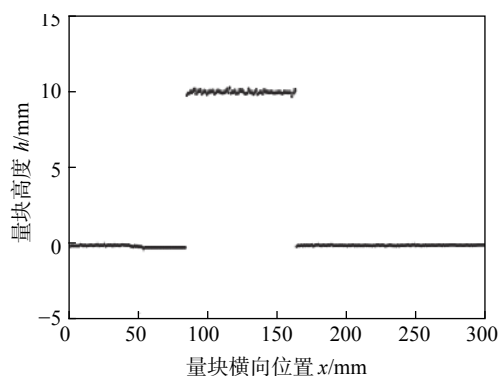


图 2 量块 10 mm 测量轮廓图

Fig. 2 Outline of 10 mm calibration block

表 1 是通过多次测量 10 mm 量块的同一位置高度, 来确定整个测量系统的测量误差, 其中, 测量值存在大于 10 mm 和小于 10 mm 的情况, 并无整体偏大或偏小, 这说明不存在系统方向性误差, 测量可靠. 其结果如图 3 所示, 均方根误差为 0.058 4 mm.

表 1 量块高度测量误差表

Table 1 Gage block height measurement error table

序号	10 mm 标准值量块		
	测量值 h_1/mm	真实值 h/mm	误差 ε/mm
1	9.962	10	0.038
2	9.945	10	0.055
3	9.907	10	0.093
4	9.946	10	0.054
5	9.988	10	0.012
6	10.069	10	-0.069
7	9.955	10	0.045
8	10.076	10	-0.076
9	9.959	10	0.041
10	9.939	10	0.061
平均值 \bar{h}/mm	9.975	10	0.025
标准偏差 σ/mm		0.025	
均方误差 MSE/mm		0.058 4	

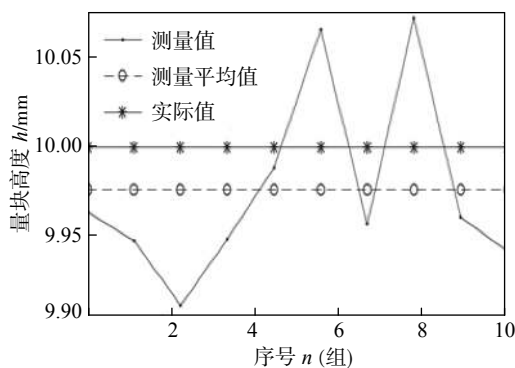


图 3 焊接缺陷检测系统测量误差图

Fig. 3 Error of weld defect detection system

3 Delaunay 三角剖分原理

试验中传感器是逐条扫描焊缝缺陷重构出三维形态, 在相邻两条扫描轮廓之间用 Delaunay 三角剖分. 当给定的结点分布中不存在四点或四点以上共圆时, Delaunay 三角剖分有唯一的最优解, 保证划分出的三角网格尽量均匀规范^[8]. 在试验结果分

析中, 利用 Delaunay 三角剖分对采集到的数据点进行处理, 得出焊缝表面缺陷的三维模型。

Delaunay 三角剖分应用于焊缝表面, 假设焊缝表面存在有限点集, 在扫描焊缝得到表面高度的数据点后, 选定其中 3 个点构成原始三角形, 由此向周围扩展, 最后得到一个平面。该平面图满足两个条件^[9], 第一是 Delaunay 三角网唯一, 在 Delaunay 三角形网中任意三角形的外接圆范围内不会有其它点存在; 第二是在点集可能形成的三角剖分中, Delaunay 三角剖分所形成的三角形的最小角最大。在两个相邻的三角形构成凸四边形的对角线, 在相互交换后, 两个内角的最小角不再增大, 为最优解。

Delaunay 三角剖分所具备的一些优异特性在焊接试验中均有体现。以最接近的三点形成三角形, 且各线段 (三角形的边) 皆不相交, 从而保证了网格没有冗余点。不论从区域何处开始构建, 最终都得到一致结果, 使得最终得到唯一的网格划分^[10]。

网格构建通过一个循环扩展的三角形生长过程实现, 从点数据中选择 3 个点规定一个初始三角形, 并作为网格曲面的种子三角形加入三角曲面集。实时刷新边界集, 通过曲面网格由局部到整体的动态增长最终完成完整的焊缝轮廓三角网格曲面。

4 信号的高斯降噪处理

基于试验平台和数据处理原理, 用点激光位移传感器扫描焊缝表面凹凸缺陷得到数据点, 并对目标进行三维重构。扫描所得原始数据噪声点较多, 先对其进行滤波降噪处理。将高斯核函数与数据点原始信号进行卷积得到滤波输出后的信号^[11], 如图 4 所示。

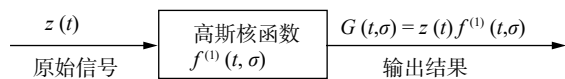


图 4 焊缝扫描信号高斯滤波的基本原理
Fig. 4 Rationale of gaussian filter for weld scanning signals

一维高斯函数为

$$f(t, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其一阶导数为

$$f^{(1)}(t, \sigma) = \frac{-t}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中: $f^{(1)}(t, \sigma)$ 为高斯滤波器。函数 $z(t)$ 被 $f^{(1)}(t, \sigma)$ 滤波的结果 $G(t, \sigma)$ 为

$$G(t, \sigma) = z(t) * f^{(1)}(t, \sigma) \quad (4)$$

式中: $*$ 为卷积运算符; σ 为高斯函数的标准方差。

高斯滤波器的平滑由 σ 控制, 可以改变高斯标准方差来调节信号降噪的平滑程度。试验扫描对象是不锈钢对接焊焊缝, 实物图和凹坑缺陷横向轮廓图分别如图 5 和图 6 所示。

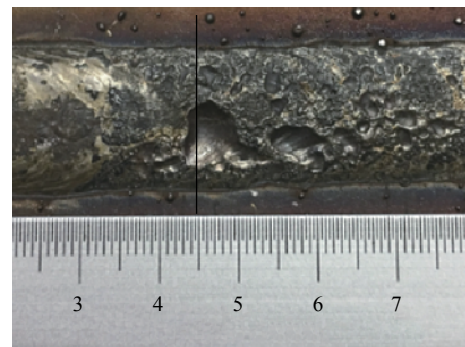


图 5 焊缝凹坑缺陷实物
Fig. 5 Physical photo of weld pit defect

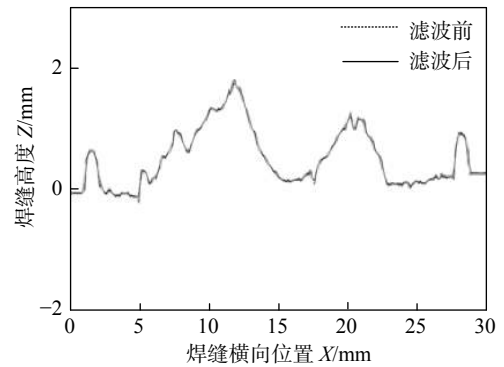


图 6 含有凹坑缺陷的单次焊缝扫描横向轮廓图
Fig. 6 Single weld scanning horizontal profile including pits defects

如图 6 所示, 每条轮廓 300 个点, 相邻点之间平均距离为 0.1 mm。另外, 相邻轮廓间隔 0.2 mm。采用高斯降噪对原始信号处理, 经高斯滤波后的拟合曲线更光滑, 更接近实际焊缝轮廓, 图 6 两边靠近母材部分的小凸起是焊接飞溅。

数据点的网格剖分根据 Delaunay 三角剖分准则对采集数据点以三角形连接成网格并保证质量最优。图 6 所示的凹坑缺陷横向轮廓, 原始采样信号高频噪声点较多, 高斯滤波降噪后的曲线更平滑。

为更明显地体现高斯滤波和 Delaunay 三角剖分在三维重构中的作用, 可对三维图进行进一步处理, 图 7 是原始采集数据三维图, 图 8 是处理后的三维模型. 处理后的效果图比原始数据三维模型更平滑和密集, 轮廓之间衔接更好.

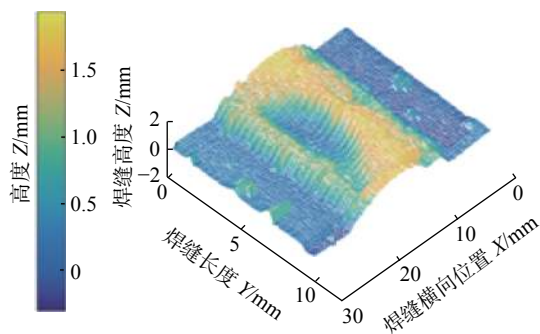


图 7 焊缝凹坑缺陷原始数据三维重构图
Fig. 7 Original 3D reconstruction of the pit defect

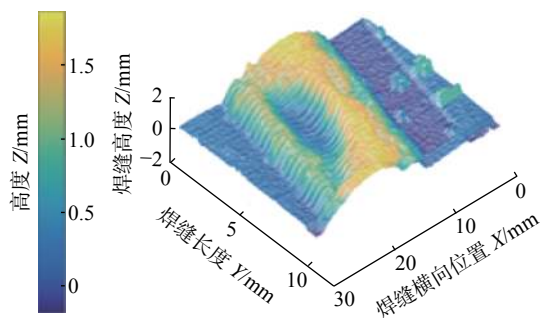


图 8 焊缝凹坑缺陷处理后的三维重构图
Fig. 8 3D reconstruction image after pit defect processing

图 9 是焊缝咬边缺陷实物图. 咬边缺陷焊缝二维轮廓图及三维重构图如图 10 所示, 图 10a 为图 9 对应的咬边二维轮廓图, 在第 350 个数据点左右有明显的咬边缺陷. 图 10b 为焊缝表面三维重构图, 在 y 轴 4 mm 到 6 mm 的位置为咬边缺陷.

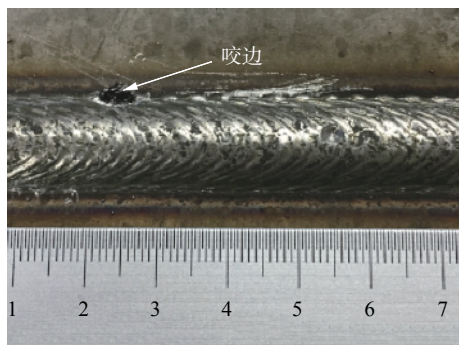
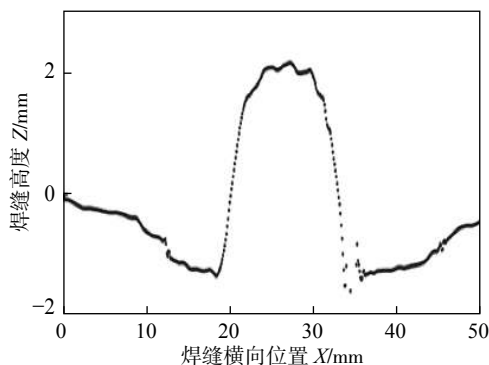
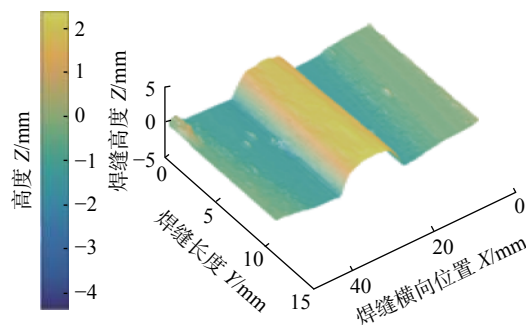


图 9 焊缝咬边缺陷实物图
Fig. 9 Undercut defect physical map of weld



(a) 咬边缺陷焊缝二维轮廓图



(b) 咬边缺陷焊缝三维重构图

图 10 咬边缺陷焊缝二维轮廓图及三维重构图
Fig. 10 Two-dimensional contour and three-dimensional reconstruction picture of weld with undercut defect. (a) two-dimensional contour of weld with undercut defect; (b) three-dimensional reconstruction picture of weld with undercut defect

5 结论

(1) 将激光测距技术应用于焊缝表面缺陷的三维建模, 设计以激光测距技术为核心的测量系统, 通过激光位移传感器在 x, y 轴两个方向的运动, 扫描得到缺陷表面高度点集, 实现焊缝表面缺陷的三维重构.

(2) 用 Delaunay 三角剖分对数据点网格化处理并得到缺陷三维图, 提出通过焊缝表面缺陷三维模型判断焊缝成形优劣的方法. 由点激光位移传感的高精度测量和高斯降噪等数据处理方法, 能有效检测出焊缝表面缺陷形态, 为检测焊缝表面质量提供了一种基于点激光扫描检测的方法.

参考文献

- [1] Qi Jiyang, Li Jinyan. Feature extraction of welding defect based on machine vision[J]. China Welding, 2019, 28(1): 56 – 62.
- [2] 李雪琴, 刘培勇, 殷国富. 基于 Fourier 拟合曲面的 X 射线焊缝缺陷检测 [J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 61 – 64.

- Li Xueqin, Liu Peiyong, Yin Guofu. Detection of X - ray weld defects based on fourier fitting surface[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(10): 61 - 64.
- [3] 高向东, 郑俏俏, 王春草. 旋转磁场下焊接缺陷磁光成像检测与强分类研究 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(17): 61 - 67.
- Gao Xiangdong, Zheng Qiaoqiao, Wang Chuncao. Magneto-optical imaging detection and strong classification of weld defects in rotating magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 61 - 67.
- [4] Gao X D, Mo L, Zhong X G, *et al.* Detection of seam tracking offset based on infrared image during high-power fiber laser welding[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 298 - 300.
- [5] 方吉米, 王克鸿, 黄勇. 基于透红外视觉传感的 GMA-AM 熔池图像质量评价 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(12): 89 - 94.
- Fang Jimi, Wang Kehong, Huang Yong. Weld pool image quality evaluation of gas metal arc additive manufacturing based on infrared visual sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 89 - 94.
- [6] 董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 30 - 38.
- Dong Zhixu, Sun Xingwei, Liu Weijun, *et al.* Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 30 - 38.
- [7] Graaf M D, Aarts R, Jonker B, *et al.* Real-time seam tracking for robotic laser welding using trajectory-based control[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(8): 944 - 953.
- [8] 梁德群, 沈杉, 杨海军. 基于点光源 X 射线焊缝缺陷深度尺寸的测量 [J]. *焊接学报*, 2000, 21(3): 5 - 8.
- Liang Dequn, Shen Shan, Yang Haijun. Measurement of depth of X - ray weld based on point light source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 5 - 8.
- [9] 莫毅. 基于结构光视觉传感器的弧焊机器人视觉检测方法 & 试验结果分析 [J]. *热加工工艺*, 2017(1): 238 - 242.
- Mo Yi. A visual inspection method of arc welding robot based on structured light vision sensor and analysis of experimental results[J]. Processing of Hot Processes, 2017(1): 238 - 242.
- [10] Gao Shiyi, Yang Kaizhen, Liu Shitian. Detection of surface defects in laser weld seam based on data fitting[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(14): 188 - 190.
- [11] 孙俊灵, 孙光民, 马鹏阁, 等. 基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位 [J]. *中国激光*, 2017(6): 178 - 185.
- Sun Junling, Sun Guangmin, Ma Pengge, *et al.* Laser target localization based on symmetric wavelet denoising and asymmetric gauss fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017(6): 178 - 185.
-
- 第一作者简介:** 杨鹏程, 1991 年出生, 硕士; 主要从事焊接自动控制等方面的研究; Email: 253642845@qq.com.
- 通信作者简介:** 高向东, 教授; Email: gaoxd666@126.com.

(编辑: 曲畅)