

# 基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统研究

李 琳 林炳强 邹焱飏

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641

**摘要** 提出了基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统,采用机器人末端安装条纹激光传感器,在焊接过程中实时获取焊缝轮廓数据;利用小波变换模极大值理论对焊缝轮廓数据进行分析,确定焊缝特征点;以特征点为分界点,采用最小二乘法拟合焊缝直线并求取交点,精确确定焊缝轮廓特征点坐标;通过机器人坐标变换实时获得焊缝运动轨迹,从而实现焊缝跟踪。对不同的V型焊缝进行实验验证,并对有无采用最小二乘法精确定位进行对比实验。实验结果表明:只采用小波模极大值理论获得的跟踪误差约为0.514 mm,但轨迹存在较严重的抖动现象;而采用了最小二乘法精确定位特征点后,跟踪误差约为0.304 mm,抖动现象明显减弱,满足自动焊接误差要求在0.5 mm之内的要求。

**关键词** 激光技术; 条纹式激光传感器; 焊缝跟踪; 小波变换模极大值理论; 最小二乘法; 机器人

中图分类号 TP242.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0502005

## Study on Seam Tracking System Based on Stripe Type Laser Sensor and Welding Robot

Li Lin Lin Bingqiang Zou Yanbiao

*School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510641, China*

**Abstract** A new seam-tracking system based on stripe type laser sensor and welding robot is proposed. The laser sensor is fixed to the end of the robot. The weld profile data is abstracted in real-time during the welding process. And the wavelet transform modulus maxima theory is used to extract the welding characteristic-points. The contour data is grouped based on the characteristic-points. And then, the least square method is used to fit the weld lines and calculate the intersection point of straight line, which is aimed to determine the coordinates of the characteristic-points accurately. At last, the coordinate transformation calculation is used to get the trajectory of the welding torch in real-time. Then, two experimental verifications for different V-shape welds are carried on. Comparing experiments between only using wavelet transform modulus maxima theory and using wavelet transform modulus maxima and the least square method are performed. The experimental results show that the error of the former is about 0.514 mm, but the trajectory exists serious jitter phenomenon. The error of the other is about 0.304 mm and the jitter phenomenon significantly diminishes, which satisfies the requirements of automatic welding of requirements within 0.5 mm.

**Key words** laser technique; stripe type laser sensor; seam tracking; wavelet transform modulus maxima theory; the least square method; robot

**OCIS codes** 140.5758; 350.3390; 140.5960; 140.3390

### 1 引 言

在现代制造工业领域中,机器人焊接广泛应用于机械制造、航空航天航海、汽车等制造领域<sup>[1]</sup>。但是目前所配备的焊接机器人,大都是属于“示教-再现”或少量第二代离线编程型机器人<sup>[2]</sup>。当焊接对象或者焊接条件改变时,焊接机器人并不能根据这些条件做出相应的调整,而这些条件的改变使得焊枪偏离焊缝中心,

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-30

基金项目: 广东省战略性新兴产业项目(2011A091101001)

作者简介: 李 琳(19—),女,博士,教授,主要从事工业机器人技术及应用等方面的研究。E-mail: linin@scut.edu.cn

造成焊接质量下降甚至失败<sup>[3]</sup>。因此在焊接机器人的实际应用过程中,只有通过应用一定传感技术获得焊缝中心相对于机器人的位置和姿态,才能够保证机器人准确的跟踪焊缝中心。激光传感器由于具有单色性好、方向性强、相干性好和亮度高等优点,在存在着粉尘、光照波动大以及烟雾等干扰因素的焊接环境中,激光传感器比传统的 CCD 相机具有更好的抗干扰性而成为机器人焊缝跟踪中的热点与重点。

激光主动成像技术是利用主动发射激光束照射被测对象,探测目标反射的信号,并对目标进行成像<sup>[4]</sup>。按照扫描方式可以分为扫描成像和非扫描成像<sup>[5]</sup>。激光扫描测距技术是由激光扫描获得被测物体的距离信息,并返回被测物体在激光测量坐标系下的位置坐标值,通过对激光所扫描获得的数据进行处理可获得被测物体的轮廓特征。然而在该扫描过程存在着两种缺陷:一是焦斑扫描轨迹构成的扫描场在空间成球面场,与工作平面不是重合的,称为系统的聚焦误差或 Z 轴误差;二是扫描图形将在 X 轴出现枕形误差,在 Y 轴出现桶形误差<sup>[6]</sup>。Chang 等<sup>[7]</sup>提出了针对激光传感器扫描获得的焊缝轮廓数据处理提出了通过高斯滤波器去除噪声,进而对数据求解一阶导数和二阶导数,再次采用高斯滤波器对二阶导数的数据进行卷积,通过寻找局部最大值和最小值确定焊缝特征点的算法,实现了对焊缝的准确跟踪。将激光传感器应用于机器人的自动焊接,能够克服传统的 CCD 相机容易受弧光干扰的缺点,准确的实现焊缝跟踪。

本文将半导体激光发射源条纹式激光传感器固定于焊接机器人末端,通过机器人带动激光传感器扫描被焊工件,采集焊缝的轮廓数据,本文选用两种不同的典型 V 型焊缝如图 1 所示。对采集的数据采用小波变化模极大值理论与最小二乘法提取焊缝的特征点数据,进而确定焊缝的中心位置,通过工业机器人的坐标系变换矩阵将焊缝中心在激光测量坐标系的位置转换至机器人的基坐标系下的坐标,从而确定焊接机器人的实时运动轨迹,实现焊缝跟踪。

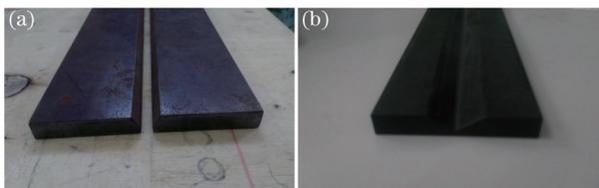


图 1 焊缝类型。(a) 梯形焊接; (b) 三角形焊接

Fig.1 Weld type. (a) Trapezoidal weld; (b) triangle weld

## 2 关键技术的研究

### 2.1 初始测量数据特征点的提取

测量过程中,将传感器的测量模式设置为触发模式,通过工控机给传感器一个触发指令,触发传感器测量焊缝表面,并返回焊缝的截面数据。焊缝跟踪中最主要的技术问题就是焊缝特征点的提取,也就是激光测量数据特征点的提取。本文采用小波变化模极大值理论与最小二乘法结合来提取激光数据的特征点。小波变换模极大值理论对焊缝的特征点进行初步定位,并对初步定位的精度进行实验验证。在此基础上将激光数据分组,采用最小二乘法拟合激光数据,拟合出的直线代表着焊缝的直线并求取交点,对特征点进行

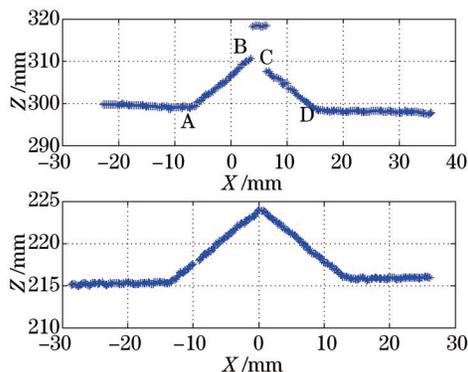


图 2 焊缝横截面

Fig.2 Cross-section of the weld

精确定位。激光采集的二种焊缝截面如图2所示。图中所示采用\*代表激光点,横坐标为激光测量坐标系的X坐标,纵坐标为激光测量坐标系的Z坐标,以下各图中的横纵坐标意义相同。

2.1.1 焊缝特征点的初步定位

焊缝特征点的初步定位步骤如下(以梯形型焊缝为例):

1) 采用高斯小波函数的一阶导数对初始激光测量数据进行高斯小波变换,高斯小波函数图像如图3所示。通过搜索小波变换后的局部最大值和局部最小值,确定特征点B、C的位置。如图4所示。由于B、C之间阶跃数据的影响,无法确定特征点A、D位置,因此采用线性插值方法,将B、C之间的数据通过插值方法去除阶跃部分,将其置换为B、C直线上的数据,如图5所示。

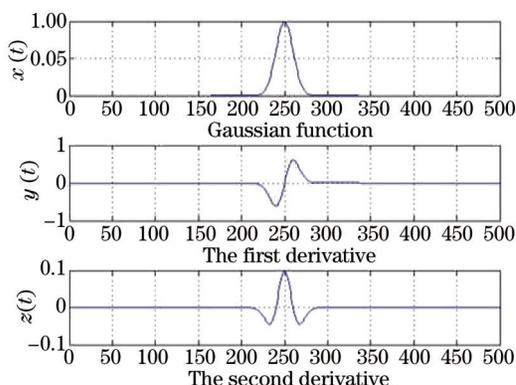


图3 高斯小波图像  
Fig.3 Gauss function

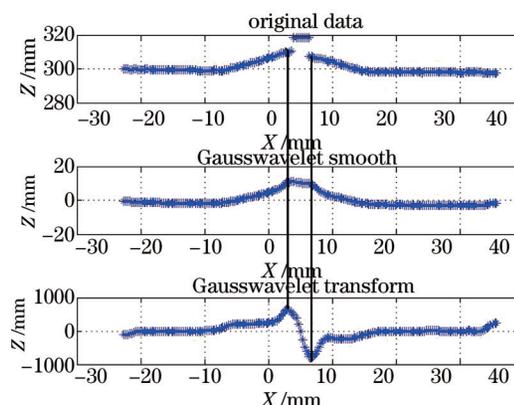


图4 B、C特征点的确定  
Fig.4 Determination of feature points B and C

2) 对插值后的数据求一次差分,采用高斯小波函数的一阶导数进行高斯小波变换求解,通过搜索变换后的数据的局部最大值和局部最小值确定特征点A、D的位置。如图6所示。至此,激光数据特征点的初步定位已经完成。

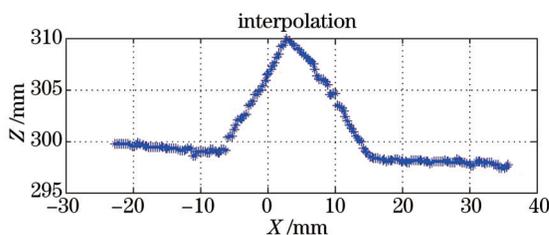


图5 数据处理后焊缝图像  
Fig.5 Data after linear interpolation

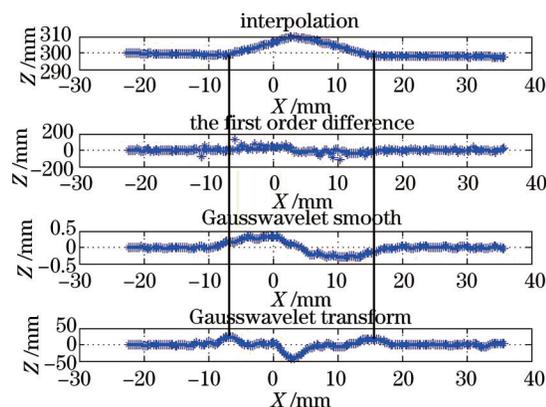


图6 A、D特征点的确定  
Fig.6 determination of feature points A, D

初步定位的焊缝特征点位置如表1所示。

表1 特征点初步定位结果

Table 1 Position of the characteristic points

Points	X /mm	Z /mm
A	-7.10	298.91
B	2.90	309.99
C	6.80	307.49
D	15.20	298.49

2.1.2 数据特征点的精确定位

考虑到焊接工件表面有缺陷的情况,激光采集的特征点会出现严重的偏差情况;同时,由于激光点之间的分布间距,通过初步定位确定的特征点并不能真正代表着焊缝的边缘特征点,在跟踪时会出现较大抖动

的现象。因此,需要对该算法进行进一步的改进。数据特征点的精确定位采用最小二乘法,根据激光数据特征点的初步定位得出4个特征点的初步位置,根据特征点的位置,将激光数据分组,进行直线拟合。通过求取直线的交点,精确定位激光数据的特征点位置。计算得到的直线参数如表2所示。

表2 焊缝直线参数

Table 2 Parameters of welding lines

Parameters	$a$ /mm	$b$ /mm
1	-0.0608	298.41
2	1.1112	306.52
3	-0.6410	311.85
4	-1.0586	314.59
5	-0.0299	298.75

拟合后的激光数据直线如图7所示。

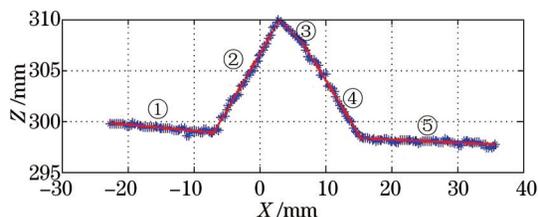


图7 拟合后焊缝图像

Fig.7 Welding lines after linear fitting

直线的交点坐标如表3所示。

表3 焊缝交点坐标

Table 3 Intersections of the welding lines

Points	$X$ /mm	$Y$ /mm
A	-6.912	298.83
B	3.044	309.90
C	6.554	307.65
D	15.39	298.29

### 2.1.3 三角形焊缝的仿真结果

上述的焊缝特征点提取算法,在处理不同的焊缝类型时,需要做出相应的修改。例如三角焊缝,处理步骤为:首先对激光数据求取一阶差分,利用高斯小波变换进行焊缝特征点的初步定位;根据初步定位的结果,将激光数据分成两组并进行直线拟合,进而求取直线的交点。仿真结果如图8所示。

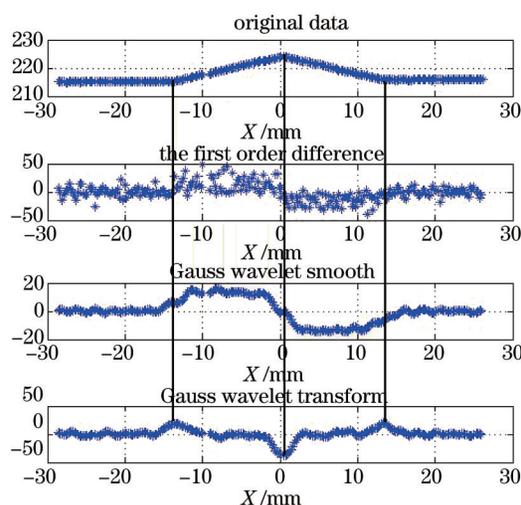


图8 三角焊缝特征点提取

Fig.8 Detection of characteristic-points of triangle weld

### 2.1.4 算法的时间复杂度分析

算法的时间复杂度反应了程序执行时间随输入规模增长而增长的量级,在很大程度上反应了算法的优劣与否。文中的算法在一次采集周期里采集的激光点数据有 240 个数据点,经过计算,运行高斯小波算法的时间复杂度为  $o(n^2)$ ,其中  $n=240$ 。对于需要进行焊缝特征点精确定位的提取算法,经过最小二乘法拟合计算之后的时间复杂度为  $o(n)$ 。因此,文中的算法时间复杂度为  $o(n^2)+o(n)$  或者  $o(n^2)$ 。在实际的跟踪过程中,提取一次特征点的运行时间约为几毫秒,激光采集数据的周期设置为 50 ms,该算法能够满足实时性的要求。

### 2.2 机器人的坐标系变换

条纹式激光传感器所测量的数据是基于传感器自身的测量坐标系下的坐标值,算法所提取的焊缝特征点也是测量坐标系下的坐标值。因此,必须通过工业机器人的坐标变换关系将焊缝特征点的坐标变换至机器人的基坐标系,才能够实现焊缝的轨迹跟踪。坐标转换时需要获得测量坐标系相对于机器人末基座坐标系的旋转矩阵。其中,测量坐标系由安装尺寸获得,测量坐标系的位置数据是相对于机器人末端坐标系。机器人末端坐标系通过控制软件实时获得机器人的位置数据,采集周期与传感器的周期一致,即每个激光数据对应着一个机器人的位置数据。采集的焊缝中心是相对于测量坐标系的,与焊缝处于平面、斜面或者曲面情况下无关,即当焊缝处于平面、斜面、曲面情况下,也能实现焊缝跟踪。

实验时,工控机触发定时器采集机器人末端在每个时刻相对于机器人基坐标系的位置和姿态值,设姿态的绕固定轴  $x-y-z$  旋转(RPY)角为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,则可以得到机器人末端与机器人极坐标系的旋转变换矩阵为

$$W_T^B = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $R_{11} = \cos \alpha \cos \beta$ ,  $R_{12} = \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma$ ,  $R_{13} = \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma$ ,  $R_{21} = \sin \alpha \cos \beta$ ,  $R_{22} = \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma$ ,  $R_{23} = -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma$ ,  $R_{31} = -\sin \beta$ ,  $R_{32} = \cos \beta \sin \gamma$ ,  $R_{33} = \cos \beta \cos \gamma$ 。

加上此刻测量坐标系相对于末端的偏移量  $x,y,z$ ,测量坐标系相对于基座标的变换矩阵为

$$W_M^B = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

将特征点  $(x_1, 0, z_1)$  变换到机器人基坐标的公式为

$$P = W^* \begin{bmatrix} x_1 & 0 & z_1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于机器人本身没有插补算法,因此必须对焊接机器人的运动轨迹进行离散化处理。具体的处理方法是通过对工控机上的定时器每隔一定的采集时间采集焊枪的位置坐标值。在实验中,首先示教机器人沿着焊缝的路径扫描,并在扫描的过程中采集焊枪的位置坐标值,生成机器人可识别的程序并加载至机器人的控制器当中。扫描完成后将机器人运动到程序的起点,打开激光传感器,让机器人开始运动。工控机通过发送扫描指令至激光传感器中,触发传感器扫描焊接工件,并返回激光数据至工控机中的焊缝特征处理算法,提取焊缝的特征点并将其转换为机器人基坐标系下的坐标,通过工控机实时修改当前机器人的运动位置,从而实现对焊缝的实时跟踪,保证焊枪对准焊缝中心。

## 3 实验研究

### 3.1 系统组成

该实验系统主要由安川 MOTOMAN MA1400 焊接机器人、德国 Leuze electronic 公司的 LPS36 型条纹式激光传感器(图 9)和工业控制计算机(以下简称工控机)组成,如图 10 所示。

实验所采用的传感器为德国 Leuze electronic 公司的 LPS36HI 型条纹式激光传感器,该传感器基于三角

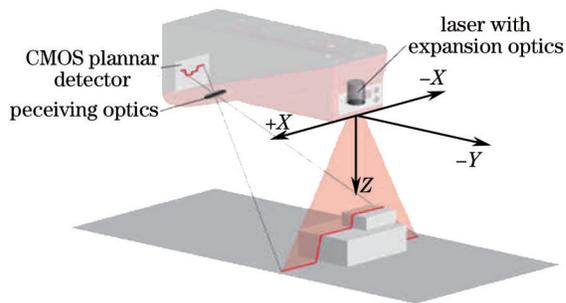


图9 条纹式激光传感器

Fig.9 Line profile sensor

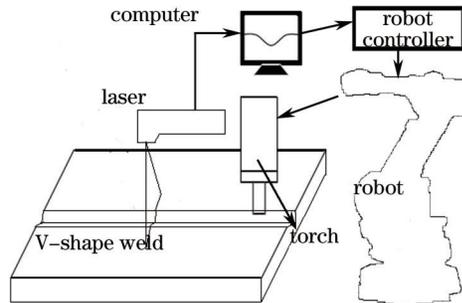


图10 系统组成图

Fig.10 System diagram

测量原理,通过激光束对被测物体截面轮廓进行测量,并获得扫描数据。激光结构光视觉传感技术作为主动光学测量技术,具有非接触、精度高、速度快等优点,因而能够用于实时的跟踪系统当中<sup>[8]</sup>。

实验结果表明:电弧光谱存在着 440~480 nm、610~700 nm 和 850~950 nm 3 个相对强度很弱的波段。实验中采用的条纹式激光传感器的波长为 650 nm,并且半导体激光具有光电转换高效、体积小及金属对其吸收率高等优点<sup>[9]</sup>,因此能够避免强弧光对激光测量精度的影响并且采用与激光等同波长的滤光片进行滤光,去除包括弧光在内的杂光,得到准确的测量数据。激光传感器发出激光照射到被测物体表面时,激光束会发生与被测物体表面轮廓相一致的变形,在激光束上等间距分布一系列采样点,实验所用的激光传感器产生约 240 个激光点,间隔约为 0.3 mm。

激光传感器通过安装板安装在机器人末端法兰盘上,通过以太网与工业计算机进行通信,从而通过工控机来控制传感器进行工作、接收传感器反馈回来的测量数据。工业计算机与机器人控制器同样用以太网通信,实现通过工控机远程控制机器人动作、工控机与机器人控制器之间数据的读取和发送。实验时,机器人带动传感器对被测物进行扫描测量。扫描完毕后,数据采集与处理系统对采集到的数据进行处理,计算出各个被测几何参数<sup>[10]</sup>。工控机中的软件用来实现上述设备之间的通信、数据的传输和焊缝特征点的提取等。实验平台实物图如图 11 所示。

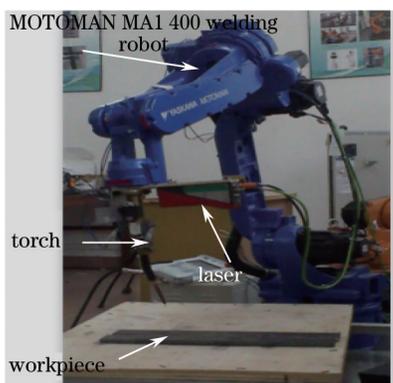


图11 实验平台实物图

Fig.11 Experimental platform physical figure

### 3.2 实验方法及结果

实验时,在工件上标记焊缝的起点和终点,利用机器人驱动焊枪无限接近标记的起点和终点,记录当前焊枪坐标系的坐标值作为实验对比的基准,并示教机器人的运动轨迹。利用工控机同时启动机器人以及激光传感器,通过机器人带动传感器扫描焊接工件,每隔一个数据采集周期采集一道激光数据后保存。提取特征点,然后通过机器人坐标变换将每次激光数据特征点转换至机器人的基座标的坐标值,转换后与通过焊枪取得的基准线进行比较,得到两种不同 V 型焊缝的对比实验结果分别如图 12(a)、(b)所示。

实验的误差计算主要计算算法提取的特征点相对于实验基准的平均偏差距离  $d$  以及偏差程度  $S$ ,计算结果如下:

$$\text{梯形焊缝: } \bar{d}_1 = 0.514 \text{ mm}, S_1 = 0.3017; \bar{d}_2 = 0.304 \text{ mm}, S_2 = 0.2587$$

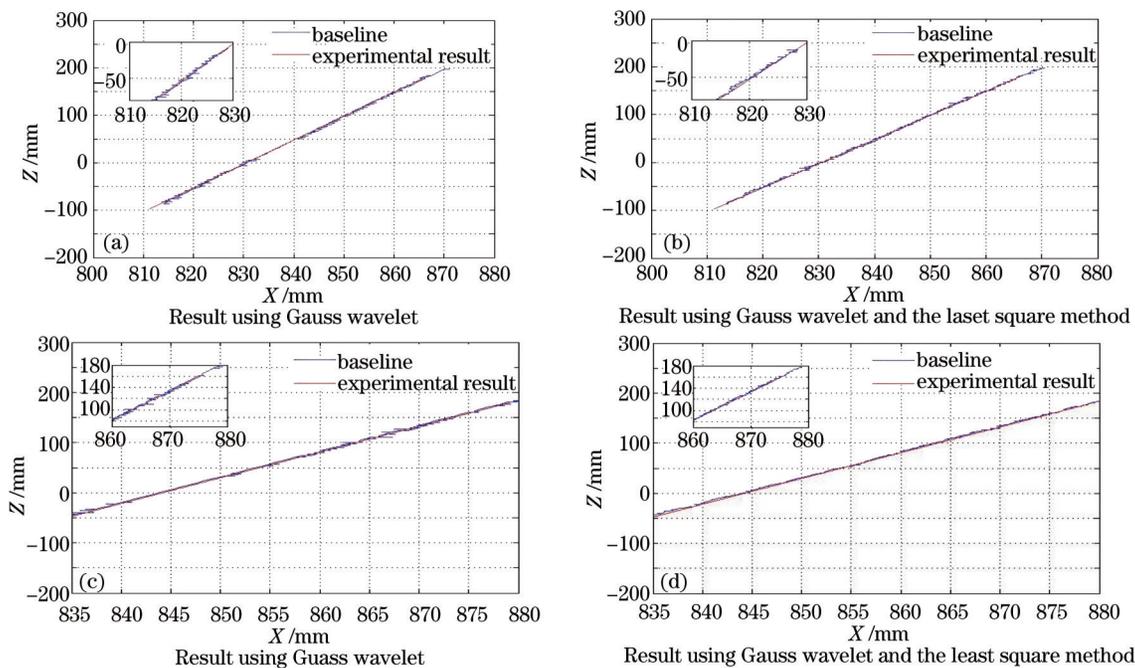


图 12 (a),(b) 梯形焊接实验结果; (c),(d) 三角焊接实验结果

Fig.12 (a),(b) Experimental result of trapezoidal weld; (c),(d) experimental result of triangle weld

三角形焊缝:  $\bar{d}_1 = 0.484 \text{ mm}$ ,  $S_1 = 0.3410$ ;  $\bar{d}_2 = 0.341 \text{ mm}$ ,  $S_2 = 0.2012$

式中  $\bar{d}_1$ ,  $S_1$  表示采用小波变换的结果;  $\bar{d}_2$ ,  $S_2$  表示采用最小二乘法优化的实验结果。

由实验结果可以看出,在焊缝特征点提取算法中,对高斯小波变换确定特征点后的激光数据进行最小二乘法拟合,可以明显地提高特征点的整体精度,也进一步解决了实验过程中的抖动现象,使得焊接过程更加平稳。

经过分析,总结本次实验的误差主要有以下几个原因:

- 1) 系统标定误差,主要是传感器和焊枪的标定误差;
- 2) 机器人的系统误差;
- 3) 人为选取基准点所带来的误差;
- 4) 算法计算误差

## 4 结 论

提出了基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统。通过激光采集焊接工件截面数据,运用小波变换模极大值理论与最小二乘法的结合提取焊缝的特征点,焊接精度能够达到  $0.304 \text{ mm}$ ,相比只采用小波变换模极大值理论的特征点提取算法,跟踪过程中焊枪的抖动现象明显减弱,焊接精度也得到了提高,满足一般焊接精度保证在  $0.5 \text{ mm}$  范围之内的要求;采用条纹式激光传感器作为焊缝跟踪的传感器件,能够在光照波动大、粉尘、烟雾等不良干扰因素的焊接环境下准确识别焊缝位置及焊缝特征点,相比传统的机器视觉焊缝跟踪,该方案的算法简单,抗干扰能力强,能够取代传统的机器视觉焊缝跟踪,因而具有更大的实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Li Hexi. Research on Welding Robot Autonomous Teaching Key Technology Based on Visual Feedback[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.  
李鹤喜. 基于视觉反馈的焊接机器人自主示教关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- 2 Shen Hongyuan. Research on Aluminum Welding Robot Vision Seam Tracking and Real-Time Control Method of Forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.  
沈鸿源. 铝合金弧焊机器人视觉实时焊缝跟踪与成型控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学材料加工工程, 2008.

- 3 Lü Xueqin, Zhang Ke, Wu Yixiong. Development status and prospects automatic seam tracking[J]. Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 80-85.  
吕学勤, 张 轲, 吴毅雄. 焊缝自动跟踪的发展现状与展望[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 80-85.
- 4 Zang Junheng. Research on Data Processing Technology Based on Streak Tube Laser Imaging System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 10-25.  
臧俊恒. 条纹管激光成像系统数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 10-15.
- 5 Sun Zhihui, Deng Jiahao, Yan Xiaowei. Development of laser imaging detection system and its key technologies overseas[J]. Technology Review, 2008, 296(3): 74-76.  
孙志慧, 邓甲昊, 闫小伟. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 74-76.
- 6 Yu Chao. The Application of Dimensional Galvanometer Scanning System in Laser Scanning Imaging[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunicaitons, 2011: 14-17.  
喻 超. 二维振镜式扫描系统在激光扫描成像中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011: 14-17.
- 7 Doyoung Chang, Donghoon Son, Jungwoo Lee, *et al.*. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28: 1-13.
- 8 Yang Guowei, Sun Changku, Wang Peng. Real-time stroboscopic laser fringe-pattern projection system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112002.  
杨国威, 孙长库, 王 鹏. 频闪激光光栅条纹实时投射系统[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112002.
- 9 Xu Guojian, Zhong Liming, Hang Zhengxiang, *et al.*. Welding performances of fiber coupled diode laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 061404.  
徐国建, 钟立明, 杭争翔, 等. 光纤耦合半导体激光的焊接性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 061404.
- 10 Gao Yan, Shao Shuangyun, Feng Qibo. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708005.  
高 岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708005.

栏目编辑: 宋梅梅