

# 激光焊接焊缝质量视觉检测系统

Visual Inspection System for Laser Welding Seam Quality

王立伟 孙鹤旭 崔丽娜

(河北工业大学控制科学与工程学院,天津 300130)

**摘要:** 研究了 LabVIEW 在结构光视觉焊缝质量检测方面的应用,提出了一种快速高效的、用于自动化焊接系统图像处理的算法,并开发了激光焊缝质量监控系统。首先使用背景差分算法清除非均匀光照造成的影响,利用类间方差法求解最佳阈值,最大限度地保留了焊缝结构光条纹区域的有效信息;接着设计了自适应形态学收缩算法,使焊缝条纹区域在每列上收缩至一个像素点,从而得到一个没有分叉的骨架;最后利用骨架信息,结合数据拟合和特征参数提取,实现了焊缝的三维重建。试验结果证明,视觉检测系统以及焊缝特征的测量结果令人满意。

**关键词:** 机器视觉 LabVIEW 质量检测 激光焊接 焊缝

**中图分类号:** TP274+.5 **文献标志码:** A

**Abstract:** The application of LabVIEW in visual quality inspection for structured light welding seam is researched, and the high speed and high efficient image processing algorithm used for automatic welding system is proposed, as well as the laser welding seam quality monitoring system is developed. Firstly, by using background differential algorithm, the influence of the imbalanced illumination is eliminated, and optimal threshold is solved with the class variance method, the maximum effective information for the structured light stripe area of welding seam is retained. Then, the adaptive morphology contraction algorithm is designed to make the structured light stripe area shrink to a pixel point in each column; thus the skeleton without furcation is obtained. Finally, by adopting the information of skeleton and combining with data fitting and characteristic parameter extraction, the 3D reconstruction of the seam is implemented. The test results verify that the vision detection system and the measurement of the seam features are satisfactory.

**Keywords:** Machine vision LabVIEW Quality inspection Laser welding Welding seam

## 0 引言

传统的质量检测方法主要利用光电、电磁、声波等各种传感器实现焊缝质量监测。焊缝质量视觉检测系统是用图像创建或恢复现实世界模型,实现对现实世界的观察、分析、判断和决策,具有信息量大、灵敏度和测量精度高、抗电磁干扰能力强以及与工件无接触等优点。

本文利用美国国家仪器公司(National Instrument, NI)的虚拟仪器平台——LabVIEW,开发激光焊缝图像处理算法和质量监控软件。该软件面向应用,支持模块化、层次化结构,并易于在不同平台间移植<sup>[1]</sup>。在机器视觉领域利用 NI Vision Assistant,可以快速选择合适的图像处理算法。该软件包提供了图像基本运算、边缘检测、图像标定、图像滤波去噪以及模式匹配等一

系列函数供用户调用。用户可以在图像显示窗口中直观地观察到每一步图像处理后的结果,同时可以在参数显示窗口中观察相关参数,以验证一种图像处理方法对不同图像进行处理的效果和不同的图像处理算法或参数对同一图像进行处理的效果<sup>[2]</sup>。

## 1 系统组成

视觉传感系统分为主动光视觉系统与被动光视觉系统。主动光视觉系统一般是由特定结构的光源与摄像机组成,其利用具有某种结构的光源将光线投射到工件表面,由摄像机获取工件表面的图像并进行处理。主动光视觉技术具有更高的精度,受外界条件变化的影响较小,实际应用更为广泛。焊缝检测中采用的主动光源一般为扫描的激光光束或多光面的激光,分别称为激光扫描法和结构光法。激光扫描法能克服工业环境中的干扰光,不需要复杂的图像处理算法,且摄像机会得到焊缝截面轮廓上的一系列点的坐标,分辨率和测量精度都较高。但是该方法需要较为精确的光学设备,且镜面经过长时间使用后易于产生偏差。应用结构光法得到的图像反映了焊缝的横向截面的外表面

河北省自然科学基金资助项目(编号:F2010000160);

天津市应用基础及前沿科技研究计划基金资助项目(编号:HJCYBJ006500)。

修改稿收到日期:2012-03-29。

第一作者王立伟(1979-)男,现为河北工业大学控制科学与工程专业在读博士研究生;主要从事视觉检测技术与自动化装置等方面的研究。

形状。其中,图像激光主条纹中的弯曲部分代表焊缝,直线部分代表工件母材。通过设计适当的算法即可得到该图像所反映的焊缝截面处的焊缝几何尺寸;同时,利用多帧图像信息可以完成三维重建,并能够直观反映焊缝的质量信息。

本文设计的质量检测系统主要包括视频采集与图像处理,其中视觉采集包括摄像头、镜头、结构光光源,图像处理主要是指计算机。摄像头采用 2/3 英寸(1 英寸=25.4 mm)的 CCD 数字摄像头,镜头为 2/3 英寸 Computar 镜头,结构光光源发射波长为 650 nm 的“一”字型光带,功率为 5 mW。结构光光带的宽度和方向可以通过激光头前端的旋钮调节。计算机配置为英特尔奔腾双核 E2200,主频 2.20 GHz,内存 1 GB,安装系统为 Windows XP SP2。激光器发出的线结构光以一定的角度投射在钢板间焊缝表面上,CCD 显微摄像机垂直于钢板放置。图像采集速率为每秒 25 帧,采集的图像为 8 位灰度图像。图像在摄像头内部已完成数字化,无需配置图像采集卡,图像通过 USB2.0 接口传输到计算机上。计算机按照设定好的速度、方向等运动参数传送给视觉系统的驱动机构,使视觉采集部分沿焊缝运动,从而完成整个焊缝的图像采集。上位机对视觉传感器采集的图像进行特征提取,获得焊缝的参数特征信息。焊缝检测系统结构如图 1 所示。

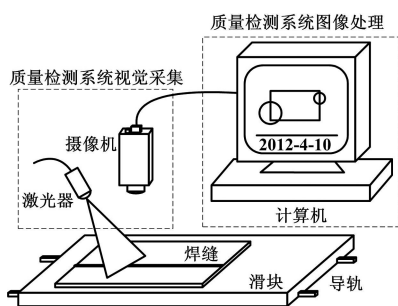


图 1 焊缝检测系统结构

Fig. 1 Structure of the welding seam inspection system

## 2 算法和软件设计

### 2.1 焊缝图像处理算法设计

焊缝宽度、余高和熔深是对焊缝进行几何描述的三个主要质量参数<sup>[3]</sup>。通过对表征焊缝质量的几何参数的测量,可以判断焊缝的整体质量,实现焊接质量的快速自动化检测。本视觉系统采用数字摄像机输出数字图像,通过 LabVIEW 中的 IMAQ Read Frame 函数读取图像;之后通过二值化处理、滤波、骨架提取、特征提取等几个步骤,得到焊缝的几何特征信息。焊缝原始

图像如图 2 所示。

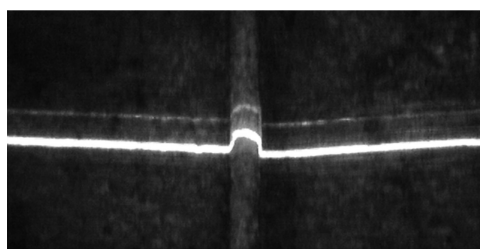


图 2 焊缝原始图像

Fig. 2 The original image of the welding seam

#### 2.1.1 二值图像处理

为了进一步凸显感兴趣的目标轮廓,需要对灰度图像进行二值化处理。同时,为了得到理想的二值图像,须选取合适的阈值。下面提出一种阈值选择方法。该方法最大程度地保留了结构光条纹区域的焊缝信息。首先使用背景差分算法消除非均匀光照造成的影响,然后利用类间方差法求解最佳阈值。方差表示的是图像灰度值分布的均匀性。方差值越大,说明像素的灰度值分布越不均匀,构成图像的部分之间的差别越大<sup>[4]</sup>。当部分表示工件的像素错分为背景或部分背景像素错分为工件时,工件和背景之间的差别都会变小。因此,使类间方差值最大的分割结果意味着像素错分的概率最小<sup>[5]</sup>。

使用当前前景图像与当前背景图像进行差分运算,有:

$$R(i,j) = F(i,j) - G(i,j) \quad (1)$$

式中: $F(i,j)$ 为前景图像; $G(i,j)$ 为背景图像。对差分图像进行二值化处理,有:

$$R(i,j) = \begin{cases} 1 & |F(i,j) - G(i,j)| > t^* \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t^*$ 为最佳阈值。在待识别图像中,工件和背景共同构成原始图像。设 $g_{oa}$ 为工件与原图之间的某种差距度量、 $g_{ba}$ 为背景与原图之间的某种差距度量,则工件与原图和背景与原图之间的均值差距度分别为:

$$g_{oa} = (\mu_o - \mu_T)^2 \omega_o \quad (3)$$

$$g_{ba} = (\mu_b - \mu_T)^2 \omega_b \quad (4)$$

式中: $\omega_o = \sum_{i=0}^L p_i$ ,为以阈值 $t$ 分割出的工件部分的概率; $\omega_b = 1 - \omega_o$ ,为以阈值 $t$ 分割出的背景部分的概率; $\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i$ ,为总均值,其中, $L$ 为图像最大灰度值,如图像为 8 位图像时, $L=28$ ;阈值为 $t$ 的均值 $\mu_t = \sum_{i=0}^L ip_i$ ;  $\mu_o = \frac{\mu_t}{\omega_o}$ ;

$$\mu_b = \frac{\mu_T - \mu_t}{1 - \omega_o}$$

由此可得到类间方差为:

$$\sigma_b^2 = g_{oa} + g_{ba} = \omega_o \omega_b (\mu_b - \mu_o)^2 \quad (5)$$

最优阈值  $t^*$  通过求类间方差的最大值得到,即:

$$t^* = \arg \max_{0 < t < L-1} \sigma_b^2 \quad (6)$$

使用该算法得到的阈值,在各种干扰下都能得到较好的二值图像。原始图像经该方法二值化处理后的图像如图 3 所示。图像中除了主激光条纹外,还有因干扰产生的光斑,即图中亮点。



图 3 二值图像

Fig. 3 Binary image

### 2.1.2 基于面积的滤波

二值化图像中激光条纹照射到的区域像素值为 1,但是由于工件上的污渍以及焊接过程中火花飞溅造成的干扰,使得二值化后图像中激光条纹两侧仍有部分干扰点,其像素值也被赋为 1。为此,可以使用面积滤波法除去这些图像噪声<sup>[6]</sup>。针对图 3 中的光斑,利用 Particle Analysis 函数可以得到主激光条纹和各个干扰光斑的面积,接下来利用 Particle Filter 函数设定面积的过滤阈值,再利用 LabVIEW 的粒子滤波器函数,实现面积法滤波。

粒子滤波器函数滤波效果如图 4 所示。



图 4 面积法滤波效果

Fig. 4 Fitting result of area-method

面积法滤波的原理如下。

① 进行区域标记。对二值化的图像进行区域标记处理,最终得到一个标记矩阵。

② 统计每一个正整数在标记矩阵中出现的次数。出现次数最多的位置对应图像中具有最大像素的连接区域,即面积最大的区域。

③ 保留这些出现次数最多的正整数对应的连接区域,即可保留图像中的主激光条纹区域,滤除部分噪

声及无意义区域,从而提高图像质量。

④ 除去图像中的孤立点。求出每个区域的面积,然后设定区域面积阈值,最后将区域面积小于阈值的区域的像素值变为 0。

### 2.1.3 结构光条纹的骨架提取

骨架提取的目的是减少图像成分,只留下感兴趣区域的最基本信息,以便进一步分析和识别。白色条纹区域的骨架是一个重要的特征信息,通过骨架可以进一步提取焊缝的特征参数,如宽度、错边、余高、角度等。本文提出一种自适应形态学收缩算法,使焊缝条纹区域在每列上收缩至一个像素点,从而得到一个没有分叉的骨架。算法如下。

$$B_3[i,j] = \begin{cases} [u,v] & u_L \leq u \leq u_H \\ & 1 \leq v \leq N \quad \max\{|u-i|, |v-j|\} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $B_3[i,j]$ 为像素感兴趣区域图像 LB 的像素 $[u,v]$ 的集合; $u_L, u_H$ 为骨架的边界横坐标。图像 LB 的  $q$  步收缩图像为:

$$\begin{cases} S^1(i,j) = \min_{(u,v) \in B_3(i,j)} \{LB(u,v)\} \\ S^q(i,j) = \min_{(u,v) \in B_3(i,j)} \{S^{q-1}(u,v)\} \\ q > 1, u_L \leq u \leq u_H, 1 \leq v \leq N \end{cases} \quad (8)$$

式中: $q$ 为迭代的次数; $S^q(i,j)$ 为第  $q$  次收缩运算的图像<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1.4 结构光条纹的骨架拟合

为了提高余高的精确度,先求出一些边缘点,对这些点进行圆的拟合;然后对轮廓上所有点到拟合圆的平方距离进行连加求和,使求得的总和最小化。式(9)给出了连加求和的公式。

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(r_i - a)^2 + (c_i - b)^2} - c]^2 \quad (9)$$

式中: $(a, b)$ 为圆心; $c$ 为圆的半径; $n$ 为参与拟合计算的特征点个数。

### 2.1.5 特征参数的计算

焊缝参数测量示意图如图 5 所示。

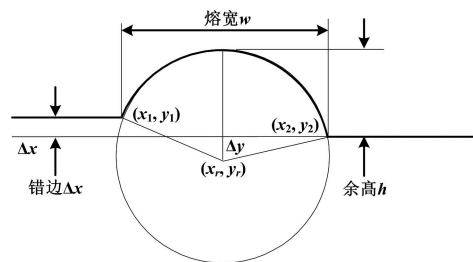


图 5 焊缝参数测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measuring the welding seam parameters

图5中: $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 为焊缝拐点; $(x_r, y_r)$ 为圆心<sup>[9]</sup>。

可靠地检测熔宽、错边和余高这几个参数,对智能的判断焊缝质量具有重要意义。其中,熔宽为焊缝轮廓线两端拐点的距离;错边为焊缝两侧母板间距离;余高为最大和最小 $y$ 坐标值的特征点,其 $y$ 坐标值之差为余高的值。

通过特征的提取,可得到相应位置点的像素坐标。根据式(10)~式(12),可计算出熔宽 $w$ 、错边 $\Delta x$ 以及余高 $h$ 在图像空间的像素。

$$w = x_2 - x_1 \quad (10)$$

$$\Delta x = |x_2 - x_1| \quad (11)$$

$$h = R - \Delta y \quad (12)$$

## 2.2 焊缝质量监控软件功能

本系统实现的功能如下。

① 通过按键和枚举类控件的组合,选择是将数据储存到当前表格还是储存到新建表格中。

② 按下初始化按键,即得到已选择表格的当前全部记录条数和不合格焊缝记录的条数。其中利用了属性节点,以限制查询数据记录行数的选择范围。

③ 按下开始处理按键,即打开摄像头获取一帧图像并处理该图像,得到相应焊缝的几何信息,将此帧图像反映的焊缝几何信息储存到数据库中。系统通过二维图片控件实时显示正在处理的图像,通过一维数组显示当前帧图像所反映的焊缝几何信息。一帧图像处理完毕后,自动将相关焊缝信息存储到数据库中。

④ 在数据库查询选项卡中选择要查看的记录的行数,按下“查看原始数据”按钮,即可显示相应行的数据记录<sup>[10]</sup>。数据包括该测试发生的时间、焊缝信息(焊缝的余高、错边、熔宽、焊缝两平板之间的角度)、相对坐标(焊缝拟合后曲线部分的左右上下极限点的 $x, y$ 坐标值)以及焊缝是否合格的检测结果。其中焊缝信息和相对坐标通过表格和波形图两种方式展示。

## 3 试验结果

开发的软件界面由系统操作面板、系统显示面板和选项卡组成。“实时处理”选项卡中的“焊缝图像”表示由每一帧图像计算得到的焊缝中心线,“三维曲面”表示由一段时间内获取的二维图像重建钢板焊缝的三维立体影像。选项卡下方为每帧图像所反映的焊缝的余高、错边、熔宽、平板角度,焊缝纵向剖面的左端点 $x$ 值、 $y$ 值,右端点 $x$ 值、 $y$ 值,顶点 $x$ 值、 $y$ 值等数据。所检测钢板焊缝的俯视图如图6所示,骨架拟合得到的焊缝中心线如图7所示。

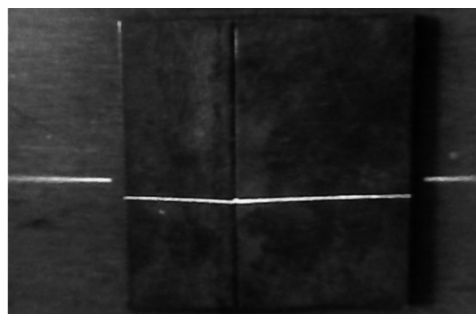


图6 钢板焊缝的俯视图

Fig. 6 Top view of welding seam of steel plate



图7 焊缝中心线

Fig. 7 Center line of welding seam

对比图2、图6和图7可知,三维重建的图形较好地反映了真实焊缝的三维立体信息,可用于实现焊缝质量的实时监测。

## 4 结束语

在LabVIEW平台下,充分利用其视觉软件包中的视频图像处理模块、内置控件和函数、数据并行处理以及动态连接库等,不仅可提高编程效率,缩短开发周期,而且还可保证程序稳定性,方便后期维护与改进。本文结合实际需求设计的激光焊缝质量检测软件系统,能够有效地检测焊缝的实时状态,识别焊缝的关键质量参数,对于保证激光焊机焊接质量具有重要作用。

### 参考文献

- [1] 李晓维. 虚拟仪器技术分析[J]. 电子测量与仪器学报, 1996, 10(3): 9-11.
- [2] 朱海英, 赵世平, 陆小龙. 基于IMAQ工件尺寸测量方法的研究[J]. 机械, 2007, 34(3): 56-57.
- [3] 徐健宁, 张华, 胡榕华, 等. 熔焊快速成型中焊接工艺参数与焊缝几何尺寸的关系[J]. 焊接技术, 2008, 37(4): 10-12.
- [4] 郭恩庆. 基于视觉的高速公路前方车辆检测[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- [5] 陈杰. QR码图像处理技术研究[D]. 温州: 温州大学, 2010.
- [6] 何斌, 马天予, 王运坚, 等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 28-40.
- [7] Huang Wei, Kovacevic R. A laser-based vision system for weld quality inspection[J]. Sensors, 2011, 11(1): 506-521.
- [8] 李久芳. 基于二值化的边缘图像滤波方法[J]. 电子工业专用设备, 2010(2): 25-27.
- [9] Beersiek J. On-line monitoring of keyhole instabilities during laser beam welding[J]. Welding Monitor PD 2000, 1999(2): 1-4.
- [10] 黎洪生, 李超, 刘俊刚. LabVIEW中利用ADO接口访问数据库的方法[J]. 计算机系统应用, 2001(11): 71-73.