

文章编号: 1001-3806(2011)04-0440-04

不等厚板激光焊接焊缝缺陷结构光视觉检测

高世一¹, 杨永强^{1,2}, 杨凯珍¹

(1. 广州有色金属研究院, 广州 510650; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: 为了检测不等厚板激光焊接焊缝表面缺陷, 采用结构光主动视觉检测法和高斯数据拟合技术进行了焊缝表面缺陷检测的实验研究。首先采用高斯拟合法对激光条纹图像进行处理, 提取出具有亚像素精度的激光条纹中心线; 然后通过最小二乘法拟合出 3 条相交直线并求其交点, 进而获得精确的焊缝端点位置坐标; 最后给出焊缝表面缺陷凹度和凸度的检测方法, 并以不等厚板激光焊接焊缝为检测对象进行验证。结果表明, 这种基于拟合技术的结构光视觉检测法为判断激光焊接焊缝质量是否合格提供了较为准确的判断依据。

关键词: 图像处理; 焊缝表面检测; 结构光视觉; 高斯拟合

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.002

Defect detection of laser welding seam of unequal-thickness blank based on structured light vision

GAO Shi-yi¹, YANG Yong-qiang^{1,2}, YANG Kai-zhen¹

(1. Guangzhou Institute for Non-Ferrous Metal Research, Guangzhou 510650, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to detect the laser welding seam surface defects of unequal-thickness steel blank, the structured light active vision method and Gaussian data fitting technology were used for the experiment research of the seam surface defects detection. Firstly, the laser strip center line in sub-pixel accuracy was extracted by Gaussian fitting. Secondly, the seam endpoint positions were obtained by line fitting and computing point of intersections of three lines. Thirdly, the computing methods of the surface defects of the laser welding seam, such as concavity, convexity, were put forward. The experiment result shows that the proposed method is based on structured light vision and data fitting is suit for laser welding seam detection of unequal-thickness steel blanks.

Key words: image processing; seam surface detection; structured light vision; Gaussian fitting

引 言

激光焊接具有焊接速度快、焊缝强度高和焊缝美观等明显优势,但在焊接过程中,焊缝质量也会因激光功率、光束特性、离焦量、辅助吹气和焊接速度等参量的波动受到影响。质量合格的焊缝是保证焊件后续再加工顺利进行的基础。有质量缺陷的焊缝将导致诸多问题,如在汽车行业,激光拼焊板的焊缝表面缺陷会影响到汽车的美观性和耐用性;而在钢铁行业带钢轧制过程中,焊缝凸度缺陷将直接影响到轧辊的使用寿命,焊缝凹度缺陷更会导致带钢断带迫使生产中断。因此,研究激光焊接焊缝质量表面缺陷检测技术就显得非常重要。

激光焊接质量检测方法主要有 3 种:通过无损检测手段检测焊后焊缝应力集中、内部气孔等缺陷;监测

激光焊接过程中接出现的各种光电磁信号^[1-2]、熔池和小孔形态^[3-5],评估焊缝质量;通过视觉方法对焊后焊缝表面缺陷进行检测^[6-8]。无损检测法由于实时性较差难以做到激光焊接在线检测。激光焊接过程中光电信号和焊接质量之间是非线性关系,小孔和熔池形态复杂多变,检测难度也很大。通过视觉方法检测焊后焊缝表面特征,可以直接检测出焊缝表面的凹度、凸度和表面气孔等缺陷,具有快速性、实时性、检测精度高^[9]等明显优势,明显优于其它方法^[9]。

1 结构光主动视觉检测数学模型及标定

结构光视觉检测系统主要由线激光器和 CCD 相机构成。线激光器打出的光平面投射到焊缝表面被调制形成激光条纹。通过 CCD 采集变形激光条纹的图像并调用相应的图像处理算法,分析焊缝表面特征,对焊缝的焊接质量做出判定,结构光视觉检测原理如图 1 所示。为了避免背景及激光焊接强光的干扰,在摄像机镜头前安装一个滤光片,滤掉无用信息。

作者简介:高世一(1973-),男,博士后,主要研究方向为激光焊接计算机视觉检测。

E-mail:shiyigao@gmail.com

收稿日期:2010-12-03;收到修改稿日期:2011-02-25

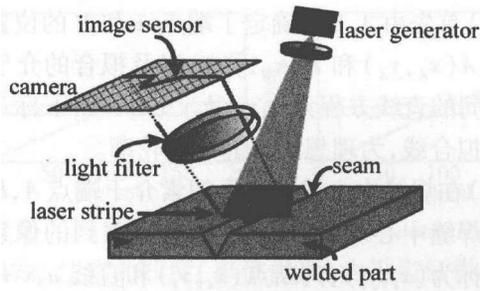


Fig. 1 Elementary diagram of seam detection by means of structured light vision
为完成焊缝质量检测任务,需要先建立基于透视投影变换的结构光视觉检测模型,如图 2 所示,其中,

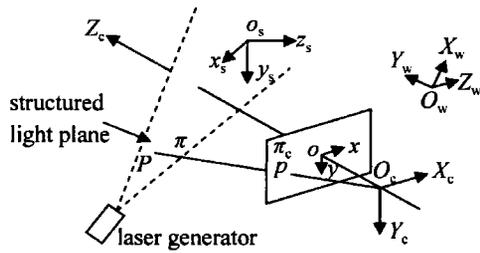


Fig. 2 Mathematical model of structured light vision detection

$O_c-X_c-Y_c-Z_c$ 为摄像机坐标系, $O_u-x_u-y_u$ 为成像平面坐标系, $O_s-x_s-y_s-z_s$ 为测量坐标系, 测量坐标系的 $x_s-o_s-y_s$ 平面定义在结构光平面 π 上。 $O_w-X_w-Y_w-Z_w$ 为世界坐标系。在世界坐标系下, 结构光平面 π 的方程为:

$$aX_w + bY_w + cZ_w + d = 0 \quad (1)$$

式中, a, b, c, d 为结构光平面方程系数。

根据摄像机针孔成像原理及透视投影变换原理, 摄像机的透视投影成像模型可描述为:

$$\rho \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, (x_u, y_u) 为成像平面坐标系中的坐标, (1) 式和 (2) 式分别描述了光平面和成像平面对应点映射关系, 构成了结构光视觉检测系统完整的数学模型。

结构光视觉模型各参量在检测之前需要事先标定。标定分两步实现: 一是摄像机成像模型标定确定参量 a_x, a_y, u_0, v_0, R 和 T , 至少需要 6 个非共面的 3 维世界点及其对应的 2 维像点; 二是结构光平面方程的标定确定参量 a, b, c 和 d , 至少需要 3 个非共线的 3 维世界点。为了提高标定精度, 需要获得大样本的高精度标定点。本文中相机标定采用基于平面标靶的标定方法^[10], 结构光平面标定采用基于交比不变性进行标定^[11]。

2 激光条纹中心线提取

精确提取激光条纹的中心线是结构光视觉检测图像处理关键的一步。激光条纹中心线提取的精度将直

接影响到视觉测量的最终精度。这里给出了基于高斯拟合的提取激光条纹中心的算法, 提取精度达到亚像素级, 算法分 5 个步骤, 如下所述。

(1) 求激光条纹极大值图像 f_b

设图像函数为 $f(m, n)$, 其中 m, n 分别为图像的行和列, $f(m, n)$ 为图像像素在 (m, n) 处的灰度值。按条纹法线方向逐列搜索灰度极大值 f_{max} , 以 f_{max} 为阈值对焊缝图像二值化处理, 得图像 f_b 。

(2) 去除图像 f_b 伪极大值

由于噪声原因, 图像 f_b 可能存在伪极大值, 表现为孤立点或以对角线形式依附在最大值中心线上, 采用两个 3×3 模板在图像上按行移动去除, 模板定义见图 3。当图像像素和图 3a 模板元素对应且符合 $(m_{12} - 1)^2 + (m_{21} - 1)^2 + (m_{23} - 1)^2 + (m_{32} - 1)^2 = 0$ 时, 判断中心点为孤立像素点, 置该点像素值为 1。

a	1	m_{12}	1
	m_{21}	0	m_{23}
	1	m_{32}	1
b	m_{11}	1	m_{13}
	1	0	1
	m_{31}	1	m_{33}

Fig. 3 Mask of removing false maximum

当图像像素和图 3b 模板元素对应且符合 $(m_{11} - 1)^2 + (m_{31} - 1)^2 + (m_{13} - 1)^2 + (m_{33} - 1)^2 = 1$ 时, 判断该中心点为对角线上的伪极大点, 将该点像素值置 1。通过以上处理得到的图像设为 f_c 。

(3) 边缘取中提取条纹近似中心

提取图像 f_c 第 $j(j=1, 2, 3, \dots, n)$ 列两个边缘所在的行为 x, y , 把位置 $((x+y)/2, j)$ 作为条纹近似中心, 该点像素灰度值赋值为 0, 该点所在列其它像素灰度值赋值为 1, 得到单像素中心线图像 f_d 。

(4) 确定各列条纹宽度

激光条纹和背景的灰度值差别较为明显, 采用二值化分离条纹和背景得图像 f_e , gray 为图像 2 倍背景灰度值。

$$f(m, n) = \begin{cases} 0, & (f(m, n) \geq \text{gray}) \\ 1, & (f(m, n) < \text{gray}) \end{cases} \quad (4)$$

提取图像 f_e 各列的两个边缘位置记为 $f(t, j)$ 和 $f(d, j), j=1, 2, \dots, n$ 。 $|d-t|$ 为条纹 j 列的宽度, 条纹各列宽度记为行向量 S , 向量 S 的第 j 列元素对应图像 f_e 第 j 列的条纹宽度。

(5) 高斯拟合求取条纹中心亚像素坐标

对于条纹图像的 j 列元素, 以 $[i-s/2 \dots i+s/2]$ 行为 X 向量, 以 $[(i-s/2, j) \dots (i+s/2, j)]$ 的灰度值为 Y 向量, i 为图像 f_d 单像素中心线 j 列对应的行位置, s 为向量 S 第 j 列对应的元素, 表示激光条纹 j 列位置对应

的激光条纹宽度值,采用高斯拟合曲线求解方程组确定条纹中心亚像素位置 (x_i, j) 。

3 焊缝表面缺陷图像识别

3.1 焊缝端点位置识别

提取出激光条纹的中心线,且需要在中心线上识别出焊缝的端点位置。焊缝端点位置是焊缝轮廓上极为重要的特征点,是计算焊缝缺陷的基础。作者根据激光条纹的特征,针对不等厚板焊接,提出采用高斯拟合直线精确获取焊缝端点位置,具体步骤如下:首先在实际焊接前,通过实际测量计算出焊缝间隙的理论值,并记为 l ,示教和标定使成像平面坐标系原点始终对准焊缝中心,此时近似认为焊缝的中心和焊缝中心线图像的中心 o_p 重合。然后以 $o_p - l/2$ 和 $o_p + l/2$ 为列,把焊缝中心线图像划分为3个区域,即 $[0, o_p - l/2]$, $[o_p - l/2, o_p + l/2]$ 和 $[o_p + l/2, n]$, n 的含义同前。在各自区域内,把焊缝中心线各点位置坐标作为拟合的数据源直线拟合分别得到直线1、直线2和直线3,如图4所示。计算直线1和直线3的交点 A 及直线2和直线3的交点 B 所在位置,即为焊缝端点的精确位置。

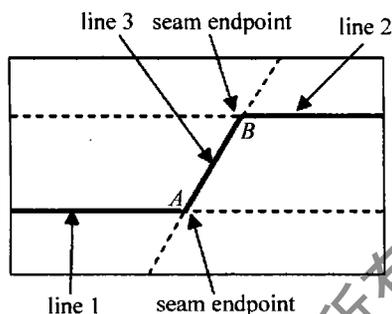


Fig. 4 Precise seam endpoint position acquisition by data fitting method

3.2 焊接缺陷-凹凸度计算

以不等厚钢板为例,计算焊缝凹凸度实质上就是计算焊缝截面轮廓上介于 A 和 B 之间的点到图4中直线3的距离的最大值,正值为凸度,负值为凹度。具体计算如下。

(1)首先由3.1节确定了端点 A 和 B 的位置坐标分别为 $A(x_A, y_A)$ 和 $B(x_B, y_B)$,以及拟合的介于端点 A, B 之间的直线方程为 $a_3x + b_3y + c_3 = 0$,下标3表示第3条拟合线,为理想的焊缝端面轮廓。

(2)在焊缝中心线图像上搜索介于端点 A, B 之间的所有焊缝中心线的像素点,记录搜索到的像素点的位置坐标为 (x_i, y_i) ,判断点 (x_i, y_i) 和直线 $a_3x + b_3y + c_3 = 0$ 的位置关系,如果点 (x_i, y_i) 位于该直线上方,利用(5)式求点到该直线的距离并记为正,计入数组 $d_+(i)$;如果点 (x_i, y_i) 位于该直线下方,利用(5)式求点到该直线的距离并记为负,计入数组 $d_-(i)$ 。

$$d(i) = \frac{x_i a_3 + y_i b_3 + c_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}} \quad (5)$$

(3)在数组 $d_+(i)$ 和 $d_-(i)$ 中搜索极大值,见(6)式和(7)式,即为以像素为单位的凹度和凸度,在应用中应转化为工件坐标系下的具有实际单位的数值:

$$\text{convexity} = \max(d_+(i)) \quad (6)$$

$$\text{concavity} = \max(d_-(i)) \quad (7)$$

4 试验

图5为带钢焊缝,来自带钢轧制生产线,焊缝长



Fig. 5 Unequal-thickness steel seam

1.25m,板材厚度分别为2mm和2.26mm,为不等厚板焊接,焊接平均速率为8.3m/min,激光功率为8kW。图6是采用结构光视觉检测系统采集到的4帧焊后焊缝结构光图像。图7是采用第2节中的算法对图6图像处理后得到的激光条纹的中心线图像。图8是采用第3.1节中的直线拟合法计算出的焊缝精确端点位置。

对图5的不等厚板,连续取18帧结构光图像,根据前述步骤及(6)式和(7)式计算焊缝不同位置处的凹度和凸度,从18帧结构光图像中计算出的均为凹度,凸度为0。以连续取到的各帧结构光图像的序号为横

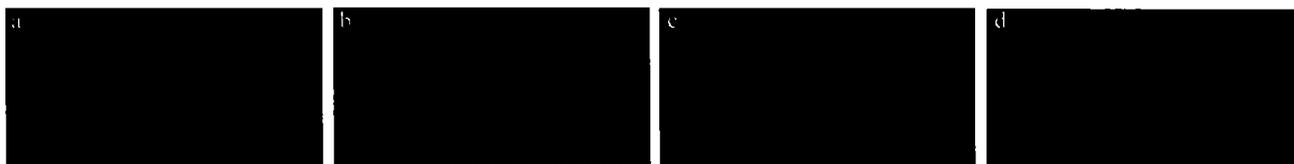


Fig. 6 Seam image captured by structured light

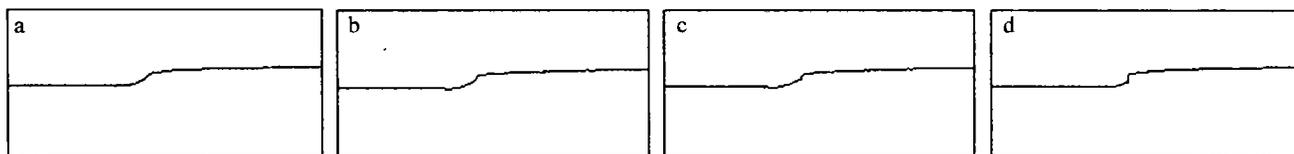


Fig. 7 Unequal-thickness steel seam strip center line of structured light

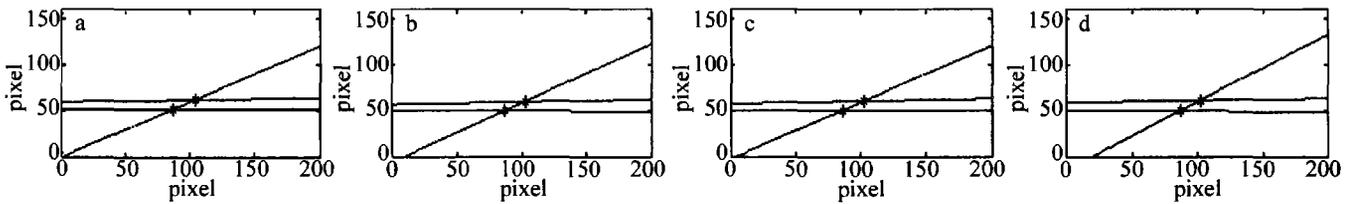


Fig. 8 Precise seam endpoint position figure acquired by data fitting method

坐标,以该位置的凹度(单位像素)为纵坐标得到图9。从图9可知,如果以两个像素单位为判断该处凹度是否合格的阈值,则焊缝在图像第7帧、8帧、9帧及第18帧处的位置凹度指标不合格。

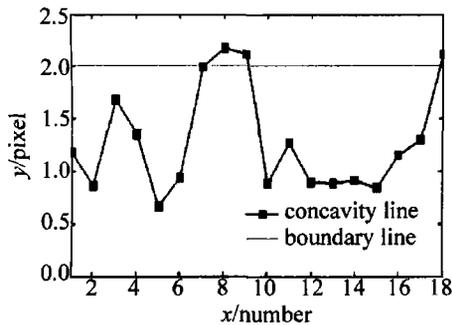


Fig. 9 Seam concavity

焊缝端面直线拟合的优劣可以用误差的平方和与均方差的比值来衡量,若误差平方和与均方差的比值越小,则说明实际观察值和估计值越接近,直线拟合度越好。假设实际测量值为 Y , 其均值为 Y_1 , 根据直线拟合

求得理论值为 Y_2 , 则得其误差平方和为 $\sum_{i=1}^n (Y - Y_2)^2$,

均方差为 $\sum_{i=1}^n (Y - Y_1)^2$, 相关指数 R^2 计算如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y - Y_2)^2}{\sum (Y - Y_1)^2} \quad (8)$$

图10为焊缝截面直线拟合的相关指数图,相关指数描述了焊缝截面直线拟合的好坏,这里设定0.9为拟合优劣的分界线,低于0.9为直线拟合较差。如图所示,第7帧、8帧、9帧和第18帧图的相关指数均低于0.9,表示截面数据变化较大,拟合较差,为焊缝端面轮廓起伏较大所致,也可理解为凹度凸度变化较大,焊接质量不稳定。对比图9和图10发现,在焊缝截面拟合较差的地方,焊缝的凹度值都非常大,二者有着明显的对应关系。

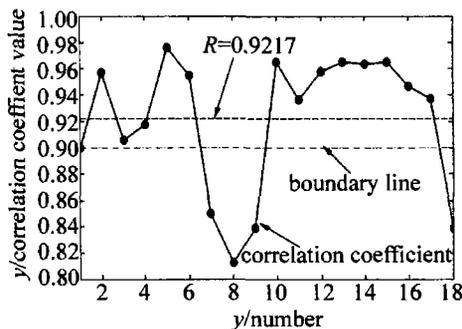


Fig. 10 Correlation coefficient and mean values of seam section by straights fitting

5 结论

基于结构光的主动视觉检测是伴随着计算机技术和光电技术的飞速发展而出现的一种新的检测技术,它具有非接触性、检测精度高、实时性好等特点,在激光焊接质量检测中具有广泛的应用前景。作者以不等厚板激光焊接焊缝为被检测对象,研究了通过结构光主动视觉检测可以获得焊缝表面形貌及一些焊缝表面缺陷,为判断激光焊接质量是否合格提供了判断依据。

参考文献

- [1] LI L, BROOKFIELD D J, STEEN W M. Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process [J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(4): 615-626.
- [2] GU H, DULEY W W. A gap-detection technique for laser beam butt welding [C]//Laser Materials Processing Conference. Dearborn, USA: Laser Institute of America, 2000: E11-E16.
- [3] CHEN W Zh, JIA L, ZHANG X D, et al. Coaxial vision sensing system and detection of penetration status in CO₂ laser welding [J]. Applied Laser, 2004, 24(3): 130-134 (in Chinese).
- [4] ZHANG X D, CHEN W Zh, LIU Ch, et al. Coaxial monitoring and penetration control in CO₂ laser welding (I)——Penetration status characteristics and coaxial monitoring [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 25-28 (in Chinese).
- [5] ZHENG Q G, GU J H, WANG T. Investigation on melting pool behavior and defects of laser welding [J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 90-94 (in Chinese).
- [6] GAO Sh Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Dual-beam structured light vision system for 3-D coordinates measurement [C]//Intelligent Control and Automation 7th World Congress. Chongqing, China: IEEE, 2008: 3687-3691.
- [7] ZHANG G J, TIAN X. Structured light 3-d vision and its industry application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(6): 650-654 (in Chinese).
- [8] ZHANG L. Research on robotic laser welding inspection based on machine vision [D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2008: 80-90 (in Chinese).
- [9] GAO Sh Y, WU R M, CHEN W D. The developing state about the of the technologies of laser welding process and the welded seam detection [J]. World Iron & Steel, 2010, 10(3): 51-54 (in Chinese).
- [10] ZHANG Zh Y, MEMBER S. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [11] WEI Zh Zh, ZHANG G J, XU Y. Calibration approach for structured-lighted-stripe vision sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 210-214 (in Chinese).