

激光拼焊焊缝跟踪系统视觉检测方法的研究

The Research about Visual Inspection Method of Laser Welding Seam Tracking System

(1.中国科学院沈阳自动化研究所;2.中国科学院研究生院) 康永军^{1,2} 姜春英¹ 罗焕佐¹ 邹媛媛¹
KANG Yong-jun JIANG Chun-ying LUO Huan-zuo ZOU Yuan-yuan

摘要: 激光焊接作为一种新的焊接技术,其对焊缝跟踪提出很高的精度要求。本文针对焊缝跟踪系统中视觉检测单元的精度进行了深入分析,分别对跟踪系统视觉单元精度的定义,视觉检测精度控制的原理,图像的采集以及图像处理的方法做了研究,并提出了一种精确的直线焊缝跟踪视觉检测方法。

关键词: 激光焊接;图像处理;结构光测量;精度控制;边缘检测

中图分类号: TP302

文献标识码: A

Abstract: As a new welding technology, Laser welding requires a higher precision seam tracking system. In this paper, an in-depth analysis about the accuracy of the visual inspection unit of seam tracking system is conducted. Also, the definition of the accuracy of the visual tracking system, the principle precision control of visual inspection units, the image acquisition and image processing methods are studied respectively, and a precise visual detection method for seam tracking is presented.

Key words: Laser welding; image processing; structured light measurement; precision control; edge detection

1 引言

在激光焊接过程中,由于工件的加工误差(工件间的尺寸的差异、坡口的准备情况等)、定位夹紧精度以及焊接时的热变形等因素的存在,以示教-再现方式工作的焊接机器人在焊接时常常因为焊缝和示教轨迹有偏差而导致焊接质量下降。而焊缝跟踪系统可解决这个问题。焊缝跟踪系统可实时检测出焊缝的偏差,调整焊接路径与焊接参数,保证焊接质量的可靠性。

当前在焊缝跟踪系统中,广泛采用的焊缝位置检测方法是基于三角测量原理的主动视觉方法,其在焊缝跟踪中的应用原理如图1:

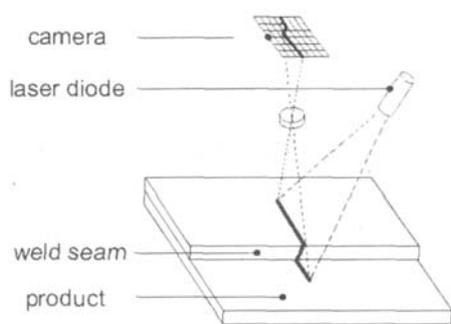


图1 结构光基本原理

激光投射器将一定模式的结构光投射于焊接板材表面,相机接收由板材反射的结构光。图像中光纹的形态取决于光学投射器与摄像机之间的相对位置和物体表面轮廓(高度)。直观上,沿光条显示出的位移(或偏移)与物体的高度成比例,图像中光纹的转折表示了板材平面高度的变化,不连续显示了板材间的物理间隙。当光学投射器与摄像机之间的相对位置一定时,由图像中的二维光纹图像坐标便可重现物体表面的三维轮廓。

康永军: 硕士研究生

本文中的焊缝跟踪系统的视觉检测单元即由激光器投射器、CMOS相机、PC机组成。激光器投射一字线型结构光,相机采集板材反射的结构光图像,PC机进行图像处理,获取焊缝位置。跟踪系统为直线焊缝跟踪系统,本系统的检测任务即通过结构光纹确定焊缝跟踪点。

跟踪系统视觉检测单元的精度要求为0.03mm,系统中相机的分辨率为10um,计算,即视觉检测的精度要达到三个像素以内,因此,需要对焊缝位置的结构光纹的特征做具体分析。

2 拼焊焊缝跟踪系统的跟踪控制原理

2.1 拼焊焊缝跟踪系统的视觉检测精度定义

跟踪系统检测单元的精度定义如下: 设视觉检测系统与焊缝位于同一个坐标系,跟踪系统沿焊缝共检测了 n 个点,设焊缝的实际物理坐标为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,并设从第二个点开始与第一个点的差为 $dx_1 = x_2 - x_1, dx_2 = x_3 - x_2, \dots, dx_{n-1} = x_n - x_{n-1}$ 。设跟踪系统检测的坐标值为 (y_1, y_2, \dots, y_n) ,并设检测值从第二个点开始与第一个点的差 $dy_1 = y_2 - y_1, dy_2 = y_3 - y_2, \dots, dy_{n-1} = y_n - y_{n-1}$ 。视觉检测的精度为0.03,指的是 $dy_1 - dx_1 < 0.03mm, dy_2 - dx_2 < 0.03mm, \dots, dy_{n-1} - dx_{n-1} < 0.03mm$,即在全部的 n 个点中, dy_i 与 dx_i 的差小于0.03;而 x_i 与 y_i 可以通过在跟踪之前标定使其相等。

2.2 拼焊焊缝跟踪系统的跟踪控制原理

激光焊接中,板材焊接边缘都有一定的几何剖面。板材边缘剖面形状对视觉检测精度的影响很大:同样的结构光,同样的板材,在剖面形状不同的情况下,其得到的结构光图像是不同的,实验中,这种影响有时甚至可以达到3个像素以上。

图2显示了一种板材被剪切后上料边缘的剖面,图中,从上至下依次为:圆角带,光亮带,撕裂带,毛刺四部分。

其中,圆角带对图像的影响最大。激光焊板中,板材边缘一般都有这样的剖面,区别在于圆角带的弯曲度与光亮带的坡度的大小。有的圆角带弯曲度过小,因而近似于直角。由于对于某

一批焊接板材,其边缘特性具有一致性,即圆角带的角度基本上相等,光亮带的坡度也基本相同,虽然在装配中,定位夹紧会对被焊边缘有一定影响,但仅限于对撕裂带和毛刺有影响,对圆角带以及板材的直线度影响并不大,基本上可以忽略,因此可以在后续的处理中利用这种特性。

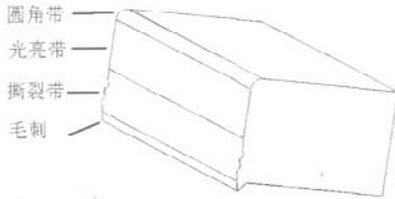


图2 板材边缘切面

板材边缘形状的一致性对于焊缝跟踪系统的视觉检测至为重要,这使得可以用一种简便可行的方法达到跟踪系统检测单元所要求的0.03mm的精度。因为对于边缘形状一致的板材,用合适稳定的结构光投射,可以获取误差一致的图像,通过明确的已标定精度的图像处理方法,就可以得到误差一致的焊缝位置,从而可以精确地拟合焊缝轨迹,实现跟踪控制。

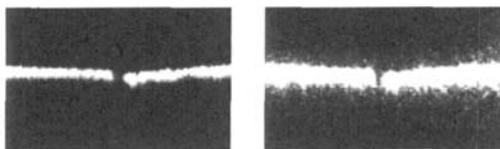
3 影响拼板图像质量的因素分析

在跟踪系统的视觉检测中,图像的质量非常重要。高质量的图像能清晰准确地反应板材边缘的特征,是精确获取焊缝轨迹的基础。而质量差的图像,会对图像处理的算法提出很高的要求,而且精度也很难保证。目前成熟的图像处理算法可以达到亚像素级的精度,因此,检测的瓶颈在于图像的质量。

这里分别讨论三个影响结构光灰度特征的因素:结构光光强、板材表面随机的凸凹度以及板材边缘的圆角带的弯曲。以下的讨论中均假定曝光时间固定。

3.1 结构光光强的影响

随着结构光光强的增加,结构光光纹变宽,且在板材边缘处,光纹长度在延伸。如图3为同一焊缝位置且不同光强下的图像,a图光强较b图弱,因此a图光纹比b图细,且焊缝比b图宽。实验中,当光强在一定的范围时,光强的变化对图像中结构光纹的影响并不大,变化仅在2个像素左右。所以,焊缝跟踪过程中,进入相机的结构光光强应保持在一定的范围内并且稳定。



a 弱光强下的结构光图像 b 强光强下的结构光图像

图3 不同光强下的结构光图

3.2 板材表面随机凸凹度的影响

板材表面有一定的随机凸凹度,但并不是理想的漫反射,因此,其对结构光的反射并不均匀。结构光源均匀投射到板材,但当光强较弱时,但图像中的结构光纹断断续续。板材表面的这种不均匀性,对结构光纹有较大影响,尤其在需要精确定位的板材边缘,这种影响更大。结构光光强比较弱时,这种不均匀性在图像中非常明显。但当光强增强时,这种不均匀性可以得到抑制。

3.3 板材边缘圆角带的影响

图4中,结构光在板材边缘呈弯曲且灰度逐渐降低的特征。这种特征是由于板材边缘圆角带具有一定的弯曲度产生的。板

材平面与边缘的圆角带的镜面反射方向不同,结构光垂直照射时,板材平面比较亮,但圆角带由于反射角度逐渐偏离镜头,并且形状逐渐向下弯曲,因此其灰度逐渐降低。

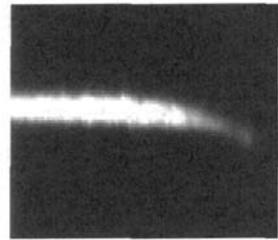


图4 焊缝边缘圆角带的结构光纹图像

当结构光光强较弱时,图像中圆角带部分灰度特征是平滑变化,甚有部分圆角带没有光线进入相机,因此没有明显的特征可以确定焊缝边缘,甚至不能确定边缘,加之此时圆角带表面随机凹凸的影响,使这种图像很难反应板材边缘特征。当光强增强到一定程度时,此时圆角带有足够的光线反射入相机,且由于光强足够大,板材平面与焊缝边缘凹凸引起的灰度不均也被抑制,从而可以在图像中形成清晰稳定的灰度梯度。但同时也需要考虑到,如果结构光光强太大,会导致结构光光纹过粗,且在板材被焊边缘光纹端点形状多变,且有多余毛刺,这将增加图像处理的复杂性,影响图像处理精度。

根据以上讨论,要获取准确清晰的板材边缘特征,合理的光源并选择合理的光强参数至关重要,即结构光光强能够使板材被焊边缘圆角带有足够的光强和明显的梯度,但不至于使整条光线条纹过粗且产生毛刺。由于板材边缘的几何形态一致,加之选择合适的光强,能够在图像采集的级别上,使视觉检测的误差在2个像素以内。

4 拼板焊缝的图像处理

图5为一幅典型的结构光图,设图像的坐标系为x轴水平向右,y轴垂直向上。图像处理的目的,是为了提取图中左右两条纹在焊缝位置的准确边界点,如图中的A点、B点,进而计算准确的焊缝位置。

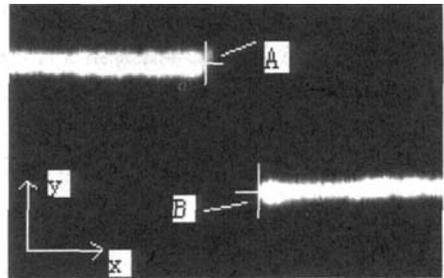


图5 结构光图像

图像处理步骤如下:

Step1 首先获取结构光纹中大致轮廓,进行开窗处理,将其作为感兴趣区域。

该步骤主要为了解决图中可能的一些杂斑干扰,以及减小后续图像处理的幅面,降低后续的处理时间。处理方法为:

- 复制原图;
- 对复制的图进行二值化处理;
- 对二值化处理过的图像,从左至右,从上至下,搜索和记录大于阈值的区域的轮廓与面积;
- 根据区域面积的大小去除杂斑,提取结构光纹轮廓(因为杂斑在面积比结构光条纹小很多),将其作为下一步处理的感兴趣区域;

Step2 根据 step1 中结构光纹的轮廓的坐标,在原图中提取条纹的中心线。

处理方法为:在条纹轮廓内,从左向右,按列从上到下搜索轮廓内灰度最大值的点,如果仅有唯一点,则将该点的 y 坐标作为条纹在该列的中心线 y 坐标,如果有多个点,则将这些点 y 坐标的平均值作为条纹在该列中心线 y 坐标。

Step3 根据 step2 中所提取的中心线,寻找焊缝位置大致位置,并将焊缝位置附近的区域作为新的感兴趣区域。

寻找焊缝位置的处理方法为:从左至右搜索,若遇条纹间断且间断大于预定的像素个数,则认为此间断为焊缝大致位置,把间断中心作为焊缝中心,并将该间断所在的小区域作为新的感兴趣区域,该区域应包含结构光纹在焊缝位置的两个端点。

Step4 根据 step3 中的感兴趣区域的范围,在原图用 canny 算子提取左右两条结构光纹的边缘,并把两条纹焊缝中心最近的边缘点的 x 坐标作为所寻找的端点的 x 坐标。

这里选择只对焊缝位置的局部区域用 canny 算子进行处理,因为在大范围内用 canny 算子会导致 canny 算子参数选择困难,以及运算时间过长,而局部用 canny 算子,可以在小范围内用严格的阈值获取准确的边缘,同时可以去除因光强太强而在图像中产生的毛刺的影响。

Step5 根据 step4 已经确定的左右两条结构光纹 x 坐标的范围,对 step2 中的结构光的中心线补全。

因为在 step2 中,结构光纹的轮廓可能并没有包含由 canny 算子所确定的边缘。

Step6 根据条纹中心线以及已找到的左右两条纹的端点的 x 坐标,计算左右条纹端点的 y 坐标。

处理方法为:分别对左右两条纹中心线拟合直线,将端点的 x 坐标带入各自的直线方程,分别计算出左右两条纹的 y 坐标,即得到特征点 $A(x,y)$ 与 $B(x,y)$ 。

Step7 在预定的多种跟踪点的选取方法中选择某一种方法计算跟踪点,如 A 、 B 的中点。

5 小结

跟踪系统中,精度是最关键的指标,如果系统不能满足精度,那整个跟踪系统就失去意义了。影响跟踪系统视觉检测精度的主要因素是图像的质量,通过合理选择光强,能够使图像有清晰稳定的特征。此外,由于板材边缘有很好的的一致性,用一定的光源,一定的图像处理方法,就可以获取误差一致的跟踪点,从而使精确重现焊缝轨迹成为可能。

本文创新点:准确定义了焊缝跟踪精度的概念,并指出能够实现焊缝跟踪检测系统高精度的关键因素,这为焊缝跟踪系统的后续工作指出了方向。在此基础上,指出图像质量对精度的重要影响,并提出图像采集的原则,设计了一种新的有效的焊缝检测图像处理的算法。

参考文献

- [1]Sicard et al., Joint Recognition and Tracking for Robotic,1989, IEEE, pp. 7174-7728.*
- [2]Kusachi et al., Tracking a Feature Point in Profile Sata Using an Articulated Object Model and Tuning Parameters Using the Genetic Algorithm, 1999, IEEE, pp. 145-150.*
- [3]Canny, J.F.: "A computational approach to edge detection"; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8 (6), pp. 679-698, 1986.
- [4]Hong-Ping Gu, W W Duley. A gap-detection technique for

laser beam butt welding.In: Section E-I CALEO 2000,2000:11-16 [5]Huang Nan, MG Abbott and RJ Beattie. Man et al., Approaches to Low Level Image Processgin for VisionGuided Seam Tracking system, 1988, IEEE, pp.601-603.*

[6]刘文军,罗玉峰,李佩武.基于 HHARM9 的机器人焊缝跟踪系统. 微计算机信息. 2007

作者简介:康永军,男,1983年10月生,汉族,中国科学院沈阳自动化研究所硕士研究生。研究方向:控制理论与控制工程。

Biography:KANG Yong-jun, Male, 1983, the Han nationality, graduate student of Shenyang Institute of Automation. Major in Control Theory and Control Engineering.

(110016 沈阳 中国科学院沈阳自动化研究所) 康永军 姜春英 罗焕佐 邹媛媛

(100049 北京 中国科学院研究生院) 康永军

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China) KANG Yong -jun JIANG Chun-ying LUO Huan-zuo ZOU Yuan-yuan

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China) KANG Yong-jun

通讯地址:(110016 沈阳市东陵区南塔街 114 号中科院沈阳自动化研究所第七研究室) 康永军

(收稿日期:2009.05.06)(修稿日期:2009.08.06)

(上接第 114 页)

参考文献

- [1]王立新,刘彤宇. SSDA 图像匹配算法的研究与实现[J]. 光电技术应用,2005,20(3):53-55
- [2]Tomas M, Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray / Triangle Intersection[J]. <http://www.acm.org/jgt/paoers/mollertrumbore>.
- [3]刘国林. 非线性最小二乘与测量平差[M]. 测绘出版社,2002
- [4]张剑清,潘励等. 摄影测量学[M]. 武汉大学出版社,2003
- [5]Schenk, T., Csatho, B., "Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a More Complete Surface Description". IAPRS, 2002 vol. XXXIII, pp. 310-317, Graz, Austria.
- [6]苏国中,郑顺义. OpenGL 模拟摄影测量方法研究[J]. 中国图像图形学报,2006,11(4):540-544
- [7]孙亦博,耿国华. 多视角三维人脸识别中的特征提取[J]. 微计算机信息,2007,7-1:277-278

作者简介:米晓峰(1983-),男,湖南,中国科学院研究生院研究生,硕士,主要从事数字图像处理、LiDAR 数据处理方面的研究;李传荣,男,北京,研究员,研究方向为遥感、LiDAR 数据处理等。

Biography:MI Xiao-feng (1983 -), male, Hunan, student of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, master, study on digital image process and LiDAR data process.

(100039 北京 中国科学院研究生院) 米晓峰

(100190 北京 中国科学院光电研究院) 米晓峰 李传荣 苏国中 黎荆梅

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China) MI Xiao-feng

(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China) MI Xiao-feng LI Chuan-rong

SU Guo-zhong LI Jing-mei

通讯地址:(100191 北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 307 室) 米晓峰

(收稿日期:2009.04.13)(修稿日期:2009.07.13)