

# 一种快速获取激光拼焊焊缝错配的新算法

张 雷<sup>1,2</sup>, 赵明扬<sup>1</sup>, 康永军<sup>1,2</sup>, 邹媛媛<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

2 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘 要:** 本文讨论了基于视觉和结构光的焊缝形貌视觉检测系统的组成原理, 针对拼板激光焊接工程中对焊缝检测的实时性要求高的特点, 创新性地提出了一种快速获得焊缝错配缺陷的算法, 主要步骤为: 首先基于有关标准的检测指标阈值的设定, 再次, 针对在线提取到的图像进行预处理, 主要是加窗和中值滤波; 最后为 Radon 变换与错配检测。该算法能减少计算任务, 从而快速获得错配检测指标。实验给出了不等厚板拼焊时的线性错配的数值和分布, 同时验证了该算法的有效性。

**关键词:** Radon 变换; 图像处理; 质量检测

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520 6040

## Novel algorithm of fast extrication for mismatch in tailored welded blanks

Zhang Lei<sup>1,2</sup>, Zhao Mingyang<sup>1</sup>, Kang Yongjun<sup>1,2</sup>, Zou Yuanyuan<sup>1,2</sup>

(1 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

**Abstract** The basic principles of visual inspection and laser triangulation measurement used in Tailored Welded Blanks (TWB) are summarized in this paper. Furthermore, this paper proposes a novel algorithm of fast extrication for mismatch welding defect based on the Radon transform in order to meet real-time demands in TWB. The algorithm includes image pre-processing, Radon transform and mismatch inspection. It also drastically reduces the computing task and implements high-accuracy mismatch extraction with high speed. Experimental results are shown and the validity of the proposed algorithm has been proved.

**Key words** radon transform; quality inspection; image processing

## 1 引 言

激光焊接质量检测技术从 20 世纪 80 年代起便是国内外学者研究的热门话题, 经过 20 多年的不懈努力, 取得了较大的进展, 已有不同的商用系统应用于实际生产。但是, 各种实验室系统或商用系统仍然存在对信号的理解尚不明晰、识别缺陷种类有限、判断产生缺陷原因的能力较差、普适性不强等不足, 仍然不能为激光焊接质量的实时检测提供可靠的解决方案, 这一课题依旧是各国学者研究的难点和热点。基于视觉对焊缝表面形貌的在线检测主要有 2 种方法: 一种是间接检测方法, Meng-Yen Li

等人对角焊缝焊接过程中的 IR 和蓝光 (450 nm 左右) 进行了检测与分析, 建立了两种光信号与熔化面积与焊缝形貌 (是否存在堆高或下凹) 的定量关系, 从而通过光信号去间接推断是否存在超出范围的堆高或下凹缺陷<sup>[1]</sup>; 另一种方法是通过 CCD 在焊接过程中同步对已焊区域进行测量, 瑞士 Soudronic 公司在其激光拼焊生产线上配备了这种检测系统, 该系统在焊缝正面和背面放置 2 台 CCD 采集焊缝图像, 通过图像分析来在线定量估算出堆高、下凹尺寸以及错边量和焊缝宽度<sup>[2]</sup>。

本文针对激光拼焊板的质量检测问题, 结合中科院沈阳自动化研究所自主研发的激光拼焊设备<sup>[3]</sup>工艺特点和焊接工件的实际情况, 创新性地提出一种基于视觉的

快速获取焊后工件错配缺陷的实时在线检测新算法。并在实验中得到了验证。

### 2 视觉检测系统构成及检测原理

视觉传感器采用三角测量原理, 主要由一字线形结构光源、滤光片 (透射波长 650 nm) 和 CMOS 相机 (北京微视的 mvc2000 型) 组成。系统的结构和测量原理如图 1 所示。激光光源照射到物体上某点, 该目标点的图像通过透镜汇聚到传感器上形成像点, 不同高度的像点在相屏上成像会发生一定量的偏移, 在基线长度已知、光源和传感器及透镜相对位置确定的前提下, 通过测量传感器上像点的位置就能准确确定被测物体与仪器之间的距离 [4-6]。

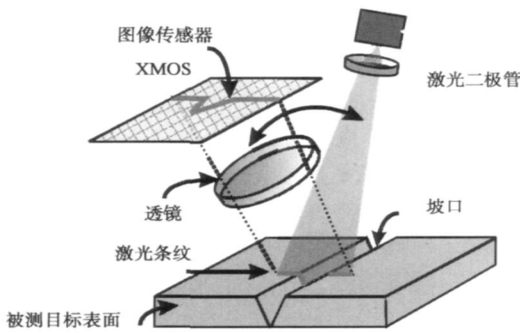


图 1 视觉检测原理 [5]

Fig 1 The principle of visual inspection

在工程应用中, 传感器装在激光焊炬后面, 其高度由相机内部参数、实际焊接温度和噪声影响来确定, 偏置距离则要综合考虑检测缺陷种类、检测算法选择、焊接 (检测) 速度, 以及实际焊接温度和噪声影响等多方面因素而确定。线性结构光发出的一条线形条纹由于板材的错配致使图像发生偏转。提取图像并处理, 得到条纹的错开数值即对应该处错配量的图像坐标距离, 通过标定便可获得错配的实际数值。

### 3 算法描述

#### 3.1 错配缺陷检测阈值的设定

激光拼焊的质量要求是非常严格的, 在 ISO13919-1 中详细而严格地规定了对于拼焊板的质量要求, 包括: D (一般)、C (中等)、B (严格) 三级。对于错配而言, 其指标含义如图 2 所示。B、C、D 级大小分别由以下公式确定:

$$B: h_{max} = \min(0.1t, 2\text{mm}) \quad (1)$$

$$C: h_{max} = \min(0.15t, 2\text{mm}) \quad (2)$$

$$D: h_{max} = \min(0.125t, 2\text{mm}) \quad (3)$$

式中:  $t$  为板厚, 单位为 mm。依据公式确定的阈值将作为检测该项指标的直接依据。超过该指标, 存在错配缺陷, 不超过时为该指标合格。

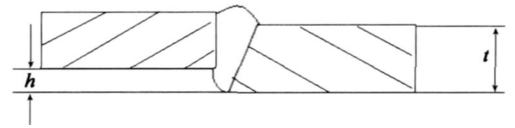


图 2 错配缺陷

Fig 2 The mismatch defect

#### 3.2 图像预处理

读取由传感器获得的原始图像, 工程中原始图像为 576 × 768 像素的 8 位灰度图像, 如图 3 所示, 由于存在着干扰、噪声以及板材表面镜面反射, 原始图像必须进行预处理, 除了通过添加滤光片等硬件措施外。实验中采用了 5 × 5 的中值滤波算子进行中值滤波, 如图 4 所示, 滤波后的图像与原图像相比, 明显去掉了相当的噪声干扰和结构光的镜面反射。为了进一步提高速度, 在预处理同时设置感兴趣区域, 在不影响特征提取和后期数据处理的情况下使进行处理的像素点数大大减少, 并去掉了相当的外围噪声干扰。加窗后图像为 120 × 120 (提取了图像的第 100 行至第 220 行, 第 110 列至第 230 列)。

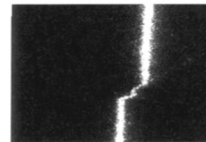


图 3 原始图像

Fig. 3 The original image

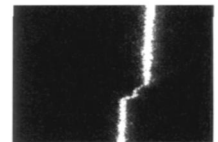


图 4 预处理图像

Fig. 4 Preprocessed image

#### 3.3 Radon 变换与错配检测

一个  $n$  维函数  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  在  $n-1$  维空间上的映射称为函数  $f$  在  $n-1$  维空间上的投影。当  $n$  等于 2 时, 平面上的函数  $f(x, y)$  在任意方向的直线  $Y$  上的投影定义为  $f$  沿方向  $Y$  的线积分 [7-8]。不失一般性, 投影可沿任意角度  $\theta$  进行, 通常  $f(x, y)$  的 Radon 变换是  $f(x, y)$  平行于  $y'$  轴的线积分, 公式为:

$$R_\theta(x') = \int f(x' \cos \theta - y' \sin \theta \times x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy'$$

$$\text{式中: } \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}.$$

本文提出的利用 Radon 变换在像坐标系中求取错配指标的算法分为两步:

1) 将图像在能出现矩阵峰值的方向上进行 Radon 变换; 即只在 0° 或者 90° 方向进行变换, 本文假定传感器处于理想安装位置, 采集到的结构光条纹走向水平或者竖

直 (对于传感器安装有倾角、结构光条纹倾斜或者两块板材放置不在一个平面内的情况将在后续的研究中讨论)。由于原始结构光条纹截面上的灰度成高斯分布,灰度值越大,表明该点越接近特征直线,因此,几乎所有高亮度的像素点 (焊缝上的点除外) 都分布在两条代表板材特征边缘的平行直线上。当在与这两条平行线垂直的直线上进行 Radon 变换时,会分别得到该两条直线上最高像素亮度点累加后的两个亮度极大值点 (如图 5 所示),即板材的特征边缘位置。

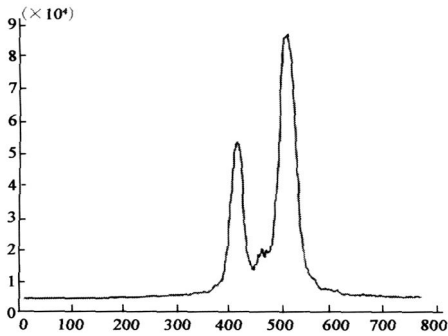


图 5 图像的 Radon 的变换  
Fig 5 The Radon transform

2) 将 Radon 变换后的图像分别在两个邻域内搜索极大值,并分别记下各自坐标值  $i$  和  $j$ ,则错配指标可用以下公式间接计算:

$$mismatch = abs(i - j) \tag{4}$$

图 5 中给出了两个极大值点的坐标位置,从而不需对原始图像进行一系列的滤波降噪、边缘检测、细化等繁琐费时的图像处理操作,却能更快地得到两条直线之间的图像距离 (单位为像素)。分别设定邻域搜索两个极大值的位置即可得到两条直线的位置。如图 6 和图 7 所示,搜索后得到的两个极大值像素坐标位置分别为 415 和 512 分别代表着原图像的第 415 列和 512 列,由式 (4) 可得  $mismatch$  为 97 个像素。图 8 显示了判断出的板材边缘在原图的位置。

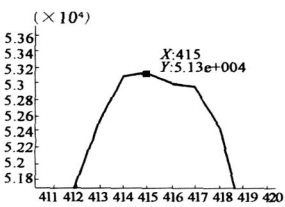


图 6 左极值点  
Fig. 6 The left maximum

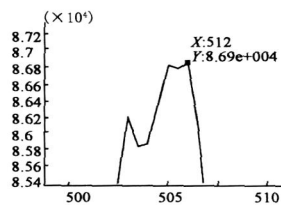


图 7 右极值点  
Fig. 7 The right maximum



图 8 检测边缘在原图中的位置  
Fig 8 The edge in the original image

对于传感器摄像机进行标定,可以得到单位像素代表的在实际坐标系下的实际距离  $k$ ,单位  $mm/pix$ ,并考虑实际结构光平面的入射角,从而可以计算出  $mismatch$  代表的实际距离。实际距离值减去两个不等厚板的板厚差,便可以获得此截面处的实际错配值。传感器以一定的帧率扫过整个焊缝后即可获得整个焊件的错配数值分布 (如图 9 所示)。检测错配值约在 0.2 mm 到 0.74 mm 之间 (图中数值包含板厚差 1 mm)。

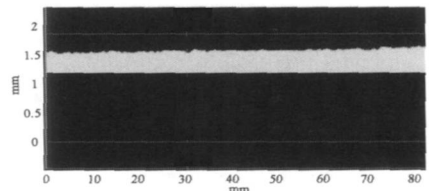


图 9 错配检测结果

Fig 9 The detection result of the mismatch defect

### 4 算法分析

检测精度主要是由相机最小分辨率、结构光条纹质量、滤光片光学特性、焊件表面反射特性、板材夹紧定位精度、板材表面平面度、两板材表面平行度、图像处理方法、标定方法和精度以及测量精度等因素决定的。与相关文献提出的算法相比,本算法在硬件设备不变的情况下,由硬件设备引起的误差不变;由于不需要对图像进行图像增强、锐化、边缘检测、细化、直线拟合等处理,大大避免了由于以上图像处理算法引起的算法误差和计算误差。如图 10 所示:在原图中提取第一个极大值所在的 415 列及周围的几列,比较可得较理想的列是 414 列,证明此算法的误差为一个像素 (好的 CMOS 相机分辨率可以达到 0.007 mm)。此误差主要是由滤波算法,板材镜面反射以及结构光垂直误差等因素引起的。算法运行时间约为 28 ms,能满足实时检测需要 (大约 30 帧/秒)。

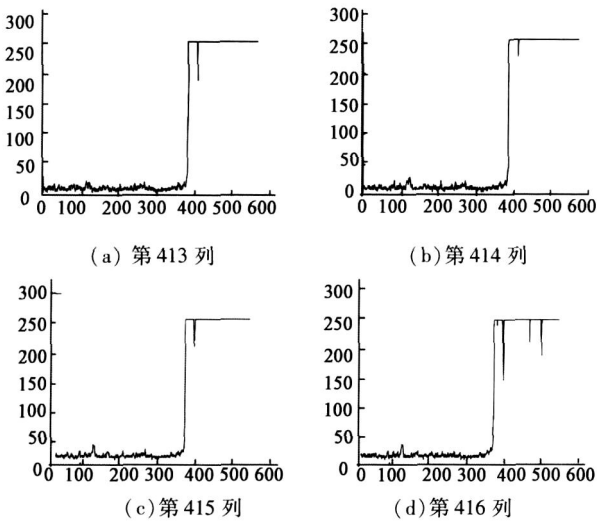


图 10 极大值列附近光强分布

Fig 10 The intensity near the maximum column

### 5 结 论

提出一种基于 Radon 变换的快速获取焊后工件错配缺陷的在线检测方法。实验得出了错配值大小, 检测精度为 0.014 mm, 可以满足相关标准。同时算法处理速度可以满足在线检测实时图像处理要求。研究表明, 该算法具有相当的鲁棒性。

### 参考文献

[ 1 ] MENG Y L, CHRISTOPHER W R. The correlation of laser weld plasma and its cross-sectional geometry [ J ]. Section E-ICALEO, 2000: 17-23.

[ 2 ] DAN EL W. On-line quality system assures highest production reliability of laser welded blanks [ J ]. In Section C-ICALEO, 1998: 198-207.

[ 3 ] ZHANG L, ZHAO M Y, ZOU Y Y. A creative design of robotic visual tracking system in tailed welded blanks based on TRIZ [ J ]. China Welding, 2006, 15 ( 4 ): 23-26.

[ 4 ] 林砺宗, 柯子力, 王刚. 激光非接触式彩管荫罩 Q 值测量机研制 [ J ]. 仪器仪表学报, 2006, 27 ( 8 ): 885-888.

LN L Z, KE Z L, WANG G. Development of a laser non-contact shadow mask Q factor measurement machine [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 ( 8 ): 885-888.

[ 5 ] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌 [ J ]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43 ( 1 ): 50-53.

LU J R, HUANG Y Q. Laser triangulation method for surface measurement [ J ]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2004, 43 ( 1 ): 50-53.

[ 6 ] PER C, MAGNUS O, GUNNAR B. Virtual triangulation sensor development behavior simulation and CAR integration applied to robotic arc welding [ J ]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35: 365-379.

[ 7 ] 汤井田, 黄国祥. 一种基于 Radon 变换的车牌图像分割和识别方法 [ J ]. 中南工业大学学报, 2002, 33 ( 1 ): 5-7.

TANG J T, HUANG G X. A method of license plate image segmentation and identification by Radon transformation [ J ]. Journal of Central South University of Technology, 2002, 33 ( 1 ): 5-7.

[ 8 ] 贺兴华, 周媛媛. MATLAB 7.X 图像处理 [ M ]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 76-79.

HE X H, ZHOU Y Y. MATLAB 7.X image processing [ M ]. Beijing Post and Telecommunications Press, 2006: 76-79.

### 作者简介



张雷, 1996 年于山东理工大学获学士学位, 2005 年北京工业大学获硕士学位, 现为中科院沈阳自动化研究所博士研究生, 主要研究方向为机器视觉检测和图像处理。

地址: 辽宁省沈阳市东陵区南塔街 114

号, 10016

电话: 024-23970416 E-mail: lzhang@sia.cn

Zhang Lei received BSc from Shandong University of Technology in 1996, MSc from Beijing University of Technology in 2005. He is now a PhD candidate in Shenyang Institute of Automation, CAS. His research interests are machine vision and image processing.

Address: Nanta Street No. 114, Shenyang 110016, Liaoning, China. Tel: +86-24-23970416 E-mail: lzhang@sia.cn



赵明扬, 1982 年于苏州丝绸工学院获得学士学位, 1987 年于东北大学获得硕士学位, 1995 年于东北大学获得博士学位, 现为中科院沈阳自动化研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为并联机器人和先进制造装备的基础理论和应用系统研究与开发。

地址: 辽宁省沈阳市东陵区南塔街 114 号, 110016

电话: 024-23970416 E-mail: myzha@sia.cn

Zhao Mingyang received BSc from Suzhou Institute of Silk Textile Technology in 1982, received MSc and PhD both from Northeastern University in 1987 and 1995 respectively. He is currently a professor in Shenyang Institute of Automation, CAS. His research interests are in the areas of fundamental theories and practical applications of parallel robots and advanced manufacturing equipment.

Address: Nanta Street No. 114, Shenyang 110016, Liaoning, China. Tel: +86-24-23970416 E-mail: myzha@sia.cn