

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 9
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年9月 第17卷 第9期(总第197期)

目次

图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (1196)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 9 期

2012 年 9 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-64807995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTXFZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 9 September 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denosing method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1092-10

论文引用格式: 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦. 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(9): 1092-1101.

激光焊接对接拼缝测量的微景深方法

王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦

华中科技大学国家数控系统工程研究中心, 武汉 430074

摘要: 对于复杂微细、错边量小的激光焊接拼缝测量, 现有的视觉传感器方法不能稳定、可靠地提取出拼缝的中心位置、拼缝宽度等信息。为此, 提出了基于微景深的激光焊接对接拼缝测量方法, 该方法采用高倍光学放大镜头、工业 CCD (Charge Coupled Device)/CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) 相机和 LED (Light-Emitting Diode) 外部照明装置, 以光学成像光轴与被测表面法矢呈 45° 的方式, 组成的对接拼缝的非接触测量系统, 既解决了显微放大时景深很小、测量范围小的问题, 又解决了狭窄拼缝高光学放大倍数拼缝检测的难题。实验结果表明, 该系统可快速准确地提取出拼缝中心坐标、拼缝宽度以及拼缝局部表面法矢。拼缝宽度测量精度优于 $5 \mu\text{m}$, 拼缝中心测量精度优于 $6 \mu\text{m}$, 可识别的最小拼缝宽度为 0.02 mm , 完全满足激光焊接对接狭窄拼缝的检测与自动跟踪的要求。

关键词: 激光焊接; 对接拼缝; 视觉测量; 微景深; 清晰度

Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding

Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi

National Numerical Control System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: For the seam feature measurement of the tight butt joint without misalignment in laser welding, current vision sensor cannot obtain the seam gap width and seam position stable and reliable enough. In this paper, a seam measurement method based on the micro depth of field is proposed. A high optical magnification lens, a CCD (Charge Coupled Device) /CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) camera and an external LED (Light-Emitting Diode) lighting unit are used to constitute the non-contact measurement system. The measurement system can be used for the tight butt joint in laser welding. The angle between the seam surface and the optical axis of the camera is about 45° . The installation method solves the problem that the depth of field and the field of view are too small to measure the tight butt joint with the multi-time magnification image measurement system. Experiments indicate that the measurement system can obtain the seam gap width and seam position stable and correctly. With this measure method, the seam surface normal vector also can be measured. The measurement accuracy for the seam gap width and seam position is $5 \mu\text{m}$ and $6 \mu\text{m}$, respectively. Furthermore, the narrowest welding seam gap that can be measured is 0.02 mm , which fully satisfies the demand of the seam measurement in laser welding.

Key words: laser welding; butt seam; vision measurement; micro depth of field; definition

收稿日期: 2011-11-11; 修回日期: 2012-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075166); 国家科技重大专项(2009ZX04007-031)

第一作者简介: 王平江(1963—), 男, 副教授, 1996年于华中理工大学获机械科学与工程学院博士学位, 主要研究方向为数控技术、视觉3维测量、CAD/CAM科研, 发表学术论文50余篇(EI收录15篇), 获发明专利4项。E-mail: pj_wang@hust.edu.cn

0 引言

在激光焊接中,焊接激光束的聚焦光斑直径很小,约0.3 mm,在对接拼焊时,对接拼缝的接头要求有很高的装配质量,对于厚度2 mm左右的薄板,所允许的对接接头的间隙宽度和错边量均小于0.1 mm^[1-4]。焊接时,激光束焦点中心必须准确地沿着拼缝中心轨迹运动,同时激光束焦点距拼缝表面要保持合适的离焦量(根据焊接工艺要求,有正离焦量,也有负离焦量);因此,焊接之前,必须对拼缝进行精密测量,得到拼缝宽度、中心和拼缝局部表面的法矢,以确保焊接质量^[5-9]。同时焊接过程中的热应力等会导致拼缝变形,在焊接过程中也要对拼缝的上述信息进行测量,根据检测出拼缝的偏差,实时调整焊接轨迹与焊接参数,以保证焊接质量^[2]。

视觉传感器获取拼缝特征信息,具有信息量大、与工件非接触、灵敏度和精度高、抗电磁干扰能力强等优点,适合于各种坡口形状,可以同时进行拼缝跟踪控制和焊接质量的检验^[3]。然而,现有的视觉焊缝检测技术大部分都是基于线结构光的三角形测量原理而来的,线结构光的三角形测量原理适合于测量拼缝较大(大于0.1 mm)或有错边量(大于0.1 mm)的拼缝,对于宽度很小的对接拼缝,由于结构光三角测量原理或传感器横向分辨率的限制,目前使用的激光视觉传感器不能稳定、可靠地提取出拼缝的中心位置和拼缝间隙的宽度。为此,提出一种新的测量方法——基于微景深的激光焊接对接拼缝测量方法,可实现微细、无错边量的拼缝的中心坐标、宽度以及局部表面法矢的检测。

1 基于微景深的激光焊接对接拼缝测量原理

1.1 微景深的概念

如图1所示,设照相机的镜头为一会聚透镜L,其像方焦距为*f*;与照相机光圈对应的入射光瞳的直径为*D*;被摄平面N经精确对焦成像于感光胶片N'上,其物距和像距分别为*S*及*S'*;物点*P₁*、*P₂*的像点*P'₁*、*P'₂*分别位于感光胶片的前后,其成像光束均在感光胶片上截成一个小椭圆斑,此斑称为弥散圆。当这个弥散圆斑的大小不超过某种限度时,感光胶片上像的清晰度是能满足实际需要,否则像就模糊

不清。由此可见,只有在平面N前后某一距离内的物体才能在感光胶片上得到有一定清晰度的像,点*P₁*、*P₂*的纵深距离($\Delta S_1 + \Delta S_2$)称为景深^[10]。

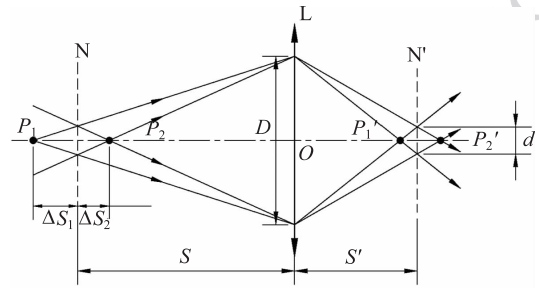


图1 相机光学成像示意图^[10]

Fig.1 The schematic diagram of optical imaging of the camera

$$\Delta S_1 = \frac{dS(S+f)}{Df+d(S+f)} \quad (1)$$

$$\Delta S_2 = \frac{dS(S+f)}{Df-d(S+f)} \quad (2)$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{2dDfS(S+f)}{D^2f^2 - d^2(S+f)^2} = \frac{2dFf^2S(S+f)}{f^4 - d^2F^2(S+f)^2} \quad (3)$$

式中,*d*为容许弥散圆斑直径;*F*为照相机的光圈指数,其值为相对孔径 $F = \frac{f}{D}$;以被摄平面N为界,

ΔS_1 为远景深, ΔS_2 为近景深,总景深为 ΔS 。

根据式(1)–(3),当容许弥散圆直径*d*=0.01 mm,镜头焦距*f*=50 mm,*F*=1.4,光学放大倍数为4倍时,则物距*L*=62.5 mm,景深为

$$\Delta S = \frac{2 \times 50^2 \times 1.4 \times 0.01 \times 75^2}{50^4 - 1.4^2 \times 0.01^2 \times 75^2} \approx 0.063 \text{ mm}$$

从前面的计算可知焦距*f*=50 mm,*F*=1.4,光学放大倍数为4倍时,在62.460~62.539 mm范围的空间区域内目标能清晰成像,不在这个空间区域内的目标所成的像均是模糊的。称此空间区域为微景深区域 Ω ;与镜头主光轴垂直且穿过微景深区域 Ω 中心点的平面N,称之为微景深中心平面 Σ 。

1.2 基于微景深的激光焊接对接拼缝测量原理

图2为针对错边量小、间隙狭小的对接拼缝几何信息的测量方法——基于微景深的激光焊接对接拼缝测量方法的原理图。

如图2所示,当用相机拍摄一个与平面 Σ 夹角为 α 的拼缝时,拼缝表面与微景深区域 Ω 相交形成区域*ABCD*,该区域在图像中表现为一定范围的清

晰带区域 $A'B'C'D'$; 而不与 Ω 相交的拼缝表面, 则不能清晰地成像, 在图像中表现为模糊区域。如图 3 所示是根据以上原理, 所拍摄的对接拼缝局部表面的图像。图 3 所示的图像分为 3 个部分, 左右两边均为模糊区域, 中间有一条明显的清晰带, 对应于拼缝表面与微景深区域 Ω 的相交区域。

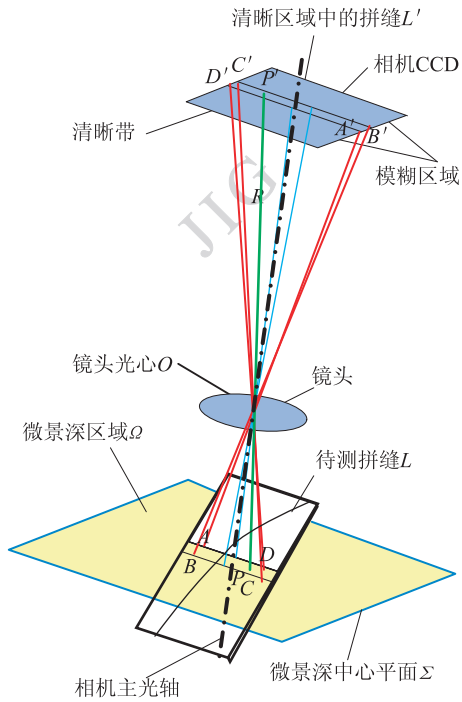


图 2 基于微景深的激光焊接对接拼缝测量原理图
Fig. 2 The schematic diagram of the seam measurement method based on micro depth of field

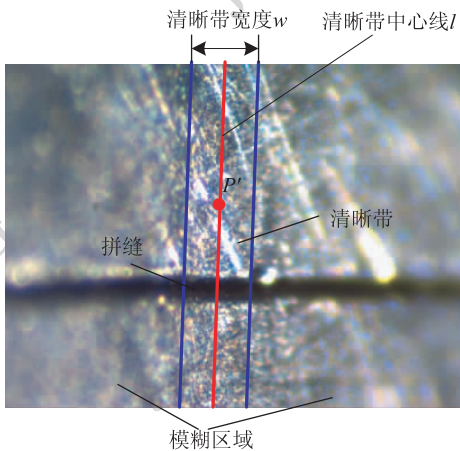


图 3 激光焊接对接拼缝微景深图像
Fig. 3 The image of the welding seam based on micro depth of field

由成像原理可知, 当光学放大倍数为 4 倍、CCD 感光面尺寸约为 5 mm^2 时, 成像视野约为 1.3 mm^2 ,

可见其视野非常小, 可得如下合理近似: 1) 在该区域里的拼缝局部表面可视为小平面; 2) 拼缝局部表面与平面 Σ 的交线可视为直线, 在图像中即为清晰带中心线 l 。因此, 从如图 2 和图 3 所示的清晰带中心线 l 上的任一点 P' 发出一条射线 R , 经过镜头的光心 O 后, 与平面 Σ 有唯一交点 P , 这个交点 P 即为与平面 Σ 相交的拼缝局部表面上与图像上 P' 对应的空间点。

基于以上原理, 从图 3 中提取出清晰带的中心线方程后 (即图 3 中过 P' 点的直线), 通过摄影仿射变换, 即可求出拼缝局部表面与平面 Σ 交线上的点 (即拼缝局部表面上 P) 的 3 维机床坐标。通过拍摄间隔一定距离的两张图像, 可分别求得拼缝局部表面与平面 Σ 的交线上的一系列点的 3 维坐标, 当拍摄的图像间隔距离很小时, 拼缝的局部表面可以看成平面, 将两幅图像所获得的拼缝局部表面上的点进行平面拟合, 即可得到拼缝局部表面法矢的近似值。

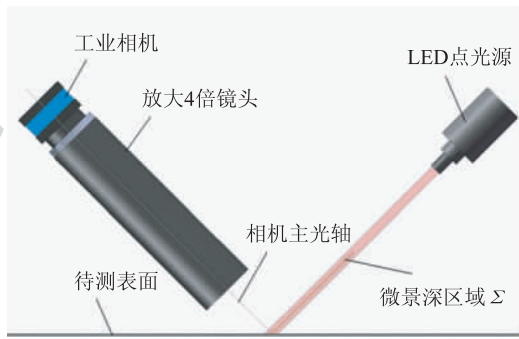
获得图 3 中清晰区域的图像及清晰带中心线 l 方程后, 通过图像分析, 可提取出图像上的拼缝中心和拼缝宽度。图像上的拼缝中心坐标所对应的拼缝局部表面的拼缝中心机床坐标可通过坐标变换得到, 而图像上的拼缝宽度所对应的拼缝局部表面的拼缝宽度可根据图像的分辨率直接计算得到。

图 4 为根据以上基于微景深的激光焊接对接拼缝测量原理设计的测量系统结构图。此系统包括 CCD/CMOS 工业相机、镜头和 LED 外部照明装置。将相机主光轴与激光焊接对接拼缝局部表面呈一定角度放置, 即使相机的平面 Σ 与拼缝局部表面成 α 夹角 (如图 4(a) 所示), 并调整相机与拼缝的相对位置, 使图像中有清晰区域出现, 即使微景深区域 Ω 与拼缝局部表面的交线在相机的视野里面 (如图 4(b) 所示中的矩形 $ABCD$), 且尽量使 LED 外部照明装置照射出的光线与平面 Σ 平行, 以保证 LED 照射出的光线经被测表面的反射后能尽量多地被 CCD 所接收。

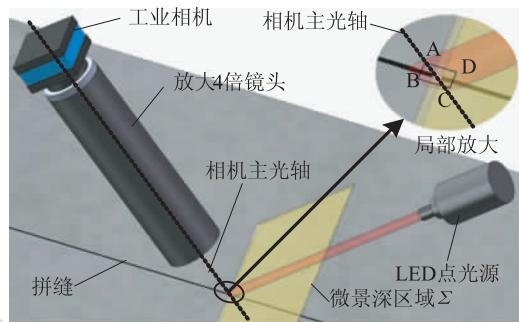
2 微景深拼缝测量中的关键技术

2.1 清晰带及清晰带中心线 l 提取技术

由上节基于微景深拼缝测量原理可知, 在获取拼缝表面的微景深图像后, 对图像中的清晰区域进行特征提取可得到拼缝中心和拼缝宽度; 获得间隔一定距离的两张拼缝表面图像后, 分别提取出清晰带中心线 l , 并计算 l 上一系列点所对应的 3 维坐标



(a) 2维视图



(b) 3维视图

图4 微景深激光焊接对接拼缝测量系统结构
Fig.4 The seam measurement system based on micro depth of field

点(即拼缝局部表面上的点),进行平面拟合可得到拼缝局部表面的法矢。因此,清晰带中心线 l 方程和清晰带的精确提取,对获得精确的拼缝中心和拼缝宽度以及拼缝局部表面的法矢有很大的影响。先对图像中每个子区域进行清晰度评价,获得清晰度灰度图,再对清晰度灰度图采用特征提取的方法进行清晰带中心线 l 及清晰带宽度的提取,最后得到拼缝的实际宽度及法矢。

2.1.1 清晰度评价方法

评价图像清晰度的方法有很多种,如方差评价函数、梯度评价函数及频谱评价函数^[11]等。选择哪种评价方法,取决于评价精度与速度的综合考虑。

本文方法是將 $M \times N$ 像素的如图3所示的拼缝原始图片灰度化后,分为 $\frac{M}{n} \times \frac{N}{n}$ 个大小为 $n \times n$ 像素的子图像,然后分别对每个子图像用清晰度评价函数进行清晰度评价,得到所有子图像的清晰度评价价值;将所有子图像的清晰度评价价值归一化到 $0 \sim 255$,并将每个归一化后的清晰度评价价值作为相应的子图像中各个像素的值,最后将所有子图像按原来的位置进行组合,可得到一个 $M \times N$ 像素大小的灰

度图,称其为清晰度灰度图像,图5为图3所得的清晰度灰度图像。从图5中可看到清晰带所对应的区域灰度值较大(即清晰度评价价值较大),而模糊区域灰度值较小(即清晰度评价价值较小)。

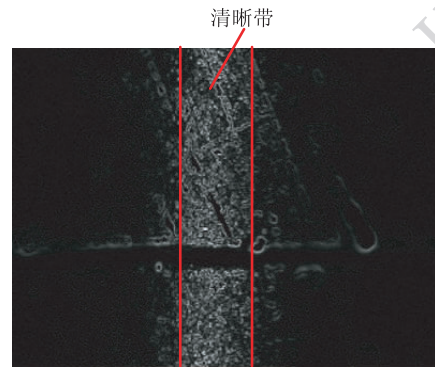


图5 清晰度灰度图像
Fig.5 Definition gray image

要更好地將清晰带提取出来,选择合适的清晰度评价函数是很重要的,將图3的拼缝图像划分为不同大小的子图像,并采用不同清晰度评价函数进行实验,实验结果如表1所示。

表1中分别对不同子图像大小和不同清晰度评价函数进行实验,通过算法运行时间 t 和评价出的清晰度图像中清晰带的符合程度 α ,来对清晰度评价效果 E 进行评判。采用 $E = k_1 \frac{1}{t} + k_2 \alpha$ 来评判清晰度评价效果。设

$$E = k_1 \frac{1}{t} + k_2 \alpha = k_1' T + k_2 \alpha \quad (4)$$

式中, T 为运行速度,由于表1中运行时间最小为 266 ms ,所以运行速度以 266 ms 占运行时间的百分比进行衡量,令 $T/\% = \frac{266}{t} \times 100$ 。设运行速度 T 对评价的效果的评判影响占 20% ($k_1' = 0.2$),清晰带的符合程度 α 对评价效果的评判影响占 80% ($k_2 = 0.8$),则评判公式为 $E = 0.2 \times \frac{266}{t} \times 100 + 0.8 \times \alpha = 5320 \frac{1}{t} + 0.8\alpha$ 。

从表1各种情况的清晰度评价效果可以看出,当子图像大小为 8×8 ,采用方差评价函数对图像进行清晰度进行评价时,其值为 92.22 ,评价效果最好。所以采用 8×8 大小的子图像和方差评价函数对拼缝图像进行清晰度评价及清晰区域判定,评价效果如图5所示。本文采集了大量微景深图像,并

表 1 清晰度评价性能实验
Table 1 Performance test data of various definition evaluation method

		子图像大小				
		4 × 4	8 × 8	16 × 16	32 × 32	64 × 64
运行时间 t/ms	方差函数	360	328	297	281	266
	梯度函数	2 406	1 266	875	968	719
	频谱函数	18 188	13 546	10 797	8 391	7 985
清晰带的符合程度 $\alpha/\%$	方差函数	89	95	83	66	40
	梯度函数	88	94	83	68	40
	频谱函数	89	96	83	64	40
清晰度评价效果 $\beta/\%$	方差函数	85.98	92.22	84.31	71.73	52.00
	梯度函数	72.61	79.40	72.48	59.90	39.40
	频谱函数	71.49	77.19	66.89	51.83	32.67

采用方差评价函数进行微景深区域提取实验,结果表明采用方差评价函数对微景深图像进行清晰度评价及清晰区域搜寻,在计算时间、区域判定精度等方面都可以得到很好的效果。

2.1.2 清晰带中心线 l 的提取

为了减少运算量,根据拼缝图像的特点即清晰带在图像中均为纵向,则从清晰度灰度图中沿水平方向等距截取出高度为 64 像素宽为 M 的 5 条图像带(如图 6(a)所示),根据清晰带处灰度值较大的特点,很快就能提取出各图像带中清晰带中心点(Q_1, Q_2, \dots, Q_5)的位置,然后对提取到的 5 条图像带的中心点(Q_1, Q_2, \dots, Q_5)进行最小二乘直线拟合,可得到图像像素坐标系下清晰带中心线 l 粗略位置方程直线 $l' : au + bv + c = 0$ 。由于在实际的测量过程中,往往会因为外界因素等的影响,有可能导致计算出的某些图像带中清晰带的中心点(Q_1, Q_2, \dots, Q_5)偏离清晰带的中心线。如图 6(b)所示,从上往下第 4 个图像带正好是拼缝所在的位置,则此图像带所求出的清晰带中心点 Q_4 将不准确。为了减小误差,在第 1 次拟合出清晰带中心线 l 的粗略位置直线 l' 方程后,计算出每条图像带中心点(Q_1, Q_2, \dots, Q_5)到直线 l' 的距离,并将距离直线 l' 距离最大的点 Q_4 剔除掉,如图 6(b)所示,然后对其余的点再重新进行最小二乘拟合得到清晰带中心线 l 图像像素坐标系下的精确方程 $\hat{a}u + \hat{b}v + \hat{c} = 0$ 。

2.2 图像像素坐标系下拼缝中心和宽度的提取

由图 6(b)的拼缝图像可看出,拼缝处的灰度比

其他地方的灰度低,根据此特点,采用灰度统计法来从清晰区域中提取出拼缝中心和宽度等信息。

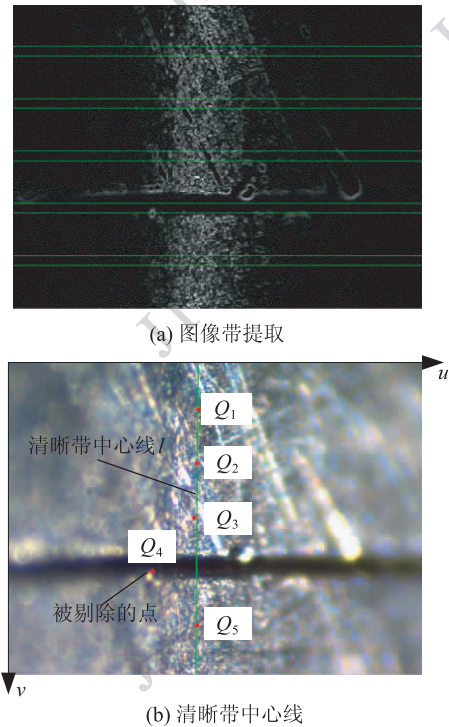


图 6 清晰带中心线提取方法
Fig. 6 The method of extracting the high-definition belt central straight line

如图 7 所示,一般清晰区域大约 120 个像素,从中提取 3 条宽度为 16 像素的图像带进行分析。在图像坐标系下,先将清晰带中心线 $l_2(\hat{a}u + \hat{b}v + \hat{c} =$

0)向左偏移64个像素得到直线 $l_1(\hat{a}(u+64)+\hat{b}v+\hat{c}=0)$,清晰带中心线 $l_2(\hat{a}u+\hat{b}v+\hat{c}=0)$ 向右偏移64个像素得到直线 $l_3(\hat{a}(u-64)+\hat{b}v+\hat{c}=0)$;接下来分别以这3条直线为中心提取出16个像素宽的图像带,如图7所示的图像带(本文分别称为左图像带 I_l 、中间图像带 I_c 和右图像带 I_r)。然后分别对3条图像带进行分析,由于拼缝所在区域图像的灰度相对于其他地方小很多,因此,可采用灰度值直方图统计方法,得到左图像带 I_l 的拼缝中心点和拼缝上下边界坐标 $C_l(S_{Lx}^C, S_{Ly}^C)$ 、 $T_l(S_{Lx}^T, S_{Ly}^T)$ 、 $B_l(S_{Lx}^B, S_{Ly}^B)$;中间图像带 I_c 的拼缝中心点和拼缝上下边界坐标 $C_c(S_{Mx}^C, S_{My}^C)$ 、 $T_c(S_{Mx}^T, S_{My}^T)$ 、 $B_c(S_{Mx}^B, S_{My}^B)$;以及右图像带 I_r 的拼缝中心点和拼缝上下边界坐标 $C_r(S_{Rx}^C, S_{Ry}^C)$ 、 $T_r(S_{Rx}^T, S_{Ry}^T)$ 、 $B_r(S_{Rx}^B, S_{Ry}^B)$ 。

获得3条图像带的拼缝中心后,就可以求出拼缝的中心坐标 (S_x^C, S_y^C)

$$\begin{cases} S_x^C = (S_{Lx}^C + S_{Mx}^C + S_{Rx}^C)/3 \\ S_y^C = (S_{Ly}^C + S_{My}^C + S_{Ry}^C)/3 \end{cases} \quad (5)$$

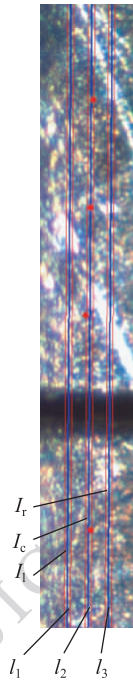


图7 清晰区域图像带的提取

Fig.7 Extracting the high-definition belt

如图8所示,在图像像素坐标系下,将直线与 u 轴正方向的夹角定义为直线的倾斜角 θ 。设 θ_{LM} 为左图像带 I_l 的拼缝中心点 $C_l(S_{Lx}^C, S_{Ly}^C)$ 和中间图

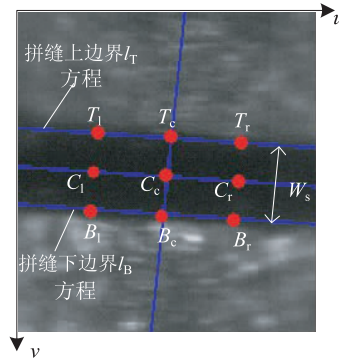


图8 拼缝宽度计算方法

Fig.8 Seam gap width calculation method

像带 I_c 的拼缝中心点 $C_c(S_{Mx}^C, S_{My}^C)$ 连线的倾斜角, θ_{MR} 为中间图像带 I_c 的拼缝中心点 $C_c(S_{Mx}^C, S_{My}^C)$ 和右图像带 I_r 的拼缝中心连线点 $C_r(S_{Rx}^C, S_{Ry}^C)$ 的倾斜角,则有

$$\begin{cases} \theta_{LM} = \arctan((S_{Ly}^C - S_{My}^C)/(S_{Lx}^C - S_{Mx}^C)) \\ \theta_{MR} = \arctan((S_{My}^C - S_{Ry}^C)/(S_{Mx}^C - S_{Rx}^C)) \end{cases} \quad (6)$$

记 θ 为拼缝的倾斜角, θ 可通过 θ_{LM} 和 θ_{MR} 的平均值得

$$\theta = \frac{(\theta_{LM} + \theta_{MR})}{2}, |(\theta_{LM} - \theta_{MR})| < \frac{\pi}{6} \quad (7)$$

如果在拼缝信息提取过程中没有出现错误的话,拼缝的倾斜角应具有一致性,即 θ_{LM} 和 θ_{MR} 两个倾斜角大小应比较接近,因此添加限制条件 $|(\theta_{LM} - \theta_{MR})| < \frac{\pi}{6}$ 。若不满足此条件,表明前面的拼缝信息提取出现错误。该条件可为拼缝检测过程提供错误自检功能。

拼缝上下边界线 l_T 和 l_B 平行,且 l_T 和 l_B 的倾斜角均与拼缝的倾斜角 θ 一致,所以得到拼缝的倾斜角 θ 后,则可得到拼缝上下边界线 l_T 和 l_B 的斜率为

$$k_s = \tan \theta \quad (8)$$

利用3条图像带分别获得的拼缝上边界坐标 $T_l(S_{Lx}^T, S_{Ly}^T)$ 、 $T_c(S_{Mx}^T, S_{My}^T)$ 、 $T_r(S_{Rx}^T, S_{Ry}^T)$,可求出拼缝上边界上3点 T_l 、 T_c 、 T_r 的平均坐标

$$\begin{cases} S_{Gx}^T = (S_{Lx}^T + S_{Mx}^T + S_{Rx}^T)/3 \\ S_{Gy}^T = (S_{Ly}^T + S_{My}^T + S_{Ry}^T)/3 \end{cases} \quad (9)$$

则得到图像像素坐标系下拼缝上边界的边界线 l_T 方程

$$v = k_s(u - S_{Gx}^T) + S_{Gy}^T = \tan \theta(u - S_{Gx}^T) + S_{Gy}^T \quad (10)$$

同理,利用3条图像带分别获得的拼缝下边界

坐标 $B_l(S_{Lx}^T, S_{Ly}^T)$ 、 $B_c(S_{Mx}^T, S_{My}^T)$ 、 $B_r(S_{Rx}^T, S_{Ry}^T)$ ，可得到拼缝下边界的边界线 l_B 方程

$$\begin{cases} S_{Gx}^B = (S_{Lx}^B + S_{Mx}^B + S_{Rx}^B)/3 \\ S_{Gy}^B = (S_{Ly}^B + S_{My}^B + S_{Ry}^B)/3 \end{cases} \quad (11)$$

$$v = k_s(u - S_{Gx}^B) + S_{Gy}^B = \tan \theta(u - S_{Gx}^B) + S_{Gy}^B \quad (12)$$

平行的两拼缝边界线 l_T 和 l_B 的距离即为拼缝像素宽度 W_s ，则有

$$W_s = \frac{|(S_{Gy}^T - S_{Gy}^B) - \tan \theta(S_{Gx}^T - S_{Gx}^B)|}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \quad (13)$$

2.3 测量坐标系下拼缝中心、宽度及法矢的计算

2.3.1 图像像素坐标系到测量坐标系的坐标变换

如图 9 所示，坐标系 oww 为图像的像素坐标系，坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 为摄像机坐标系，其 X_c 轴和 Y_c 轴与图像的 X 轴和 Y 轴平行， Z_c 轴为相机的光轴；在微景深中心平面处建立测量坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ ，令 $X_wO_wY_w$ 在微景深中心平面上，其 X_w 轴和 Y_w 轴与图像的 X_c 轴和 Y_c 轴平行， Z_w 轴与 Z_c 轴重合。微景深中心平面上任一点 P 在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示，即点 P 在图像上的投影位置 P' 为光心 O 与 P 点的连线 OP 与图像平面的交点。但是，针孔模型是摄像机成像的一种理想线性模型，不

能准确地描述真实的成像关系。实际的成像中可能存在镜头的径向、离心和薄棱镜等非线性畸变。在本测量系统模型中要得到高精度测量结果，必须将镜头的非线性畸变考虑进去^[12]。摄像机的标定方法已经很成熟，限于篇幅，摄像机内部参数的标定方法另文叙述。

经过摄像机标定即可将图像上像点 P' 的实际图像像素坐标 (u, v) 变换到测量坐标系下的 3 维空间点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ ^[12-13]。

2.3.2 测量坐标系下拼缝中心和拼缝宽度的计算

由式(5)可从拼缝图像中提取出图像像素坐标系下的拼缝的中心坐标 (S_x^C, S_y^C) ，根据摄像机成像模型，即可得到测量坐标系下的 3 维拼缝中心坐标 $(X_w, Y_w, 0)$ 。

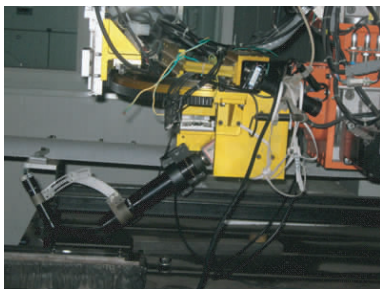
由式(13)从拼缝图像中提取出图像像素坐标系下的拼缝宽度 W_s ，在对摄像机的内部参数进行标定后，可得到物体在测量坐标系到图像物理坐标系的放大倍数 r ，因此测量坐标系下拼缝的宽度 W_{sw} 可直接由式 $W_{sw} = W_s/r$ 求出。

2.3.3 测量坐标系下拼缝法矢的计算

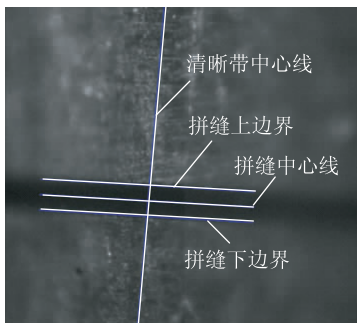
拍摄间隔一定距离的两幅拼缝图像，提取出的清晰带中心线方程分别为 l_a, l_b ，然后分别取出清晰带中心线 l_a 上的一系列点 $P_{a1}, P_{a2}, \dots, P_{an}$ 和 l_b 上的一系列点 $P_{b1}, P_{b2}, \dots, P_{bn}$ 。根据摄像机成像模型，可得到相应的 3 维点列 $P_{a1}^m, P_{a2}^m, \dots, P_{an}^m$ 和 3 维点列 $P_{b1}^m, P_{b2}^m, \dots, P_{bn}^m$ 。这两组点列即为在测量坐标系下的 3 维坐标。由微景深的原理可知，清晰带中心线上的点对应于拼缝局部表面与微景深中心平面 Σ 的交线，所以点列 $P_{a1}^m, P_{a2}^m, \dots, P_{an}^m$ 和点列 $P_{b1}^m, P_{b2}^m, \dots, P_{bn}^m$ 均为拼缝局部表面上的点，如果采集的两幅图像的间隔距离足够小，拼缝局部表面可以近似为小平面，利用这些点进行平面拟合，即该拟合平面的法矢即为拼缝局部表面的法矢。

3 实验结果

如图 9(a) 所示，本文将上述对接拼缝测量装置安装在多轴联动数控激光焊接机床上进行拼缝测量实验的情形，图 9(b) 所示的是利用本文方法开发出的软件进行实时拼缝测量的测量结果图。图 9(b) 中的线是软件自动测量出来的清晰带中心线和拼缝位置。经标定，本拼缝测量系统在拼缝宽度上的分辨率为 $1.58 \mu\text{m}$ ；实践上，图像处理



(a) 实验现场照片



(b) 拼缝测量结果

图 9 对接拼缝测量系统测量实验

Fig. 9 The experiment of the seam measurement

中5个像素即可稳定地识别出目标的特性,亦即本拼缝测量系统最小可识别的拼缝宽度为7.9 μm。经过实验验证,本系统可稳定可靠地检测出的最小拼缝宽度为20 μm。本系统对同一幅拼缝图像进行1 000次拼缝检测所用的时间为8 891 ms,所以对每一幅拼缝图像进行拼缝检测的时间为9 ms左右,检测速度完全能满足激光焊接中拼缝实时检测与跟踪的要求。

实验结果表明本拼缝测量系统能准确地提取出拼缝信息,并计算出拼缝局部表面法矢。拼缝的测量精度对焊接质量有着很大的影响,本文对接拼缝测量系统的测量精度完全能满足激光焊接的要求。

3.1 拼缝宽度测量精度

利用本系统测量的拼缝宽度与实际的拼缝宽度进行比较就可以获得拼缝测量的误差。拼缝的实际宽度采用千分表进行手动测量来获得,具体方法如图10所示,先调整拼缝和测量装置的位置,让拼缝的上边界与图像的中心线重合(图10(a)),移动机床的Y轴,使图像的中心线与拼缝的下边界重合(图10(b)),利用千分表测量机床Y轴移动的距离,该距离就是拼缝的实际宽度。如表2所示,为按照以上方法,对10处不同位置的拼缝进行手动测量和自动测量的测量值。由实验数据可知本系统的拼缝宽度测量误差为±5 μm。

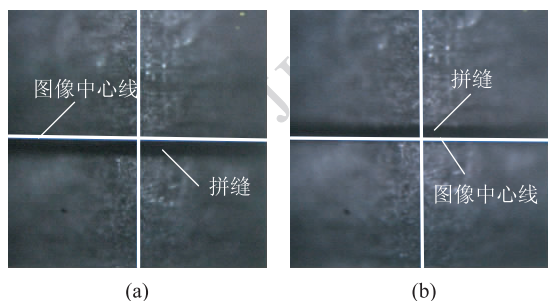


图10 拼缝宽度手动测量方法

Fig. 10 Seam gap width manual measurement method

表2 拼缝宽度测量精度实验数据

Table 2 The data of the seam gap width

	/μm									
位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
手动测量缝宽	75	75	71	82	76	86	67	83	79	79
自动测量缝宽	71	70	73	87	79	85	65	78	75	82
测量误差	-4	-5	2	5	3	-1	-2	-5	-4	3

3.2 拼缝中心Y轴测量精度

先利用软件测量当前拼缝中心位置后,在图像的高度方向移动拼缝的位置,并采用千分表测量拼缝移动过程中的位移量即为拼缝实际的位移量,再采用软件测量拼缝移动后的拼缝中心位置,将软件前后测量的两个拼缝中心位置移动的距离,即为本系统自动测量的拼缝中心位移量。将本系统测量的拼缝中心位移量与实际的拼缝中心位移量进行比较就可以获得拼缝中心的测量误差。如表3所示,对拼缝中心位移量进行手动测量和自动测量的多组测量值。从实验数据可以得出本系统的拼缝中心定位测量精度为±6 μm。

表3 拼缝中心Y轴方向测量精度实验数据

Table 3 The data of the measurement accuracy for the seam center of Y axis

	/μm									
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
手动测量位移量	100	97	100	98	99	98	90	93	100	101
自动测量位移量	99	91	103	93	96	99	96	93	96	101
测量误差	-1	-6	3	-5	-3	1	6	0	-4	0

3.3 Z轴测量范围及拼缝中心Z轴的测量精度

如图11(b)所示,为拼缝中心Z轴测量范围及精度的测试方法示意图。

先利用软件检测当前拼缝图像中清晰带中心线方程后,移动机床的Z轴,可以看到清晰带沿着图像的宽度方向向右移动,如图11(c)所示为移动后的拼缝图像。再检测出图11(c)拼缝图像中清晰带中心线的方程,计算出图11(b)和图11(c)的拼缝图像的清晰带中心线的距离,即为图11(a)所示的清晰带在Z轴运动过程中移动的距离 M_p ,标定出相机的微景深中心平面与拼缝表面的夹角 α ,即可计算出通过软件测量的Z轴位移量 $M_z = M_p \sin \alpha$ 。在移动机床Z轴过程中,采用千分表测量Z轴的位移量即为Z轴实际的位移量 R_z 。将本系统软件测量的Z轴位移量 M_z 与实际的Z轴位移量 R_z 进行比较就可以获得深度的测量误差。如表4所示,为对深度位移量进行手动测量和自动测量的多组测量值。如图11测量清晰带从最左边移动到最右边,Z轴移动的距离即为Z轴的测量范围。从实验的数据及计算可知,本系统的拼缝中心在Z轴方向的测量范围为±0.45 mm,测量精度为±10 μm。

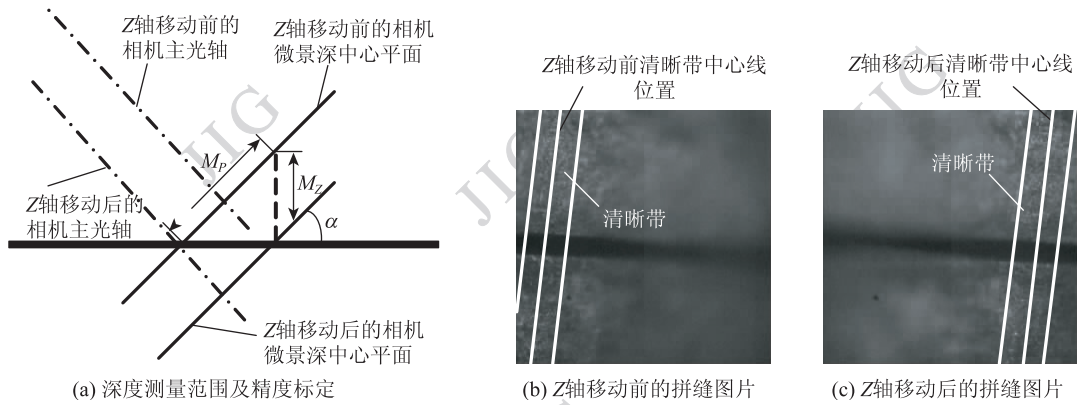


图 11 拼缝中心 Z 轴测量精度实验
Fig. 11 The measurement accuracy for the seam center of Z axis

表 4 拼缝中心 Z 轴方向测量精度实验数据
Table 4 The data of the measurement accuracy for the seam center of Z axis

	/ μm									
次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
手动测量位移量	494	396	395	298	495	393	199	381	197	394
自动测量位移量	500	397	398	306	487	383	205	382	200	390
测量误差	6	1	3	8	-8	-10	6	1	3	-4

4 结 论

1) 利用基于微景深的对接拼缝测量开发的拼缝测量软件,可以精确地测量出拼缝中心、宽度和拼缝局部表面法矢信息,其可以测出的最小拼缝宽度为 0.02 mm。

2) 经过实验测试,当本系统以 9 m/min 的速度按照拼缝轨迹进行运动时,依然可以采集到清晰图像,并实时精确地测量出拼缝中心、宽度和拼缝局部表面法矢信息,如图 9(b) 所示。

3) 本系统在拼缝测量过程中存在的不足是:由于相机的视野太小,约为 5 mm²,为了保证拼缝出现在所拍摄的图像中,在拼缝测量前,需先对拼缝测量系统进行示教。

狭窄拼缝测量系统,通过使显微镜头主光轴与被测拼缝表面法矢倾斜布置的方式,既实现了狭窄拼缝的高分辨率(1.58 $\mu\text{m}/\text{像素}$)、高精度(0.005 mm)测量的要求,又实现了较大的深度测量范围

(± 0.45 mm)。由此可见,本文方法在对接拼缝检测与跟踪焊接中具有很好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] Han L J. Application and development of laser welding technology in automobile manufacture [J]. Machinist Metal Forming, 2007, 6: 42-44. [韩立军. 激光焊接技术在汽车制造中的应用与发展[J]. 机械工人, 2007, 6: 42-44.]
- [2] Zeng S S, Shi Y H, Wang G R. Research status and prospect of seam tracking technology based on sensor [J]. Welding Technology, 2008, 37 (002): 1-5. [曾松盛, 石永华, 王国荣. 基于电弧传感器的焊缝跟踪技术现状与展望[J]. 焊接技术, 2008, 37 (002): 1-5.]
- [3] Wu J Y, Wang P J, Chen J H, et al. Vision system of butt joint gap width measurement for laser welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 105-108. [吴家勇, 王平江, 陈吉红, 等. 激光焊接对接接头间隙宽度视觉测量系统[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 105-108.]
- [4] Sugitani Y, Kobayashi Y, Murayama M. Development and application of automatic high speed rotation arc welding [J]. Welding International, 1991, 5(7): 577-583.
- [5] Kim J W, Shin J H. A study of a dual-electromagnetic sensor system for weld seam tracking of I-butt joints [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217 (9): 1305-1313.
- [6] Bae K Y, Lee T H, Ahn K C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120 (1-3): 458-465.
- [7] Chen S B, Chen X Z, Qiu T, et al. Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 43 (1): 77-97.

- [8] Shen H Y, Ma H B, Lin T, et al. Research on weld pool control of welding robot with computer vision[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2007, 34 (6) : 467-475.
- [9] Yu J Y, Na S J. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment, Part 1: Mathematical model [J]. Mechatronics, 1997, 7 (7) : 599-612.
- [10] Lan H J. A study of the depth of field and its dominant factors [J]. Journal of Liuzhou Teachers College, 2001,9(16) :67-69. [蓝海江. 景深及影响景深的因素 [J]. 柳州师专学报, 2001, 9(16) :67-69.]
- [11] Wang P J, Chen D J, Wu M L, et al. Implementation of a multiple automatic focusing algorithm for video measuring system [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(21) :2555-2560. [王平江, 陈德军, 巫孟良, 等. 一种复合的自动对焦方法在影像测量仪中的应用 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(21) :2555-2560.]
- [12] Ma S D, Zhang Z Y. Computer Vision: Computing Theory and Algorithm Base [M]. Beijing: Science Press, 1997: 52-71. [马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 52-71.]
- [13] Wu Z B. Industrial Robot [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006: 28. [吴振彪. 工业机器人 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 28.]