

基于 PSD 的薄板焊接坡口信号识别系统

杨秀芝¹, 张锐², 王兴东³, 蒋宇辉³, 王子涵³

(1. 湖北理工学院, 湖北 黄石 435003; 2. 武汉理工大学, 武汉 430070; 3. 武汉科技大学, 武汉 430080)

摘要: 坡口信号识别是自动化焊接工艺的难点。基于此, 运用 PSD 传感器的光敏性设计了光路图, 建立了相对应的光路模型; 针对 PSD 传感器会出现一定程度的非线性畸变, 建立了相对应的改进模型, 根据 PSD 传感器的输出位移与时间曲线的特点, 提出了提取坡口角点信息的相关算法, 实现对方点的实时提取及坡口的形貌拟合。结果表明, 该信号识别系统能准确检测坡口的位置变化, 并对坡口存在的缺陷进行实时检测, 避免后期焊接过程出现失误, 影响焊接质量。

关键词: 薄板焊接; 信号识别; 坡口角点提取; PSD 畸变校正; 坡口缺陷检测

中图分类号: TG456.7

0 前言

随着合金强度韧性的提高, 薄板因其重量轻、强度高被广泛应用于汽车制造、船舶制造、航空航天等领域, 具有广阔的应用前景, 而薄板焊接则是实现薄板应用的重要一环。薄板自动焊接是国内外研究的重点, 自动焊接的关键约束因素是对坡口的检测, 在实际薄板的焊接过程中, 坡口间距小, 故坡口识别成为薄板焊接的难点。

目前, 视觉传感器是薄板坡口跟踪中常用的方式, 分为被动视觉和主动视觉^[1-2]。前者通过 CCD 摄像机直接观察, 分析图像后得到坡口位置; 后者使用结构光打在坡口上, 由 CCD 摄像机采集结构光所在位置图像。Seiler 等人^[3]通过高速摄像机拍摄 50 ~ 100 μm 的超薄金属箔的焊接熔池, 分析焊接后坡口处的缺陷。Yu 等人^[4]同样通过观察, 用视觉校准技术转换三维坐标, 得到焊枪在两个方向上的偏差。Shao 等人^[5]使用三条不同波长的结构光从而得到坡口的三维轮廓, 并能识别焊接宽度小于 0.1 mm 的坡口。鲁建波等人^[6]设计了圆形扫描结构光传感器, 在坡口表面形成圆形激光轨迹, 通过 CCD 摄像机采集图像, 分析后得到坡口的三维轮廓。以上研究均采用 CCD 摄像机采集坡口信息, 但 CCD 芯片的分辨率限制于其像元之间的距离, 且摄像机的采集速度也会受到分辨率的影响, 对于间距小的

薄板坡口, 不仅难以识别, 且还需通过复杂的图像算法进行处理。而 PSD 芯片因其分辨率高, 响应速度快, 信号检出方便且处理较为简单, 在 CCD 系统中, 坡口高度的变化会导致相机与坡口的间距发生改变, 存在超过相机景深而无法采集清晰图像的问题。在相同的激光功率下, PSD 采集到的光强信号大于 CCD, 且无需负责的光学聚焦系统。文晓江等人^[7]设计了扫描式激光-PSD 焊缝跟踪传感器, 主要针对大坡口 V 形坡口, 坡口精度仅为 0.4 mm。

文中采用 PSD 芯片作为信息采集装置, 配合扫描激光器, 搭建了薄板坡口信号识别系统。提出针对本系统的坡口识别算法, 实现了薄板坡口的精准快速识别。

1 试验系统建立

1.1 系统搭建

系统原理图如图 1 所示, 以坡口轨迹为直线的薄板为例, 由点激光器发出的激光, 投射到固定在步进电

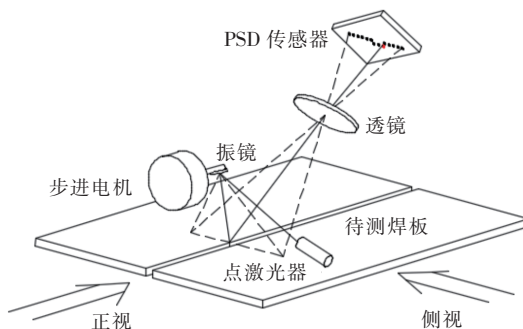


图1 系统原理图

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFB1300502)

doi: 10.12073/j.hj.20200903002

机输出轴上的反射镜上,电机以一定转速在设定的范围内做往复运动,使激光来回扫过薄板的坡口;激光点由薄板表面反射,再经镜头汇聚,在 PSD 芯片的感光区形成一系列光斑;经过后续滤波计算处理后可得到光斑集的实时坐标,进一步可根据光路捕捉到坡口的位置。

图2为搭建的坡口跟踪试验平台示意图,该平台由整体框架部分、运动控制部分和光电传感部分组成。整体框架部分由支撑架和水平梁构成;运动控制部分包括电机、滚珠丝杠、滑块、导轨、水平底板和轴承片等组成;光电传感部分由振镜、点激光器、PSD 传感器、镜头、数据采集卡和计算机等组成;整体框架由铝合金型材搭建而成。表1给出试验平台的核心部

件的技术性能参数。

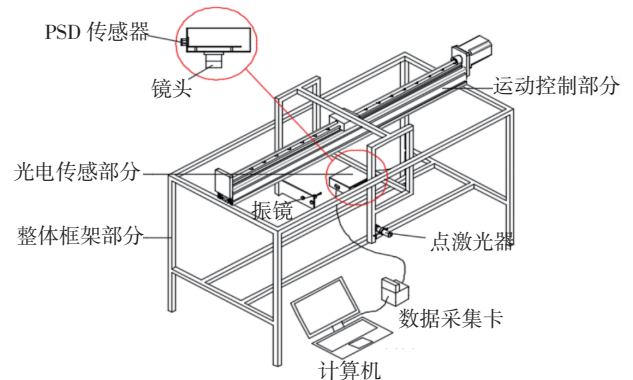


图2 坡口信号识别试验平台示意图

表1 核心部件的技术性能参数

名称	型号	参数	备注
二维 PSD 传感器	PSD-1515	分辨率为 $1\ \mu\text{m}$, 响应光谱范围为 $380 \sim 1\ 100\ \text{nm}$	无
点激光器	YD-D650P50-A22-110	波长 $650\ \text{nm}$, 功率范围为 $0 \sim 80\ \text{mW}$	可调功率点激光器
镜头	Computer M1214-MP2	焦距 $12\ \text{mm}$	无
步进电机 1	28BYJ-48	步矩角 5.625°	驱动反射镜
振镜	银膜振镜	直径 $12.7\ \text{mm}$, 厚度 $2\ \text{mm}$	无
数据采集卡	NI cDAQ-9178	无	无
步进电机 2	57H2P8440A4	步矩角 1.8°	驱动运动控制部分

焊件水平固定在整体框架的底部平台上;光电传感部分由运动控制部分驱动,以一定的速度纵向移动。数据采集卡将 PSD 传感器及处理模块输出的信号传送给计算机,处理得到坡口的实时位置。

1.2 光路设计

根据本系统的设计原理,系统的光路可从两个

方向分解正视方向与侧视方向。正视方向与直线坡口延伸方向平行,侧视方向与直线坡口延伸方向垂直。

图3为光路设计原理图。图3a为正视方向的光路。由于点激光来回横扫坡口,在 PSD 上可以得到反射点的活动范围 φ ,推导出 φ 与电机做往复运动的旋转

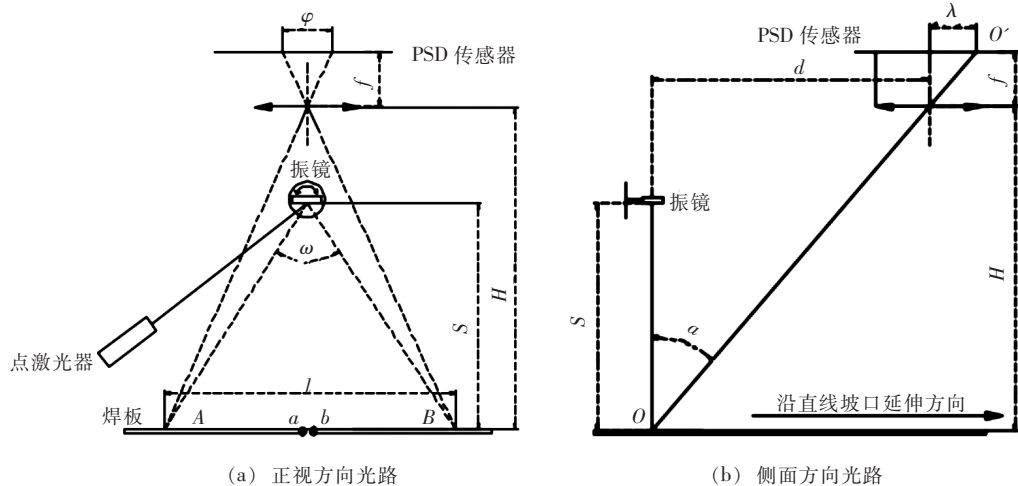


图3 光路设计原理图

角 ω 的关系如式(1)所示:

$$\tan \frac{\omega}{2} = \frac{H\varphi}{2Sf} \tag{1}$$

式中: $\varphi < \sqrt{2}l$, l 为 PSD 的边长。当 $\varphi = \sqrt{2}l$ 时,可得到最大旋转角 ω_0 ,结合实际取合适的旋转角 ω 且 $\omega < \omega_0$,得到实际光点在坡口附近的扫描范围为点 A 与点 B 的距离 l 。其中 a, b 分别是坡口的边沿两点。图 3b 为侧视方向的光路。测量原理为激光三角法,有两种入射方式,分别为直射式和斜射式两种,其中直射式能够使结构紧凑,在 PSD 芯片上感知强度/感光效果好,因此选择前者。点 O 在 PSD 上的投影为点 O' ,点 O 与 PSD 中心的距离为 λ ,反射角 α 可由式(2)求得:

$$\tan \alpha = \frac{d}{H} = \frac{\lambda}{f} \tag{2}$$

根据试验观察,若镜头光轴、电机轴和坡口中心点垂直共线,当激光扫描到坡口位置(图 3 点 $a-b$)时,反射的光强达到最大,此时 PSD 的输出信号受到干扰,影响数据采集。经试验研究,设计如图 4 所示的光路,将振镜向右偏移距离 l_0 ,避免了强光的干扰。改进的正视方向光路的振镜旋转角度 ω 与 l_0 的关系如式(3)所示:

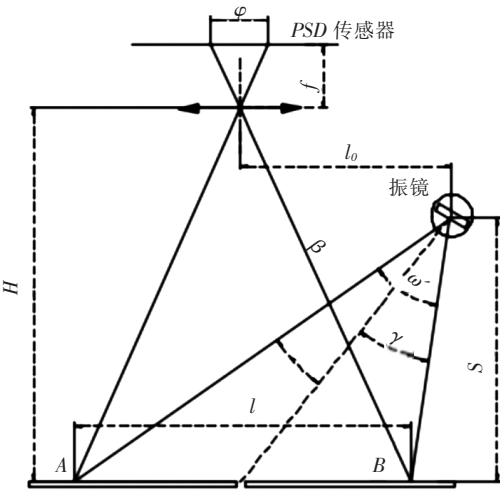


图 4 改进的正视方向光路示意图

$$\omega' = \tan^{-1} \left(\frac{2l_0 + l}{2S} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2l_0 - l}{2S} \right) \tag{3}$$

当坡口中心位置不在镜头正下方时,可调节 β 和 γ 的值改变点激光器的扫描范围,避免调整振镜位置。

1.3 系统校正

二维 PSD 传感器可测量光斑在平面上的实时位置,结构原理如图 5 所示,其光敏面近似为正方形(图 5 中阴影区域),有两对电极作为输出。由于二维 PSD 表面材料的不均匀性,导致其光敏面易产生畸变,且离光敏面中心越近,畸变越小。光敏面边缘区域可采用改进的三次插值算法减小误差。

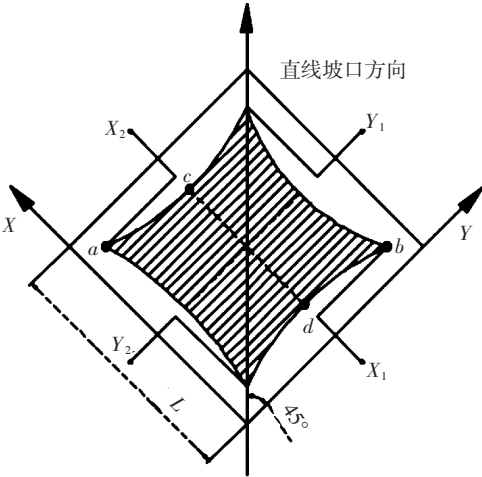


图 5 PSD 芯片光敏面的位置分布图

在坡口信号识别系统中,PSD 采集到的光斑集近似为一条直线,观察到光敏面对角线 ab 的距离明显大于光敏面两边 cd 的距离,为了更大程度的利用 PSD 传感器的光敏面,转动 PSD 芯片,使其对角线 ab 与直线坡口方向垂直,PSD 芯片的 x, y 坐标轴分别在直线坡口方向的左右且呈 45° 夹角。

为了确定系统的各个参数,以厚度 1 mm 的铝板为研究对象,设置直线坡口间距 1 mm。根据对光路的分析,结合实际,各参数取值见表 2,由式(1)、式(2)、式(3)可求得反射角 α 为 9.46° ,振镜旋转角 ω' 为 28.01° 。

表 2 各参数取值(对象为铝板时)

反射点的活动范围 φ/mm	PSD 焦距 f/mm	投影点与 PSD 中心的距离 λ/mm	光斑直径 d/mm	焦点高度 H/mm	振镜高度 S/mm	偏移距离 l_0/mm	光点扫描范围 l/mm	激光器功率 P/mW	振镜频率 f_0/Hz
6	12	2	25	150	109	70	75	50	2

2 坡口角点识别模型研究

根据试验的参数进行了试验,将得到的结果进行处理。

2.1 坡口角点识别算法

PSD 传感器输出信号是点激光映射在 PSD 传感器上的光斑坐标,半个周期内 PSD 传感器采集到的扫描轨迹对应图 3a 的点 A 到点 B,由此可知半周期内 PSD 采集的有效长度为点 A 与点 B 在 PSD 传感器上的映射线段。

基于所描述的平台进行试验,图 6 为振镜扫描半个周期采集到的点集合,从图像上可以观测到坡口的信息,但由于坡口及其边界的反射,其反射光变得杂乱,故无法从图像中得到精确的坡口位置。

根据二维 PSD 的特点,将点集的 x, y 坐标分别与时间做曲线图。图 7 是 3 个完整周期的坐标 - 时间曲线。黑色圈内的突起即为坡口信息。将一个周期的曲

线放大,如图 8 所示,为方便描述算法,假设当 x - 时间曲线为上升趋势时,振镜扫描方向为图 7 中的点 A 到点 B;当 x - 时间曲线为下降趋势时,振镜扫描方向相反。

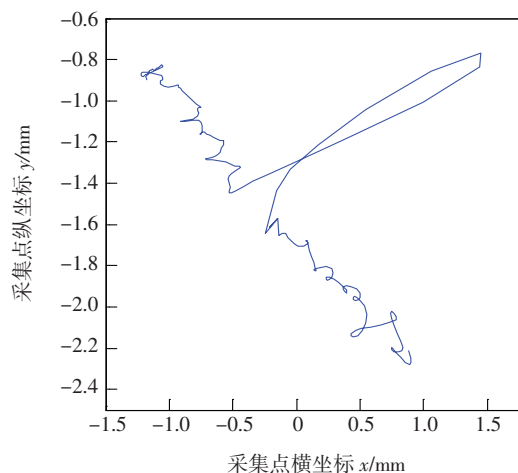


图 6 半周期 PSD 采集的点坐标集合

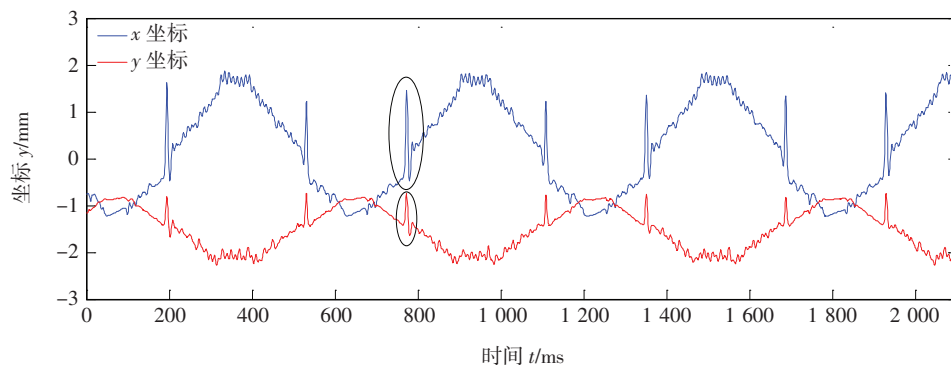


图 7 x, y 坐标随时间变化曲线

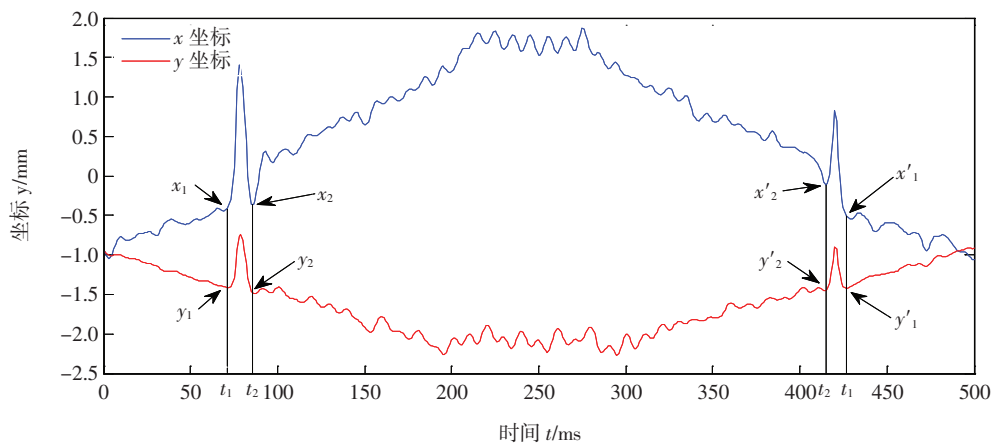


图 8 扫描周期坐标 - 时间曲线图

通过对曲线的观察,当激光点由 a 运动到 b 时,由于曲线呈上升趋势,而坡口边沿点 a 的 x 和 y 坐标均处于突增的位置,不易判断其具体值,而 y - 时

间曲线此时呈下降趋势,故可根据点 a 的 y 坐标在图 8 中对应的时间 t_1 , $t = t_1$ 直线与 x - 时间曲线的交点的横坐标即为点 a 的 x 坐标。类似的,点 b 的 x

坐标根据 x -时间曲线得到 t_1 , 由 $t = t_2$ 与 y -时间的曲线交点得到 y 坐标。当 x -时间曲线呈下降趋势时同理。由此可计算得到坡口边沿的两点坐标 $a(x_1, y_1), b(x_2, y_2)$, 坡口中心点即为 a, b 两点的中点。

由坡口边沿点 a 和 b 在 PSD 感光面上的坐标及两点之间的距离 ξ , 根据成像原理式(4)可以计算出坡口的间距值 ψ 。坡口间距算法如图 9 所示, 即根据坡口点

$$\frac{\psi}{\xi} = \frac{H}{f} \quad (4)$$

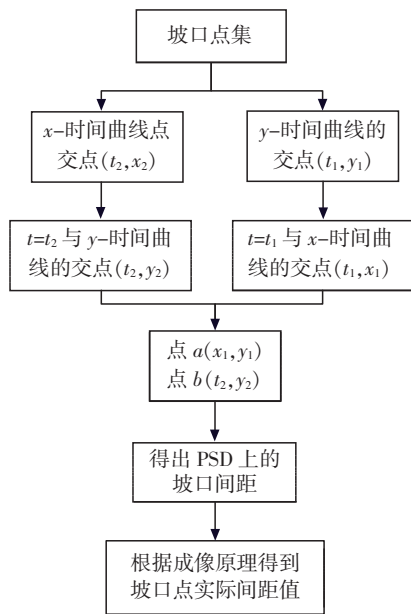


图 9 坡口间距算法流程图

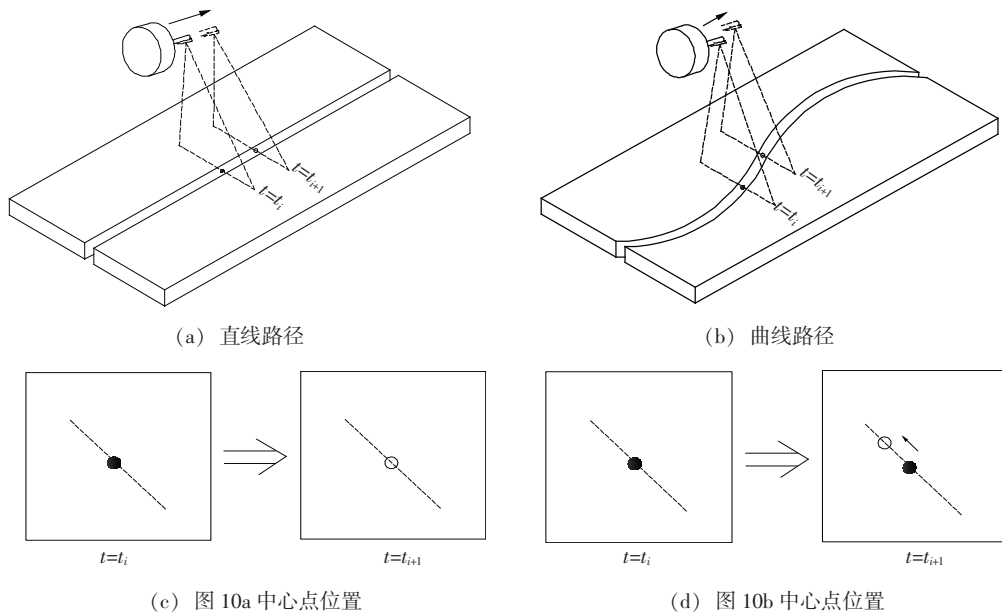


图 10 直线轨迹和曲线轨迹及其坡口位置变化

集成像算出坡口实际距离。

2.2 坡口轨迹拟合算法

在实际焊接过程中, 坡口位置不是一成不变的, 其可能会存在空间上的位移, 即同时存在平面和高度两种位移变化。焊枪是根据坡口位置的变化而移动, 故需要分析坡口的轨迹, 即 t_{i+1} 得到的坡口位置较 t_i 位置的位移变化。

坡口轨迹在平面空间存在直线和曲线两种变化, 黑白两点分别是 $t = t_i$ 和 $t = t_{i+1}$ 时的坡口位置。图 10c 是图 10a 所示的直线路径下, t_i, t_{i+1} 两次扫描坡口得到的坡口中心点位置, 与 $t = t_i$ 相比, $t = t_{i+1}$ 时坡口中心点没有发生位移。类似的, 图 10d 是图 10b 所示的曲线轨迹下, t_i, t_{i+1} 得到的坡口中心点位置, $t = t_{i+1}$ 时, 坡口中心点的位置存在位移, 且坡口中心点的位移仅在扫描得到的直线方向上。

图 11 描述了 PSD 采集的点坐标转化为坡口轨迹的过程: 当 $t = t_i$ 时, 坡口在 PSD 光敏面的投影点 $Q_i(x, y)$, 经过坐标变换公式(5)得到 $Q_i(x, y)$, 再由光路推算得出点 Q_i 在焊板上的坐标。随着 PSD 以速度 v 进行匀速直线运动, 当 $t = t_{i+1}$ 时, 可同理推算出点 Q_{i+1} 的坐标。以此类推, 最终可得到一系列的坡口中心点坐标, 接下来对这些点进行拟合。

$$\begin{cases} x_1 = x \cos \phi + y \sin \phi \\ y_1 = y \cos \phi - x \sin \phi \end{cases} \quad (5)$$

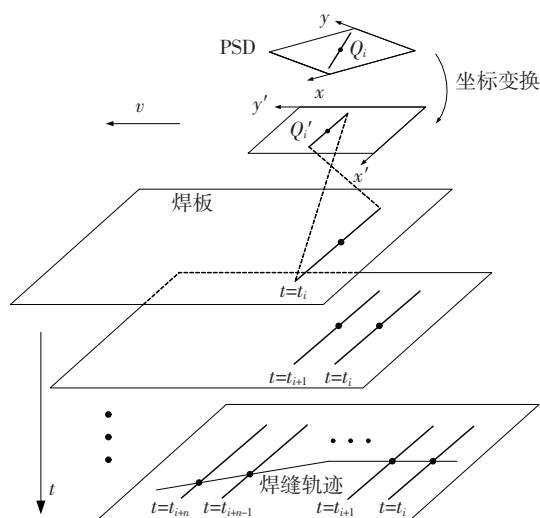


图 11 PSD 坐标转化为坡口轨迹示意图

3 试验及结果

在厚度 2 mm 的 100 mm × 100 mm 的铝板 2A21 试验样板上,分别按照直线和式(6)的正弦曲线加工深度为 1 mm、宽度为 4 mm 的沟槽作为直线坡口和曲线坡口,选取表 3 的 5 点位置标记采样,并计算出坡口宽度值,分析表 3 得激光-PSD 测量曲线轨迹和直线坡口宽度均差分别为 0.025 4,0.003,直线轨迹坡口宽度人工测量值均差为 0.021 6。可见,曲线与直线坡口轨迹相比,曲线轨迹和人工测量直线坡口的角点集的轨迹方程均差均超过 0.02 比较大,直线轨迹下的均差较小。

$$y = 4 \sin \frac{\pi}{3} x \quad (6)$$

表 3 曲线坡口与直线坡口取样点坡口宽度(铝板) mm

取样点	曲线坡口	直线坡口	测量值
0	4.006	3.996	4.015
$\pi/2$	4.064	4.001	4.016
π	4.004	4.003	3.971
$3\pi/2$	3.952	3.998	3.952
2π	4.005	4.003	4.001

由此说明该系统对直线的角点采集效果更好。这是由于振镜扫描方向与斜线和曲线轨迹呈现一定程度的夹角,角点提取过程中存在一定的误差,导致对斜线和曲线的均差稍逊于直线。总体来讲,通过文中建立的系统,同时运用提出的算法,可以准确找出分段点,并能实现对薄板对接坡口轨迹的拟合。

4 结论

(1)与 CCD 系统相比,使用相同功率的激光器,PSD 系统中点激光的光强大于 CCD 系统中的结构光,PSD 采集到的信号干扰更小。

(2)系统中的振镜可以根据坡口的变化,通过控制电机旋转角度改变图 4 中 α, β 的角度,改变点激光扫描范围,避免移动元件破坏光路。

(3)相对于采用 CCD 相机的传统机器视觉方法,后续处理数据量小,速度快,成本上有所降低。

(4)拟合坡口轨迹,精确识别坡口位置,并能预测坡口轨迹的发展。

参考文献

- [1] 余卓骅,胡艳梅,何银水. 薄板机器人自动焊接焊枪三维偏差的有效提取[J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 49 - 53.
- [2] 孙博文,朱志明,郭吉昌,等. 基于激光结构光的视觉传感器的图像处理技术研究应用及展望[J]. 焊接, 2018(9): 10 - 14.
- [3] Seiler M, Patschger A, Bliedner J. Investigations of welding instabilities and weld seam formation during laser microwelding of ultrathin metal sheets [J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022417.
- [4] Yu Z H, He Y S, Xu Y L, et al. Vision-based deviation extraction for three-dimensional control in robotic welding with steel sheet [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1-4): 23 - 49.
- [5] Shao W J, Huang Y, Zhang Y. A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 99: 39 - 51.
- [6] 鲁建波,徐培全,姚舜,等. 圆形扫描结构光传感器的标定和焊缝检测[J]. 焊接学报, 2006, 27(4): 53 - 56.
- [7] 文晓江,刘春,赵琳,等. 激光-PSD 传感器在焊缝跟踪中的应用[J]. 传感器技术, 2001, 20(5): 41 - 43.

第一作者简介: 杨秀芝,1974 年出生,博士,副教授;主要从事焊接新材料、新工艺、3D 打印设备与新工艺开发的研究。

通信作者简介: 张锐,1974 年出生,博士,副教授;从事人工智能、智能装备与制造方面的教学与科研。

(编辑:曲畅)