



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.05

基于线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统研究

孙超¹, 费大奎², 李荣², 王子然³, 尤勇⁴, 刘厚涛⁵, 谷森^{6*}

1. 中车大连机车车辆有限公司车体分厂, 辽宁 大连 116022
2. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028
3. 哈尔滨商业大学, 黑龙江 哈尔滨 150028
4. 苏州大学, 江苏 苏州 215021
5. 南京亿涛科技有限公司, 江苏 南京 210008
6. 常州大学, 江苏 常州 213164

摘要: 目前国内客车踏板焊接以人工为主, 自动化程度低, 研发面向客车踏板自动化焊接系统, 实现客车踏板的智能制造具有实际意义。基于直射式激光三角测量法原理设计线激光3D相机, 提出一种优化Steger光条中心算法提取激光中心线, 完成3D相机的内参、畸变参数及激光平面参数标定, 并采用标准陶瓷球规验证其扫描精度。搭建由自研线激光3D相机、ABB机械手、焊接电源及焊枪组成的自动化焊接系统, 完成手眼标定, 设计包含包含点云处理、轮廓角点提取、焊缝坐标匹配及焊接姿态规划的客车踏板焊缝路径规划方法。最终对客车踏板实物进行自动化焊接试验, 并通过电磁无损探伤评价焊缝质量。优化Steger算法的激光中心线提取时间为0.6 s, 优于传统算法的1.3 s; 自研3D相机扫描精度达0.2 mm, 球面度与空间距离测量最大误差分别为0.319 5 mm、0.325 7 mm; 所搭建系统的客车踏板焊接成功率达87.5%, 焊缝成形良好。研究表明, 该自动化焊接系统可实现客车踏板的自动化焊接, 满足企业生产要求, 为同类构件的自动化焊接提供了技术参考。

关键词: 客车踏板; 线激光3D相机; 自动化焊接; 视觉引导; 焊缝路径规划

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0048-08

Research on Automated Welding System for Bus Pedal Based on Line Laser 3D Camera Vision Guidance

SUN Chao¹, FEI Dakui², LI Rong², WANG Ziran³, YOU Yong⁴, LIU Houtao⁵, GU Sen^{6*}

1. CRRC Dalian Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Carbody Branch Factory, Dalian 116022, China
2. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China
3. Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China
4. Soochow University, Suzhou 215021, China
5. Nanjing Yitao Technology Co., Ltd., Nanjing 210008, China
6. Changzhou University, Changzhou 213164, China

Abstract: Currently, the welding of bus pedals in China is predominantly manual, with low automation levels. Developing an automated welding system for bus pedals holds practical significance for achieving intelligent manufacturing. This study

收稿日期: 2025-06-30 修回日期: 2025-10-16

基金项目: 常州市科技计划应用基础研究专项一般项目, 智能制造龙城实验室资助(CJ20242058)

作者简介: 孙超(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事机车车体钢结构设计制造的研究。

通讯作者: 谷森(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事自动化焊接设备的研究。E-mail: changzhou1989@cczu.edu.cn。

designs a line laser 3D camera based on the principle of direct laser triangulation. An optimized Steger algorithm for light strip center extraction is proposed. Calibration of the 3D camera's internal parameters, distortion parameters, and laser plane parameters was completed, and its scanning accuracy was verified using a standard ceramic ball gauge. An automated welding system, consisting of a self-developed line laser 3D camera, an ABB robot, a welding power supply, and a welding torch, was constructed. Hand-eye calibration was performed. A weld seam path planning method for bus pedals, encompassing point cloud processing, contour corner point extraction, weld seam coordinate matching, and welding posture planning, was designed. Finally, automated welding tests were conducted on actual bus pedals, and weld quality was evaluated via electromagnetic non-destructive testing. The optimized Steger algorithm achieved a laser centerline extraction time of 0.6 s, outperforming the traditional algorithm's 1.3 s. The self-developed 3D camera demonstrated a scanning accuracy of 0.2 mm, with maximum errors in sphericity and spatial distance measurement being 0.3195 mm and 0.3257 mm, respectively. The success rate of bus pedal welding using the developed system reached 87.5%, with well-formed welds. The research indicates that this automated welding system can achieve automated welding of bus pedals, meeting production requirements and providing a technical reference for the automated welding of similar components.

Keywords: bus pedal; line laser 3D camera; automated welding; vision guidance; weld seam path planning

引用格式:孙超,费大奎,李荣,等. 基于线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统研究[J]. 电焊机,2026,56(2):48-55.

Citation:SUN Chao, FEI Dakui, LI Rong, et al. Research on Automated Welding System for Bus Pedal Based on Line Laser 3D Camera Vision Guidance[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 48-55.

0 引言

客车踏板是车身关键承载结构件,其焊接质量直接影响车身结构强度与乘客安全。现阶段国内客车踏板焊接仍以人工操作为主,该方式高度依赖焊工的操作经验^[1],存在工艺稳定性差、生产效率低、质量一致性无法把控等问题,已无法满足现代客车规模化、定制化的生产需求。虽有部分企业采用焊接机器人结合人工示教^[2]的方式进行客车踏板焊接,相较于人工焊接提高了生产效率,但该模式对工件装夹精度要求严苛,适应性不强,焊接质量依赖人工示教。

视觉引导技术的发展为焊接自动化的升级提供了有效路径,将视觉传感器与焊接机器人集成^[3],通过视觉系统实现焊缝的精准识别、定位与路径规划,目前有很多学者为了提高焊接效率和焊接质量,可大幅提升焊接机器人的自适应能力与焊接精度,现已在舰船、核电等高端装备制造的自动化焊接中得到成功应用。马韬等人^[4]将双目工业相机与线激光传感器集成到焊接机器人系统中,完成对舰船高反光小组立构件的自动化焊接,提升了舰船制造的自动化和生产效率。沈天阔等人^[5]将激光传感器与焊接机器人系统集成,实现对核电蒸汽发生器

管子-管板全自动焊接,有效保障了核电蒸汽发生器焊接质量和焊接效率。

针对某企业对客车踏板自动化焊接的实际需求,本文研发了一套线激光3D相机视觉引导的客车踏板自动化焊接系统。首先根据直射式激光三角测量法原理设计线激光3D相机,提出一种优化Steger中心线提取算法提取线激光中心线,对线激光3D相机参数与激光平面参数进行标定,采用标准陶瓷球规仪对线激光3D相机扫描精度进行验证;然后基于线激光3D相机搭建焊接系统,对系统进行手眼标定,并设计开发客车踏板焊缝路径规划;最后采用搭建的线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统对客车踏板焊缝实物进行焊接,采用电磁无损探伤评价焊缝质量。

1 线激光3D相机开发

1.1 成像原理

图1a是开发的线激光3D相机内部主要组成,包括线激光发射器和2D相机,其成像原理是基于直射式光学三角法^[6]。线激光发生器发出一条激光线,该激光线在三维空间形成一个平面,并与待测物体的表面轮廓相交,形成随表面形貌形变的激光

线,其形变程度与待测物体表面轮廓有关;另一侧的2D相机同步采集形变激光线的数字图像,提取激光线条纹中心的像素坐标,结合系统标定获得像素坐标系与线激光空间坐标系的转换关系,将像素坐标转化为空间三维坐标,见图1b,最终实现待测物体表面的三维形貌重构。以待测物体激光条纹上任意点的A点为例,它在相机坐标系上的坐标记为 $A(X_C, Y_C, Z_C)$,该点与相机光心坐标会形成一条射线方程

$$l(x, y, z) = \begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

A点是激光平面上的点,也满足激光平面方程:

$$p(x, y, z) = A_3x + B_3y + C_3z + D_3 = 0 \quad (2)$$

由此可以求出A点在相机坐标系下坐标 $A(X_C, Y_C, Z_C)$ 。

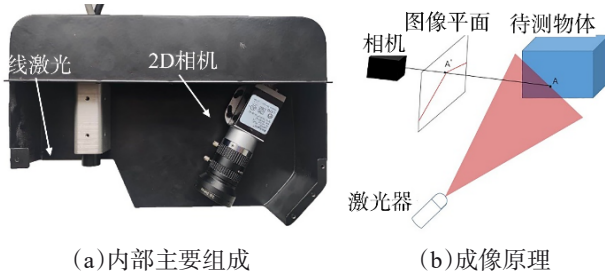


图1 线激光3D相机

Fig. 1 Line laser 3D camera

1.2 线激光中心线提取

线激光在待测物体表面的投影具有一定的宽度,为保证三维重构精度,需精准提取激光条纹中心代替相对较宽的激光。Steger提出的基于Hessian矩阵的中心线提取算法^[7]具有较强的抗噪能力与良好的鲁棒性,但是需对整幅图像进行4次以上的二维高斯卷积运算,计算量庞大,降低了3D相机对客车踏板的点云数据采集效率,难以适配自动化焊接的实时性需求。

针对上述问题,本文提出一种优化Steger中心线提取算法:一是利用激光条纹灰度值明显高于其他区域的特点进行阈值分割预过滤,设定灰度值阈值为100,快速过滤背景无效区域,减少有效计算范围^[8]。阈值分割公式为:

$$h(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) > 100 \\ 0, f(x, y) < 100 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(x, y)$ 为图像原始像素灰度值; $h(x, y)$ 为阈值处理后的像素灰度值。然后对阈值分割后的图像进行膨胀处理,再与原图像做融合预计算,处理效果如图2所示。

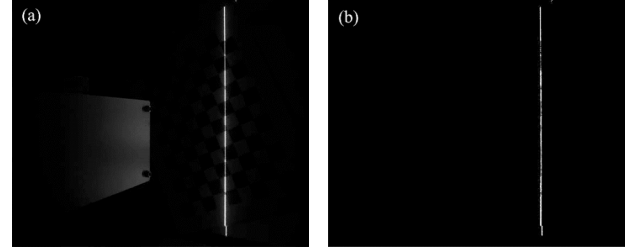


图2 (a)原激光线;(b)激光线光条处理效果

Fig. 2 (a) The original laser line (b) Laser strip processing

二是针对Steger法计算速度慢的问题,将二维高斯卷积拆分成两次一维卷积,使乘法运算量由 $n \times n$ 减少到 $2n$,计算出Hessian矩阵参数 $H(x, y)$ 。

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

以Hessian矩阵最大特征值对应的特征向量 (n_x, n_y) 作为激光线的法线方向,以像素点 (x_0, y_0) 为基准点,求解激光线中心的亚像素坐标:

$$(p_x, p_y) = (x_0 + n_x, y_0 + n_y) \quad (5)$$

本算法的线激光中心线提取结果效果如图3所示,提取时间为0.6 s,优于Steger提取法时间1.3 s。

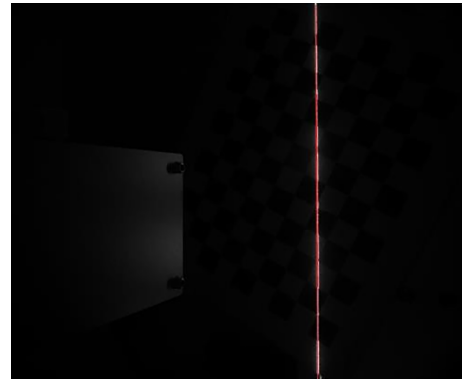


图3 线激光中心线提取效果

Fig. 3 Line laser centerline extraction

1.3 标定

线激光3D相机的标定包括相机参数标定以及激光平面参数标定。相机参数标定采用规格为 11×8 的方格形标定板,每个方格的边长为20 mm,将标定板放置在相机视野范围内,并加载10幅用于标定相机的标定板图像,见图4。

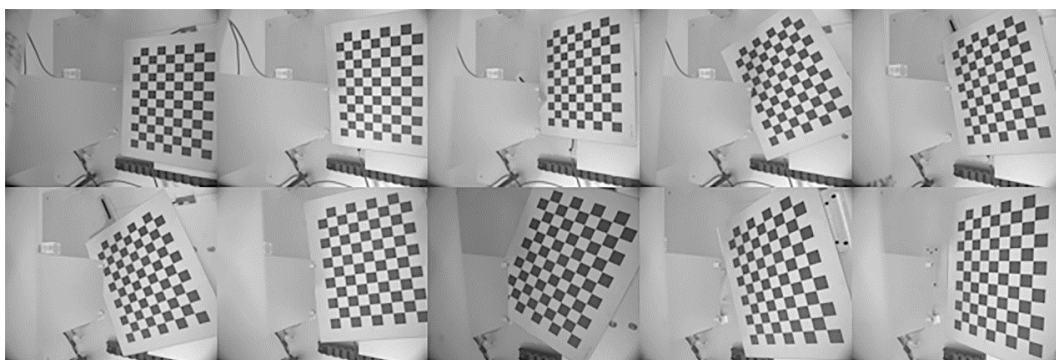


图4 标定板图像

Fig. 4 Calibration plate images

首先调用 $cvFindChessboardCorners()$ 函数找到并求出角点的像素坐标,结合 $Harris$ 角点检测算法,通过 $cvFindCornerSubPix()$ 实现角点的亚像素坐标提取,如图5所示。 $Harris$ 角点响应函数为:

$$dst(x,y) = \det M^{(x,y)} - k \cdot (tr M^{(x,y)})^2 \quad (6)$$

式中 $M(x,y)$ 为每个像素 (x,y) 在领域内计算 2×2 梯度的协方差矩阵; k 为经验常数。最后调用 $cvCalibrateCamera2()$ 函数计算相机内参与径、切向畸变参数,标定结果如表1所示,为后续图像畸变校正与坐标精准转换提供基础参数。

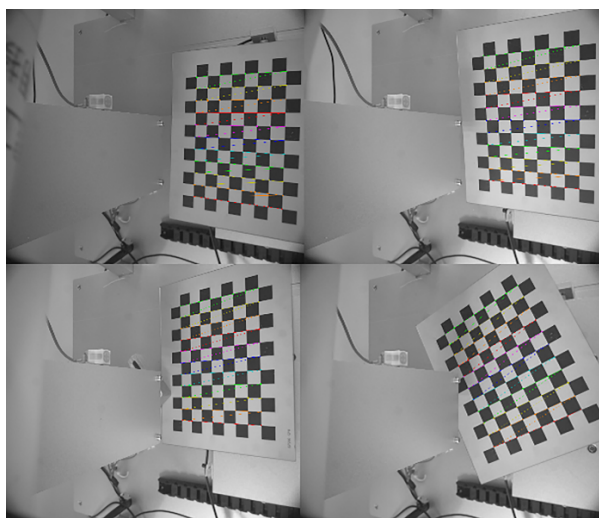


图5 角点提取图像

Fig. 5 Corner extraction images

表1 相机的内参及畸变参数

Table 1 Camera intrinsic parameters and distortion parameters

参数名称	参数
相机内参	$\begin{bmatrix} f_x & 0 & u \\ 0 & f_y & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2252.4212 & 0 & 1242.1407 \\ 0 & 2249.6827 & 992.7619 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
径、切向畸变参数	$[-0.0900 \quad 0.1531 \quad 0.0009 \quad 0.0006 \quad -0.1725]$

目前激光平面标定方法有三维靶标定法、平面靶标定法以及一维靶标定法^[9]、细丝散射法^[10]、基于直角靶标定法^[11],这些标定法需要精密的测量设备,对靶标精度要求高,标定过程复杂。本文提出基于带激光线方格形标定板的简易激光平面标定方法,原理如图6所示。

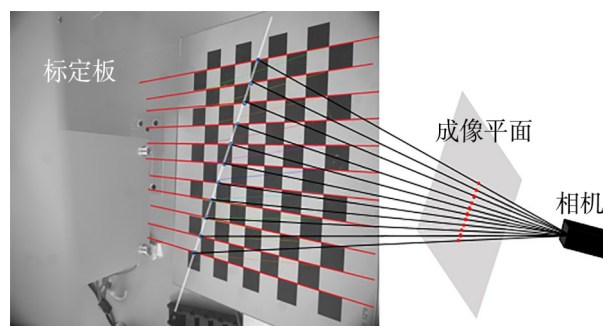


图6 激光平面标定原理

Fig. 6 Laser plane calibration principle

首先通过前述优化算法提取标定板激光条纹的中心线像素坐标,拟合得到图像坐标系下的激光线方程;其次对进行完角点提取的标定板图像进行角点直线拟合,得到角点直线方程,联立激光线直线方程与角点直线方程求解图像坐标系下角点直线与激光直线的交点坐标,交点个数与角点拟合直线的条数一致;最后将图像坐标系下角点直线与激光直线的交点坐标转换成相机坐标系下角点直线与激光直线的交点坐标,并通过最小拟合方法计算这些交点坐标,得到线激光平面方程,见式(2)。

标定板一共有 m 个位置,移动标定板置于第 i 处,线激光平面和标定板平面的交线 L_i ,在直线 L_i 均匀选取 n 个点,第 j 个点在相机坐标系中的坐标为 $(X_{Cij}, Y_{Cij}, Z_{Cij})$,建立目标函数见式(7)

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|AX_{Cij} + BY_{Cij} + CZ_{Cij}\|^2 \quad (7)$$

使用最小二乘法方法求解激光平面参数, 见式(8)

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij}^2 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij} Y_{Cij} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij} Z_{Cij} \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij} Y_{Cij} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{Cij}^2 & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{Cij} Z_{Cij} \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij} Z_{Cij} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{Cij} Z_{Cij} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Z_{Cij}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{Cij} \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{Cij} \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Z_{Cij} \end{bmatrix} \quad (8)$$

保持图3中的标定板位置, 对其打开激光线进行图像拍摄, 并对10幅带有激光线的标定板图像进行线激光中心线提取, 见图7, 对提取的中心线进行直线拟合, 求解图像坐标系下直线方程。



图7 激光线中心线提取

Fig. 7 Laser line centerline extraction

根据角点图像拟合标定板上的角点直线, 见图8, 激光线与每一副图像角点连线均产生11个交点, 联立这些方程求解图像坐标系下角点坐标, 并转换成相机坐标系下坐标。

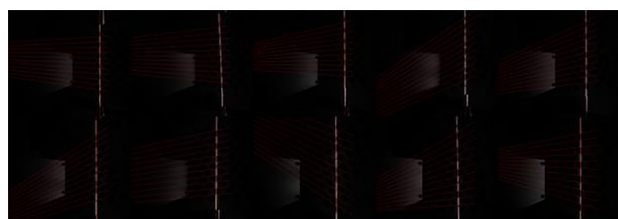


图8 标定板角点拟合

Fig. 8 Calibration plate corner fitting

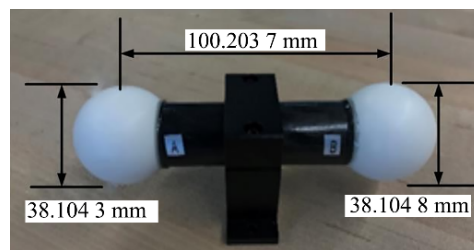
采用最小二乘法拟合这110个交点, 求解激光平面方程参数, 得到线激光平面方程:

$$-1.9284x + 0.00799y - 218.4163z + 1 = 0 \quad (9)$$

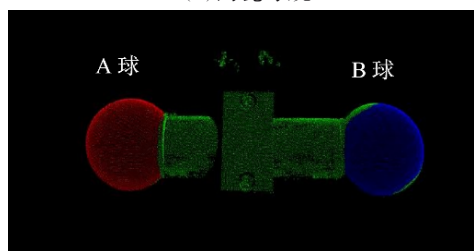
1.4 验证

采用标准陶瓷球规仪对设计的线激光3D相机的扫描精度进行验证。标准陶瓷球规仪见图9a, 其标准值来自国家高新技术计量站标准报告, 使用该标准值与测量值进行对比验证开发的线激光3D相机精度。将陶瓷球规仪摆放不同位置, 并对其进行

点云采集。计算A球和B球的直径, 一共测试10组, 图9b中红色为PCL开运库单独圆球拟合算法对A球拟合的效果图, 蓝色为B球拟合的效果, 实验最大误差0.319 5 mm, 标准差小于0.24 mm。A球和B球之间的距离测试最大误差为0.325 7 mm, 测量标准差小于0.264 1 mm。实验结果表明, 线激光3D相机的扫描精度达到0.2 mm。



(a) 陶瓷球规



(b) 拟合结果

图9 线激光3D相机扫描精度验证

Fig. 9 Line laser 3D camera scanning accuracy verification

2 线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统搭建

图10为基于线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统, 主要由自研的线激光3D相机, ABB机械手(IRB2600), MIG-350M焊接电源, YT-30MFW2HPE焊枪组成。

系统采用3D相机固定、机器人引导焊枪随动的布局形式, 需要对机器人基坐标系到3D相机坐标系进行转换, 即求出 $X = T_{B-C}$ 。该系统中有两个变量是不变的, 分别是: ①相机与机器人基座之间的坐标转换 T_{B-C} 保持恒定; ②标定板与机械臂末端之间的坐标转换 T_{E-O} 始终保持不变。其中B表示基础坐标系(Base), C表示相机坐标系(Camera), O表示标定板(Object), E表示末端执行器(End)。移动标定板位置处于相机视野下拍摄两次标定板图像。将 T_{E-O}

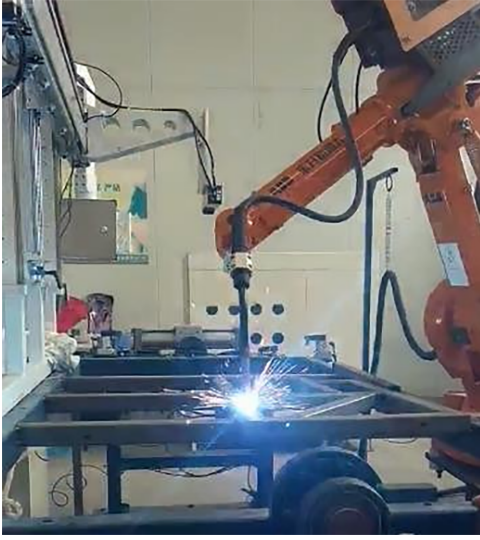


图10 线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统

Fig. 10 Line laser 3D camera vision-guided bus pedal automated welding system

按照前后两次运动展开得到

$$T_{E_1 \rightarrow B} T_{B \rightarrow C} T_{C \rightarrow O_1} = T_{E_2 \rightarrow B} T_{B \rightarrow C} T_{C \rightarrow O_2} \quad (10)$$

$$(T_{E_2 \rightarrow B})^{-1} T_{E_1 \rightarrow B} T_{B \rightarrow C} T_{C \rightarrow O_1} = T_{B \rightarrow C} T_{C \rightarrow O_2} \quad (11)$$

$$(T_{E_2 \rightarrow B})^{-1} T_{E_1 \rightarrow B} T_{B \rightarrow C} = T_{B \rightarrow C} T_{C \rightarrow O_2} (T_{C \rightarrow O_1})^{-1} \quad (12)$$

$$\text{式(12)中, } (T_{E_2 \rightarrow B})^{-1} T_{E_1 \rightarrow B} = A, T_{C \rightarrow O_2} (T_{C \rightarrow O_1})^{-1} = B,$$

式(12)可以简化为

$$AX = XB \quad (13)$$

求解 X

$$X = \begin{pmatrix} R_{BC} & T_{BC} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(14)中 R_{BC} 为旋转矩阵, T_{BC} 是平移向量,手眼标定结果见表2。

表2 手眼标定结果矩阵

Table 2 Hand-eye calibration matrix

名称	标定结果
手眼标定矩阵	0.9245
	0.1744
	-0.3345
	134.4563
	0.1945
	0.4635
	0.8732
	0.9864
	0.3086
	-0.8246
	0.4467
	-112.6740
	0
	0
	0
	1

3 焊接路径规划

线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接需要焊接系统识别并提取焊缝轮廓信息,引导焊枪在焊缝路径进行运动。本研究的焊接路径规划分

为焊缝轮廓角点提取、焊接路径生成及焊接姿态计算三个步骤。

首先提取客车踏板焊缝轮廓角点坐标。由于线激光3D相机与客车踏板安装位置存在倾斜角度,采集到的踏板点云数据包含厚度维度信息,易干扰焊缝边缘特征提取,需要将客车踏板点云数据投影至二维平面上,图11a为客车踏板深度图像。采用Canny算子对客车踏板深度图像进行轮廓提取,结果见图11b。直接对全部轮廓点进行直线拟合求解角点,会引入大量无效点导致计算冗余,因此进一步对整体轮廓进行内外轮廓分割处理。调用FindContours()函数对内外轮廓进行分割,内外轮廓提取信息结果见图11c。轮廓提取完成后,采用霍夫变换对每个轮廓进行直线拟合,求解各轮廓的直线方程;再两两求解并过滤多余的角点,最终获得能用于焊接定位的有效角点坐标,见图11d。

焊接路径规划的关键是确定每条焊缝的起始点与终止点。将图11d中相机坐标系下提取的32个有效轮廓角点按自右向左、从上到下的顺序进行编号,见图12,并根据客车踏板的焊接工艺要求,将角点进行两两配对,确定每条焊缝的起止点对应关系,如表3所示。以每一组配对角点为焊缝的首尾位置,通过空间直线方程拟合焊接路径,空间直线公式见(15)。

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (15)$$

最后计算ABB机械手的焊接姿态。设定焊枪与焊接平面呈75°夹角,与焊接路径的法线方向呈90°夹角;设极坐标系下焊枪坐标点位置为 Q ,方向向量为 Q' ,焊接初始点在机器人坐标系下坐标为 P ,设机器人坐标系下方向向量为 V 。

$$V = \frac{P-Q}{\|P-Q\|} \quad (16)$$

对工具坐标系进行调整

$$Z_T = V \times Q' \quad (17)$$

$$\begin{cases} \langle X_T, Q' \rangle = 75^\circ \\ X_T \cdot Z_T = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Y_T \cdot Z_T = 0 \\ Y_T \cdot X_T = 0 \end{cases} \quad (19)$$

ABB机器人末端执行器的位姿是依靠Y轴、Z

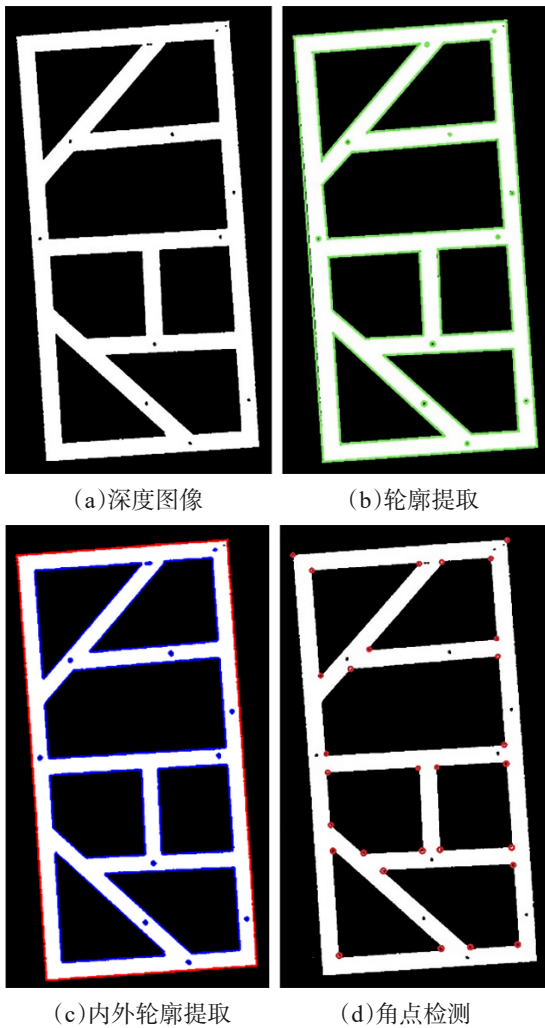


图 11 客车踏板图像处理

Fig. 11 Bus pedal imaging processing

表 3 焊接点对应关系

Table 3 Correspondence of welding points

焊点	对应焊点	焊点	对应焊点
0	2	15	16
1	5	18	22
3	4	19	24
6	8	20	21
7	9	23	25
10	11	26	29
12	14	27	28
13	17	30	31

轴旋转得到,从式(18)、(19)可以得到 ABB 机器人手完成位姿矩阵 T 。

$$T=[T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6] \quad (20)$$

给定空间坐标系 $P(x,y,z,a,b,c)$, ABB 机器人根据式(20)完成位姿计算。

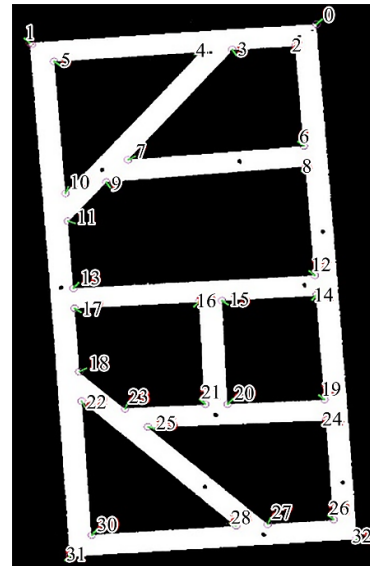


图 12 客车踏板轮廓点标号

Fig. 12 Bus pedal contour point numbering

4 实验验证

采用自研的线激光 3D 相机视觉引导客车踏板焊缝自动化焊接系统在某企业现场对客车踏板实物进行焊接,焊缝一次成形美观,焊缝饱满无缺口,如图 13 所示。采用电磁无损探伤方法评价每一道焊缝质量,激励线圈输入 10 V 电压信号,焊缝两端电压差小于 0.03 V 为合格。通过检测发现焊接功率达到 87.5%,满足企业的要求。



图 13 客车踏板焊缝实际效果

Fig. 13 The actual effect of bus pedal welding

5 结论

(1)基于直射式光学三角法设计线激光 3D 相机,提出一种优化 Steger 中心线提取方法,提取时间

为0.6 s,优于Steger中心线提取方法时间1.3 s。

(2)采用标准陶瓷球规仪验证自主开发的线激光3D相机扫描精度,球面度实验结果最大误差为0.319 5 mm,标准差小于0.24 mm,空间度实验结果最大误差0.325 7 mm,测量标准差小于0.264 1 mm。

(3)搭建线激光3D相机视觉引导客车踏板自动化焊接系统,并对客车踏板实物进行焊接,焊缝成形美观,采用电磁无损探伤的方法评估客车踏板焊缝质量,焊接成功率达到87.5%,满足企业的要求。

参考文献:

- [1] Amaechi O, Dick D C, Anga B M, et al. Design and Fabrication of Mechanical Pedal Powered Hacksaw for Engineering Workshop Practice [J]. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2022, 9 (5):69-78.
- [2] 戴开明,靖微,刘书明,等.侧板自动焊接技术研究[J].*焊接技术*,2024,53(08):61-65.
DAI K M, JIN W, LIU S M, et al. Research on Automatic Welding Technology for Side Panels[J]. *Welding Technology*, 2024, 53(08):61-65.
- [3] 钟凡.基于视觉特征的机车钢结构焊接机器人焊缝跟踪方法研究[J].*电焊机*,2024,54(09):70-76.
ZHONG F. Welding seam tracking of locomotive steel structure welding robot based on visual features [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(09):70-76.
- [4] 马韬,孙宏伟,罗进友,等.舰船高反光小组立构件智能机器人焊接系统研究[J].*电焊机*,2024,54(12):42-48.
MA T, SUN H W, LUO J Y, et al. Research on Intelligent Robot Welding System for High-Reflective Small Assembly Parts of Ships[J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(12):42-48.
- [5] 沈天阔,王翔毅,邹小平,等.核电蒸汽发生器智能焊接机器人关键技术开发与应用[J/OL].*自动化技术与应用*, 1-8[2026-02-05].<https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20250916.1520.015>.
- [6] 叶瑞乾.基于光学三角法的芯片封装凸点高度测量技术研究[D].福建:厦门大学,2022.
YE R Q. Research on Bump Height Measurement Technology of Chip Package Based on Optical Triangulation Method[D]. Fujian: Xiamen University, 2022.
- [7] Steger C. Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, 117(2):97-112.
- [8] 周富强,陈强,张广军.结构光光条提取的混合图像处理[J].*光电子·激光*,2008,19(11):1534-1537.
ZHOU F Q, CHEN Q, ZHANG G J. Composite image processing for center extraction of structure light stripe [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2008, 19(11):1534-1537.
- [9] Ye Y, Song Z. A practical means for the optimization of structured light system calibration parameters [C]//In 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), IEEE, 2016, 9:1190-1194.
- [10] 崔希民,李聪,袁德宝,等.基于拉丝法的线结构光视觉测量系统标定[J].*科技导报*,2014,32(24):64-67.
CUI X M, LI C, YUAN D B, et al. Calibration of a Line Structured Light Vision Measuring System Based on the Drawing Method[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(24):64-67.
- [11] 陈天飞,赵吉宾,吴翔.基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J].*光学学报*,2015,35(01):1-9.
CHEN T F, ZHAO J B, WU X. New Calibration Method for Line Structured Light Sensor Based on Planar Target [J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2015, 35(01):1-9.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>