

文章编号: 0253-2239(2007)12-2215-5

利用环形激光视觉传感的焊缝三维恢复*

徐培全¹ 唐新华² 芦凤桂² 张悦² 姚舜²

(¹ 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)
(² 上海交通大学焊接工程研究所, 上海 200030)

摘要: 为了实现复杂条件下的焊缝检测与跟踪,通过激光扫描技术,开发了环形激光视觉传感器,与机器人手爪一起构成焊接机器人“手-眼”系统,从而获得焊缝三维信息。改善了传统的点状或线条状激光视觉传感器信息量少、解释模糊以及跟踪方向单一等问题。研究了用于焊缝定位与跟踪的环形激光视觉传感器系统的内外参量标定,提出了实现焊缝三维计算的模型,最后,以对接接头、搭接接头、角接接头为对象进行了试验验证,并对标定精度进行了分析。结果表明:环形激光在不同的焊缝表现了不同的形态,结合标定试验结果,能够计算被检测焊缝的三维坐标,计算精度能够满足试验要求。

关键词: 机器视觉; 标定模型; 环形激光视觉传感器; 焊缝三维恢复

中图分类号: TG409 文献标识码: A

Seam Three-Dimensional Recovery Using Vision Sensor Based on Circular Laser

Xu Peiquan¹ Tang Xinhua² Lu Fenggui² Zhang Yue² Yao Shun²

(¹ College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)
(² Welding Engineering Institute, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030)

Abstract: In order to meet the requirement of seam finder and seam tracking under special conditions, using laser scanning technique, seam tracking system based on circular laser sensor is developed, cooperated with welding robot, built “hand-eye” system, and three-dimensional information for weld workpiece could be extracted, escaped from shortcomings of less information, ambiguous explanation and single tracking direction for “spot” or “line” laser trajectory. Study on calibration of vision sensor for seam position and seam tracking is carried out. Finally, real experiment for butt joints, lap joints and corner joints was carried out and the calculation precision was analyzed. The results showed, the pattern of the circular laser is different for different seam, combining with calibration results, the three-dimensional coordinates of welded joints could be determined and the precision could meet the requirement of seam tracking test.

Key words: machine vision; calibration model; circular laser sensor; three-dimensional recovery

1 引 言

焊缝定位与跟踪是焊接自动化的关键,研究主要集中在两个方面,一是针对高度不发生变化或变化微小可以忽略的工件,对工件表面进行自动跟踪,以焊接机器人行走方向与工件表面上垂直于机器人

行走方向构成的平面为跟踪平面;这主要表现在被动视觉焊缝跟踪上^[1~3];二是针对高度变化的焊件且焊缝方向有相对直边的工件,以焊接机器人行走方向和工件高度变化方向为跟踪平面,这种方法主要体现在以点状激光或线状激光作为检测光源的主

* 上海工程技术大学青年基金(06-7)、上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(06XPYQ17)和上海市科委计划项目(061111034)资助课题。

作者简介: 徐培全(1978—),男,黑龙江人,讲师,博士,主要从事先进材料连接技术、智能焊接机器人系统等方面的研究。
E-mail: xupeiquan7810@yahoo.com.cn

导师简介: 姚舜(1946—),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事焊接装备,高能束焊接等方面的研究。
E-mail: ys@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2007-04-06; 收到修改稿日期: 2007-06-01

动视觉传感中^[4~6]。然而在实际的焊缝跟踪中,还往往会遇到焊缝三维方向上均有焊缝自动跟踪要求的情况,为了实现焊缝的三维跟踪,研制了一种用于焊缝三维跟踪的基于环形激光的视觉传感器。

结合目前主动视觉技术和被动视觉技术的优点,提出能实现焊缝三维模型构建、获取焊缝表面信息的基于环形激光的三维视觉传感技术,对机器人系统标定模型以及三维坐标恢复进行了研究。

2 视觉焊接机器人标定模型

环形激光形成原理为^[7],利用光学扫描方法,通过电动机的旋转扫描作用,并辅以消球差等光学设计方法。在恒定的高度上形成环形激光轨迹。

将开发的基于环形激光的视觉传感器固定在与机器人工具中心点(Tool center point, TCP)相连接的连接板上,与焊炬末端一起构成焊接机器人智能系统。当连接在机器人工具中心点的焊炬末端执行焊缝识别、定位或焊缝跟踪等任务时,在标定和深度提取模型构件的基础上,利用视觉传感器测定焊缝形状位置的三维坐标以及焊炬末端与焊缝之间的相对位置。

基于环形激光视觉传感的焊接机器人系统的标定整体框架包括机器人、焊炬、由 CCD 摄像机和激光二极管构成的视觉传感器以及用于图像处理和机器人运行控制的计算机。假定机器人沿水平方向 x 、 y 、高度方向 z 以及绕轴旋转 θ 角度使焊炬末端能够实现三维方向的实时调节。构架了在焊缝定位与焊缝跟踪过程中起重要的作用的四个坐标系:世界坐标系 $\{W\}$ 、焊炬末端坐标系 $\{T\}$ 、传感器坐标系 $\{L\}$ 和 $\{C\}$ 以及像素平面坐标系 $\{P\}$ 。

2.1 焊接机器人系统坐标系

世界坐标系是关于机器人手爪的预先定义,并定位于机器人底座。对于单个机器人的应用,该坐标系通常就是焊单元的参考坐标系。

焊炬末端坐标系由世界坐标系决定。假设坐标变换 ${}^W T$ 由平移分量和旋转分量组成,而且高度变化的焊件有相对直边。则焊缝跟踪仅需要 x 轴、 y 轴的平移和 z 轴的转动即可实现。坐标变换 ${}^W T$ 及焊炬末端相对于世界坐标系的描述如下式:

$${}^W T = R_z(\vartheta) T_x(\Delta x) T_y(\Delta y) T_z(\Delta z), \quad (1)$$

世界坐标 $\{W\}$ 、焊炬末端坐标 $\{T\}$ 与视觉传感器坐标系之间的关系如图 1 所示,设世界坐标系坐标用 $[x_w \ y_w \ z_w \ 1]$ 表示,焊炬末端坐标系坐标用 $[x_T \ y_T \ z_T]$ 表示,则有

$$\begin{aligned} x_w &= x_T \cos \theta - y_T \sin \theta + \Delta x, \\ y_w &= x_T \sin \theta + y_T \cos \theta + \Delta y, \\ z_w &= z_T + \Delta z, \end{aligned} \quad (2)$$

所以,

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & \Delta x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 Δx 和 Δy 是世界坐标系中焊炬末端与世界坐标系原点之间的偏量沿 x 轴、 y 轴方向的表示。 θ 是焊炬偏离世界坐标系 x 轴的角度,则 ${}^W T$ 可以由齐次矩阵决定:

$${}^W T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & \Delta x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{则} \quad \{W\} = {}^W T \cdot \{T\}, \quad (5)$$

这个标定步骤主要通过机器人的本体标定和焊炬四点标定法来实现。

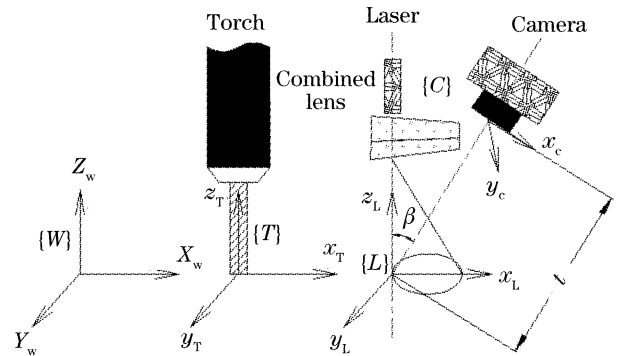


图 1 焊炬与视觉传感器坐标框架

Fig. 1 Architecture of weld torch and vision sensor

焊缝跟踪过程中需要确定视觉传感器坐标系和焊炬末端坐标系之间的关系。平移变换是固定的,因为焊炬和视觉传感器随机器人末端执行器移动。传感器坐标系由两个坐标系组成:激光平面坐标系 $\{L\}$ 和摄像机平面坐标系 $\{C\}$ 。为了决定坐标变换矩阵 ${}^L T$, 定义激光平面坐标系和焊炬末端坐标系之间的关系,然后确定摄像机坐标系和激光平面坐标系的关系。假设激光平面坐标系的原点在环形激光的垂射点: x 轴指向焊接方向; z 轴为世界坐标系的 z 轴方向; y 轴根据右手定则确定,坐标转换 ${}^L T$ 用下式描述,

$${}^L T = T_x(T_0 - B) T_z(-D_{is} t_0), \quad (6)$$

这里 $|T_0 - B|$ 是焊炬末端与环形激光中心的距离, $|D_{is} t_0|$ 是焊炬末端与环形激光中心之间在 z 轴的距离。

离。 ${}^L T$ 能够用下面的齐次转换矩阵来描述：

$${}^L T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & |T_0 - B| \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -|D_{is}t_0| \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则 $\{T\} = {}^L T * \{L\}$. (8)

2.2 基于环形激光的视觉传感器坐标系

视觉传感器拟具有良好的调节特性,满足图像采集获取完整的几何数据,同时也可以避免与工作台面或工件碰撞。对于采用的基于环形激光的视觉传感器我们提出了三个主要角度:激光扫描锥角 α 、分离角 β 与离轴角 γ ,如图 2 所示。

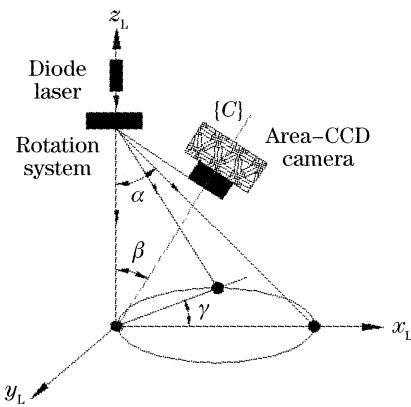


图 2 基于可旋转激光视觉传感器的角度定义

Fig. 2 Angle definition for vision sensor based on rotatable laser

激光扫描锥角是可旋转的正负组合透镜的锥角;分离角是激光二极管光轴与 CCD 摄像机的主光轴的夹角;离轴角是环形激光扫描过程中,单个激光光斑从逆时针离开 x 轴的角度。其中,激光扫描锥角是光学扫描系统的重要参量,它取决于需要产生的环形激光轨迹的大小和视觉传感器的工作距离;分离角是传感器空间构架的重要参量,它决定着采集的图像质量和环形激光轨迹的椭圆度,还没有成熟的理论来指导分离角的选取。离轴角的定义解决了像素坐标系检测点的排序问题,决定着每个检测点成像规律。离轴角不同,环形激光轨迹上的激光斑点在摄像机上的成像规律不同。直接决定着激光扫描轨迹上各点所反映的焊缝的三维坐标,当在摄像机上装上镜头的时候,摄像机坐标系的原点位于透镜中心,而且 z_c 轴与像平面垂直指向环形激光中心;摄像机坐标系 $x_c - y_c$ 平面平行于像平面而且 y_c 轴沿着像平面的宽度方向且与激光二极管光轴相交。 x_c 轴由右手定则决定。激光和像平面的构架如图 3 所示。坐标变换由下式决定：

$${}^c T = -K(x, y, z) \cdot R_y(-\beta), \quad (9)$$

其中,

$$R(-\beta) = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & 0 & -\sin(-\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\beta) & 0 & \cos(-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$K(x, y, z) = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

a 为激光检测平面垂射点的深度,表达式为

$$a = h_0 + \frac{(t-f) \cdot \Delta}{f \cdot \sin \beta + |\Delta| \cdot \cos \beta}, \quad (12)$$

其中 h_0 为系统标定时激光旋转透镜中心(虚拟点)到焊缝表面之间的距离, f 是焦距, Δ 为像平面上像素的距离。距离 t 如图 1 所示。在传感器坐标体系中,发射装置与接收面阵 CCD 之间并不存在位置变换,因此该点激光光斑始终垂射至焊缝,该位置的激光斑点只能沿轴变化,

$${}^c T = \begin{bmatrix} k_x \cos \beta & 0 & k_x \sin \beta & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

则由摄像机坐标系确定的三维检测主动激光的关系如下描述：

$$\{L\} = {}^c T * \{C\}, \quad (14)$$

由于摄像机采用的是像素坐标系,当对基于环形激光视觉传感器采集的图像进行图像处理时,是针对图像的像素进行的。所以需要将摄像机坐标系转换为像素坐标系

$$x_c = \frac{x_{\text{pixel}}}{s_x} - 3.2, \quad y_c = \frac{y_{\text{pixel}}}{s_y} - 2.4, \quad (15)$$

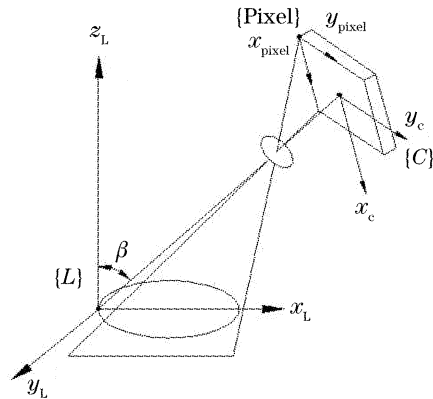


图 3 激光平面和像平面构架

Fig. 3 Architecture of laser plane and image sensitivity plane

式中 $x_{\text{pixel}}, y_{\text{pixel}}$ 为摄像机像敏面的像素坐标, 3.2 为像敏面 x 方向半长, 2.4 为像敏面 y 方向半长, s_x 为像敏面 x 方向单位距离内的像素数, s_y 像敏面 y 方向单位距离内的像素数, 所以,

$${}^{\text{C}}_{\text{pixel}}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/s_x & 0 & 0 & -3.2 \\ 0 & 1/s_y & 0 & -2.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\text{即 } \{\mathbf{C}\} = {}^{\text{C}}_{\text{pixel}}\mathbf{T} \cdot \{\text{pixel}\}, \quad (17)$$

这样, 综合(7)式、(10)式、(15)式及(16)式, 可以实现利用数字图像像素坐标系来恢复焊缝在世界坐标系中的三维坐标。如(18)式所示:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{\text{W}}_{\text{T}} \cdot {}^{\text{T}}_{\text{L}} \cdot {}^{\text{L}}_{\text{C}} \cdot {}^{\text{C}}_{\text{pixel}}\mathbf{T} \begin{bmatrix} x_{\text{pixel}} \\ y_{\text{pixel}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

在实验中, ${}^{\text{W}}_{\text{T}}$ 由计算机通过通信从机器人中获得, ${}^{\text{L}}_{\text{C}} \cdot {}^{\text{C}}_{\text{pixel}}\mathbf{T}$ 是基于环形激光的视觉传感器转换矩阵, 通过标定与数字图像处理实现。 ${}^{\text{T}}_{\text{L}}$ 是联系焊接机器人坐标系与基于环形激光的视觉传感器坐标系的纽带。

当深度变化时激光平面坐标系中激光斑点与焊接接头交点轨迹的成像遵循三角测量原理, 如(19)式~(21)式所示, 其中, L_0 为传感器标准的工作距离(标定距离)时, 激光轨迹曲线圆方程; L_2 为检测高度升高时(传感器与被检测焊件之间的距离变大)的圆轨迹方程; L_3 为检测高度降低时(传感器与被检测焊件之间的距离变小)的圆轨迹方程。

L_0, L_2 与 L_3 的曲线方程分别为

$$L_0: (x - r_0)^2 + y^2 = r_0^2, \quad (19)$$

$$L_2: (x - r_2)^2 + y^2 + (z - \Delta h)^2 = r_2^2, \quad (20)$$

$$L_3: (x - r_3)^2 + y^2 + (z - \Delta h)^2 = r_3^2, \quad (21)$$

根据基于物镜旋转的光学扫描系统原理, 有如下关系存在:

$$\Delta h_2/h_0 = 2(r_2 - r_0)/(2r_0) = (r_2 - r_0)/r_0, \quad (22)$$

$$\Delta h_3/h_0 = 2(r_3 - r_0)/(2r_0) = (r_3 - r_0)/r_0, \quad (23)$$

其中 $\Delta h_2, \Delta h_3$ 为焊件表面高度变化量, 由三角测量原理^[8]给出:

$$\Delta h = \frac{(|Ca_BM| - f) \cdot \Delta}{f \cdot \sin \beta + |\Delta| \cdot \cos \beta}, \quad (24)$$

其中 Δ 为像素平面内标准点与检测高度变化后的点之间的距离, 且有 $\Delta = x_{w0} - x_c$, 这样, 联立方程, 结合标定结果, 即可求出变化后的检测点的在世界坐标系中的三维坐标。

3 标定试验及精度分析

实验在 IRB2400 型工业机器人上完成, 被标定的摄像机为 Watec-902H 型工业摄像机, 镜头焦距 $f=6$ mm, 图像采集卡为 PCI-1409 型数字采集卡。对机器人控制点(焊枪末端)进行精确标定, 选择机器人本体坐标系作为世界坐标系, 通过机器人的控制点获得标定点(网格图形的交叉点)的三维世界坐标系 (x_w, y_w, z_w) 。坐标数据可以直接从与机器人通讯的计算机中获得, 标定点的图像像素坐标值 (x_u, y_u) 采用图像处理软件求得。

基于环形激光视觉机器人系统标定之前, 对摄像机部分内参量作了预标定, 标定结果为, 主点坐标: $(x_u = 382.1875$ mm; $y_u = 288.9375$ mm); 单位距离的像素个数: $(s_x = 119.3226$ pixel/mm; $s_y = 120$ pixel/mm); 有效焦距 $(f_x = 6.2331$ mm; $f_y = 6.1845$ mm); 像素误差 $(x_{\text{error}} = 0.1453$; $y_{\text{error}} = 0.1611)$; 径向畸变系数: $(\text{rad}_x = -0.2227$; $\text{rad}_y = 0.1887)$, 切向畸变系数: $(\text{coff}_x = -0.0018$; $\text{coff}_y = 0.0005)$ 。采集标定点进行标定实验, 其中一部分进行摄像机内外参量的标定, 获取机器人坐标转换矩阵即 ${}^{\text{W}}_{\text{T}}$ 后, 在图像处理中就可求得焊缝在世界坐标系中的三维坐标值。

采用校验点的真实三维坐标与利用标定后的参量所求取的三维坐标之差的模的平均值作为标定精度的度量参量, 包括 50 个分析数据, 根据(25)式,

$$N = \sum_{i=1}^{50} |X_{i1} - X_{i2}| / 50, \quad (25)$$

X_{i1} 为测试点真实三维坐标, X_{i2} 为利用标定参量所求取出来的三维坐标。可得校验点三维世界坐标在 x 方向、 y 方向与 z 方向的标定精度为: $N_x = 0.3612$ mm, $N_y = 0.8317$ mm, $N_z = 0.9244$ mm。

4 四种焊接接头的三维坐标提取

利用开发的视觉传感器以及构建的标定模型, 对无坡口对接焊缝、60°坡口对接焊缝、搭接焊缝与角接焊缝等接头形式的三维坐标进行恢复。结果如图 4 所示, 每种接头形式采用二幅图像来描述三维提取过程, 第一幅是环形激光视觉传感器采集的原始图像, 第二幅是“椭圆-圆”恢复(深度提取)后图像。

各种接头可获得焊缝规划参量, 工件边缘、焊缝起始位置、焊缝间隙(包括深度和宽度)、焊接方向以及焊后的焊缝三维轮廓等。根据“高度变换-半径”[见(18)式~(23)式]或关系三角测量方法[(24)式]方法可获得在激光平面坐标系中的三维坐标, 结合

标定算法模型,可以构建焊接接头在世界坐标系(机器人本体坐标系)下的三维坐标,如表 1 所示。

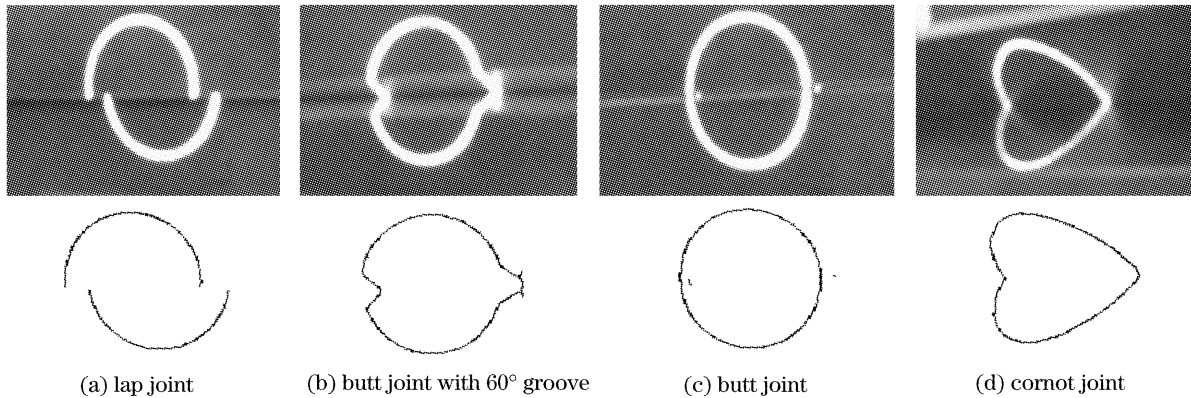


图 4 典型焊接接头的图像处理。(a)搭接接头,(b)带 60 度坡口对接接头,(c)无坡口对接接头,(d)角接头

Fig. 4 Image processing of typical welded joints. (a) Lap joint, (b) butt joint with 60° groove, (c) butt joint, (d) corner joint

表 1 各种焊接接头的三维坐标恢复

Table 1 Three-dimensional recovery of different type welded joints

Welded joint type	Detected points	x /mm	y /mm	z /mm
Butt joint	Isolated point at left side	46.3426	57.1040	171.9244
	Isolated point at right side	66.2066	55.3713	171.9244
	Focus point at left side	44.9883	57.3927	171.9244
	Focus point at right side	64.4008	55.3713	171.9244
Lap joint	Crossing point at left-up side	40.9252	59.1254	163.0489
	Crossing point at right-up side	59.6605	58.8366	163.0489
	Crossing point at left-down side	44.3111	59.9917	170.4090
	Crossing point at right-down side	63.4978	59.9917	170.4090
Butt joint with 60° groove	Abrupt point at left side	45.4397	60.8581	172.9428
	Abrupt point at right side	65.3037	59.4142	172.9428
Corner joint	Acme point on the top of the laser trajectory	45.8912	43.2426	—
	Acme point under laser trajectory	47.9227	72.4092	—
	Abrupt point at left side	45.2140	57.3927	172.4328
	Abrupt point at right side	63.9493	56.8152	172.4328

5 结 论

开发了一种基于环形激光的视觉传感的焊接机器人系统。构架了焊接机器人坐标系模型和视觉传感器坐标系模型,在摄像机内参量标定的基础上,对整个焊接机器人系统的手-眼关系进行了标定,通过实验进行了验证,并对标定精度进行了分析。实验结果表明,标定模型精度能够符合焊接实时检测的要求。利用基于环形激光的视觉传感器实现了无坡口对接焊缝、60°坡口对接焊缝、搭接焊缝与角接焊缝等接头形式的三维坐标恢复。

参 考 文 献

- Chen S B, Lou Y J, Wu L *et al.*. Intelligent methodology for sensing modeling and control of pulsed GTAW; Part 1-bead-on-plate welding[J]. *Welding J.*, 2000, **79**(6): 151~163
- Zhenhua Li, Zhongliang Jing, Shaoyuan Sun. Multi-sensor image fusion using discrete wavelet frame transform[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 578~581
- Je-Yong Yu, Suck-Joo Na. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment. Part 1: Mathematical model[J]. *Mechatronics*, 1997, **7**(7): 599~612
- Xu Peiquan, Yao Shun, Tang Xinhua *et al.*. Mathematical model for circular laser vision system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 640~643
- Meng Jing, Wang Jiajun, Huang Xianwu *et al.*. Multi criterion reconstruction method for optical tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1340~1344 (in Chinese)
孟 静,王加俊,黄贤武等.一种光学层析图像的多准则重建方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1340~1344
- Wu M Sh. Konzeption und Realisierung Optischer Sensor Systeme zur Nahtfuehrung und Parameter Adaption Beim Lichtbogenschweissen[D]. RWTH Aachen, Germany, 1993
- Xu Peiquan, Tang Xinhua, Yao Shun *et al.*. Implementation method of circular laser trajectory based on objective lens[P]. China, CN200510027724.6. 2005.7 (in Chinese)
徐培全,唐新华,姚 舜等.基于物镜旋转的环形激光轨迹实现方法[P]. 中国专利, CN200510027724.6, 2005.7
- Klicker, Juergen. Very compact two-dimensional triangulation-based scanning system for robot vision[C]. *Proc. SPIE*, 1993, **1822**: 217~227